



# ЗБОРНИК РАДОВА



## XXX СИМПОЗИЈУМ ДРУШТВА ЗА ЗАШТИТУ ОД ЗРАЧЕЊА СРБИЈЕ И ЦРНЕ ГОРЕ

2. - 4. октобар 2019. године  
Хотел “Дивчибаре”, Дивчибаре, Србија

**ДРУШТВО ЗА ЗАШТИТУ ОД ЗРАЧЕЊА  
СРБИЈЕ И ЦРНЕ ГОРЕ**



# **ЗБОРНИК РАДОВА**

**XXX СИМПОЗИЈУМ ДЗЗСЦГ  
Дивчибаре  
2- 4. октобар 2019. године**

**Београд  
2019. године**



**RADIATION PROTECTION SOCIETY OF  
SERBIA AND MONTENEGRO**



# PROCEEDINGS

**XXX SYMPOSIUM RPSSM  
Divčibare  
2<sup>nd</sup> - 4<sup>th</sup> October 2019**

**Belgrade  
2019**



ЗБОРНИК РАДОВА

XXX СИМПОЗИЈУМ ДЗЗСЦГ

2-4.10.2019.

Издавачи:

Институт за нуклеарне науке „Винча“

Друштво за заштиту од зрачења Србије и Црне Горе

За извршног издавача:

Проф. др Снежана Пајовић, научни саветник

в.д. директора Института за нуклеарне науке Винча

Уредници:

Др Михајло Јовић

Др Гордана Пантелић

**ISBN 978-86-7306-154-2**

©Institut za nuklearne nauke „Vinča“

Техничка обрада:

Михајло Јовић, Гордана Пантелић

Електронско издање:

Институт за нуклеарне науке ”Винча”, Мике Петровића Аласа 12-14, 11351  
Винча, Београд, Србија

Тираж:

150 примерака

Година издања:

Септембар 2019.

**XXX СИМПОЗИЈУМ ДРУШТВА  
ЗА ЗАШТИТУ ОД ЗРАЧЕЊА  
СРБИЈЕ И ЦРНЕ ГОРЕ**

Дивчибаре, од 2.10. до 4.10.2019. године

Организатори:

**ДРУШТВО ЗА ЗАШТИТУ ОД ЗРАЧЕЊА СРБИЈЕ И ЦРНЕ ГОРЕ**

**ИНСТИТУТ ЗА НУКЛЕАРНЕ НАУКЕ „ВИНЧА“**

**Лабораторија за заштиту од зрачења и заштиту животне средине „Заштита“**

Организациони одбор:

Председник: Гордана Пантелић

Чланови:

Михајло Јовић, Институт за нуклеарне науке „Винча“, Београд  
Маја Еремић Савковић, Директорат, Београд  
Никола Свркота, ЦЕТИ, Подгорица, Црна Гора  
Иван Кнежевић, Нуклеарни објекти Србије, Београд  
Јелена Пајић, Институт за медицину рада Србије „Др Драгомир Карајовић“,  
Београд  
Кристина Бикит, Природно математички факултет, Нови Сад  
Андреа Којић, Институт за нуклеарне науке „Винча“, Београд  
Милица Рајачић, Институт за нуклеарне науке „Винча“, Београд  
Наташа Сарап, Институт за нуклеарне науке „Винча“, Београд  
Никола Кржановић, Институт за нуклеарне науке „Винча“, Београд  
Предраг Божовић, Институт за нуклеарне науке „Винча“, Београд  
Марко Крајиновић, Институт за нуклеарне науке „Винча“, Београд

Редакциони одбор:

др Невенка Антовић, Природно математички факултет, Подгорица  
др Душан Мрђа, Природно математички факултет, Нови Сад  
др Софија Форкапић, Природно математички факултет, Нови Сад  
др Биљана Миленковић, Природно математички факултет, Крагујевац  
др Јелена Стајић, Природно математички факултет, Крагујевац  
др Ненад Стевановић, Природно математички факултет, Крагујевац  
др Јелена Ајтић, Факултет ветеринарске медицине, Београд  
др Владимир Удовичић, Институт за физику, Земун, Београд  
др Наташа Лазаревић, Нуклеарни објекти Србије, Београд  
др Драгана Тодоровић, Институт за нуклеарне науке „Винча“, Београд  
др Гордана Пантелић, Институт за нуклеарне науке „Винча“, Београд  
др Ивана Вуканац, Институт за нуклеарне науке „Винча“, Београд  
др Ивана Смичиклас, Институт за нуклеарне науке „Винча“, Београд  
др Јелена Крнета Николић, Институт за нуклеарне науке „Винча“, Београд  
др Марија Јанковић, Институт за нуклеарне науке „Винча“, Београд  
др Милош Живановић, Институт за нуклеарне науке „Винча“, Београд  
др Оливера Цирај-Бјелац, Институт за нуклеарне науке „Винча“, Београд  
др Игор Челиковић, Институт за нуклеарне науке „Винча“, Београд



Организацију су помогли:

Институт за нуклеарне науке „Винча“, Лабораторија за заштиту од зрачења и заштиту животне средине

Излагачи:

*Canberra Packard Central Europe GmbH.*

*Wienersiedlung 6*

*2432 SCHWADORF, Austria*

*Phone: +43 (0)2230 3700-0*

*Fax: +43 (0)2230 3700-15*

*Web: <http://www.cpce.net/>*

*LKB Vertriebs GmbH, Представништво Београд*

*Цвијићева 115*

*11120 Београд, Србија*

*Тел: +381 (0)11 676 6711*

*Факс: +381 (0)11 675 9419*

*Веб: [www.lkb.eu](http://www.lkb.eu)*

*Овај Зборник је збирка радова саопштених на XXX Симпозијуму Друштва за заштиту од зрачења Србије и Црне Горе који је одржан од 2.10. до 4.10.2019. године на Дивчибарама. Радови су разврстани у 11 секција. И поред тога што су сви радови у Зборнику рецензирани од стране Редакционог одбора, за све изнесене тврдње и резултате одговорни су сами аутори.*

*Југословенско друштво за заштиту од зрачења основано је 1963. године у Порторожу, а од 2005. године носи име Друштво за заштиту од зрачења Србије и Црне Горе.*

*Ове године Друштво обележава 56 година организоване заштите од зрачења на простору бивше Југославије. Поред радова у којима се приказују најновија истраживања, у овом зборнику се налазе и прегледни радови који дају кратак сажетак и анализу објављених радова, метода и резултата са претходних 29 симпозијума. Захваљујемо се на изузетном труду аутора ових прегледних радова који су веома квалитетни и корисни, како за младе колеге, тако и за оне који су били на претходним симпозијумима или су читали претходне зборнике.*

*Симпозијум Друштва за заштиту од зрачења Србије и Црне Горе је јединствена прилика да кроз стручни програм предочимо напредак у области заштите од зрачења, анализирамо досадашње резултате и актуелна дешавања, разменимо искуства са колегама из земље и региона, али и да сретнемо старе и упознамо нове пријатеље.*

*Организациони одбор се захваљује ауторима и коауторима научних и стручних радова на доприносу и уложеном труду. Посебно се захваљујемо спонзорима који су помогли одржавања Симпозијума.*

*Организациони одбор XXX симпозијума  
Друштва за заштиту од зрачења Србије и Црне Горе*

CIP - Каталогизација у публикацији  
Народна библиотека Србије, Београд  
502:504.5]:539.16(082)(0.034.2)  
614.875/.876(082)(0.034.2)  
539.16.04(082)(0.034.2)  
539.1.074/.08(082)(0.034.2)  
577.1:539.1(082)(0.034.2)

ДРУШТВО за заштиту од зрачења Србије и Црне Горе (Београд). Симпозијум (30 ; 2019 ; Дивчибаре)

Зборник радова [Електронски извор] / XXX симпозијум ДЗЗСЦГ [Друштва за заштиту од зрачења Србије и Црне Горе], 2- 4. октобар 2019. године, Дивчибаре, Србија ; [организатори] Друштво за заштиту од зрачења Србије и Црне Горе [и] Институт за нуклеарне науке "Винча", Лабораторија за заштиту од зрачења и заштиту животне средине Заштита ; [уредници Михајло Јовић, Гордана Пантелић]. - Београд : Институт за нуклеарне науке "Винча" : Друштво за заштиту од зрачења Србије и Црне Горе, 2019 (Београд ; Институт за нуклеарне науке "Винча"). - 1 електронски оптички диск (CD-ROM) : текст ; 12 cm

Системски захтеви: Нису наведени. - Насл. са насловне стране документа. - Радови на срп. и енгл. језику. - Текст ћир. и лат. - Тираж 150. - Библиографија уз већину радова. - Abstracts. - Регистар.

ISBN 978-86-7306-154-2 (ИННВ)

а) Заштита од јонизујућег зрачења -- Зборници б) Животна средина -- Загађење радиоактивним материјама -- Зборници в) Радиоактивно зрачење -- Штетно дејство -- Зборници г) Нејонизујуће зрачење -- Штетно дејство -- Зборници д) Радиобиологија -- Зборници ђ) Дозиметри -- Зборници

COBISS.SR-ID 279687436

## **ОПШТИ ПРОБЛЕМИ ЗАШТИТЕ ОД ЗРАЧЕЊА**





## METODE ISPITIVANJA RADIOAKTIVNOSTI ŽIVOTNE SREDINE I AKCIDENTI

**Dušan MRĐA, Ištvan BIKIT, Sofija FORKAPIĆ, Kristina BIKIT-ŠREDER,  
Nataša TODOROVIĆ i Jovana NIKOLOV**

*Univerzitet u Novom Sadu, Prirodno-matematički fakultet, Novi Sad, Srbija,  
[mrdjad@df.uns.ac.rs](mailto:mrdjad@df.uns.ac.rs), [bikit@df.uns.ac.rs](mailto:bikit@df.uns.ac.rs), [sofija@df.uns.ac.rs](mailto:sofija@df.uns.ac.rs),  
[kristina.bikit@df.uns.ac.rs](mailto:kristina.bikit@df.uns.ac.rs), [natasza.todorovic@df.uns.ac.rs](mailto:natasza.todorovic@df.uns.ac.rs), [jovana.nikolov@df.uns.ac.rs](mailto:jovana.nikolov@df.uns.ac.rs)*

### SADRŽAJ

*Poslednjih 30 godina oblast zaštite od zračenja obeležila su dva nuklearna akcidenta Černobilj 1986. i Fukušima 2011, čije su se posledice osetile i na svetskom nivou, a nakon kojih su pokrenuta i sistematska ispitivanja fisijonih produkata u zemljištu, hrani i ekosistemu Dunava na teritoriji Srbije.*

*Posle akcidenta u nuklearnoj elektrani Fukushima Daiichi, svakodnevno su sakupljani aerosoli, kišnica, mleko i spanać. Izmerene koncentracije aktivnosti  $^{131}\text{I}$  u aerosolima bile su reda veličine  $\text{mBq}\cdot\text{m}^{-3}$ , dok su u uzorcima kišnice, mleka i spanaća izmerene koncentracije aktivnosti  $^{131}\text{I}$  od oko  $1 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ , što je demonstriralo sposobnost novih detekcionih sistema u dostizanju niskih granica detekcije radionuklida u vazduhu i u svežim uzorcima iz životne sredine za relativno kratke periode merenja.*

*Pored unapređenja detekcije niskih aktivnosti, kao kontinuirani zadatak laboratorija koje se bave zaštitom od zračenja, nameće se potreba za radiološkom kontrolom tovara otpadnog gvožđa u kojima se slučajno ili namerno može naći izvor jonizujućeg zračenja.*

*Razvoj različitih grana industrije zahtevao je upotrebu radioaktivnih izvora u merno-regulacionim tehnikama (merenje nivoa i gustine materijala, debljine slojeva materijala itd.), čija instalacija, kontrola, praćenje i demontaža obuhvata primenu dozimetrijskih merenja, kao i odgovarajuća modeliranja u cilju sprovođenja mera zaštite od jonizujućih zračenja.*

*Uporedo sa merenjima vezanim za akcidente i zaštitu od zračenja, razvijane su i usavršavane odgovarajuće metode za detekciju radionuklida, kao što je in-situ gama spektrometrija i gama spektrometrijsko određivanje sadržaja osiromašenog uranijuma u uzorcima zemljišta.*

### 1. Uvod

Odmah nakon Černobiljskog akcidenta na Departmanu za fiziku u Novom Sadu postavljen je hitan sistem za monitoring. Veoma skromna oprema (jedan Ge(Li) detektor efikasnosti 15% štićen sa 25 cm gvožđa, povezan sa 4K memorijskim analizatorom Nuclear Data 2400) uz pomoć visoko obučenog osoblja u oblasti gama spektroskopije, omogućila je česta merenja uzoraka sa 6 lokacija na području pokrajine Vojvodine. U periodu 1.05.1986. - 30.09.1986. više od 750 uzoraka filtrata vazduha, površinske vode, pijaće vode, zemljišta, trave, mleka, mesa i povrća su precizno merena. Najveće vrednosti koncentracija aktivnosti pronađene su u regionu Vršca (blizu

rumunske granice), gde su se aktivnosti I-131 u ovčijem mesu i mleku kretale do 30 kBq/kg. U navedenom periodu sadržaj Cs-137 u ovčijem mesu i zelenom povrću je iznosio prosečno oko 500 Bq/kg i 200 Bq/kg, respektivno. Na osnovu izmerenih vrednosti procenjeno je da srednja efektivna doza od Černobilskih efluenta nije prešla vrednost od 0,5 mSv do kraja 1986. godine. Institut za fiziku učestvovao je i u merenju radioaktivnosti reke Dunav na granici Jugoslavija-Mađarska od 1980. godine. Sistematično uzorkovanje i metodologija merenja [1] uspostavljeni su kako bi se pratio uticaj rada nuklearne elektrane "Pakš" (Mađarska) na Dunav i pružili korisne podatke o distribuciji radionuklida u ekosistemu reke pre i nakon akcidenta u Černobilu.

Akcident u nuklearnoj elektrani Fukushima Daiichi nastao je kao posledica razarajućeg zemljotresa i pratećeg cunamija koji je pogodio severoistočnu obalu Japana u martu 2011.godine. Ovaj akcident doneo je zabrinutost u celom svetu usled činjenice da je velika količina radioaktivnih čestica dospela u životnu sredinu. Radioaktivne čestice različite veličine, oblika i strukture registrovane su širom sveta u raznim biološkim i drugim medijima [2].

Prvi tragovi kratkoživećih fisionih produkata, detektovani su 12.marta u Takasaki mernoj stanici u Japanu (220 km udaljenoj od nuklearne elektrane Fukushima), zatim u istočnom delu Rusije 14.marta i u Seattle US 17.marta [3]. Disperzija radioaktivnosti detektovana je i na Islandu 19-20.marta, a prva Nemačka merna stanica zabeležila je prisustvo <sup>131</sup>I u aerosolima sakupljenim od 21-23.marta [4]. Takođe, u Solunu u Grčkoj, registrovane se prve detektabilne vrednosti <sup>131</sup>I u aerosolima sakupljenim u periodu 24-25. mart [5]. U ovom radu opisano je prisustvo <sup>131</sup>I u severnom delu Srbije.

Izgubljeni radioaktivni izvori su često slučajno ili namerno izmešani sa starim metalnim otpadom. Da bi se predupredila radioaktivna kontaminacija životne sredine, ovi izvori trebaju da budu detektovani i uklonjeni iz tovara metalnog otpada. <sup>137</sup>Cs, <sup>60</sup>Co, <sup>152</sup>Eu, <sup>226</sup>Ra, <sup>241</sup>Am, <sup>232</sup>Th i <sup>238</sup>U su radioizotopi koji su češće zastupljeni u metalnom otpadu (najčešće gvozdenu). Radiološka kontrola je bazirana na merenju brzine doze jonizujućeg zračenja na površini tovara otpadnog metala. Međutim, problem koji se tom prilikom javlja je apsorpcija zračenja u metalu. To je razlog zbog kojeg merena brzina doze na površini metalnog tovara u prevoznom sredstvu (kamionu) često ne ukazuje na prisustvo izvora nižih aktivnosti koji su ubačeni unutar metalnog otpada.

Još od šezdesetih godina prošlog veka u cilju zaštite od atmosferskog pražnjenja umesto klasičnog tipa Franklinovog gromobrana ili Faradejevog kaveza na pojedinim lokacijama Republike Srbije korišćeni su gromobrani (zaštitnici od atmosferskog pražnjenja) koji sadrže radioaktivne izotope (najpre je korišćen Co-60, a potom i Eu-152). Co-60 početne aktivnosti 200 mCi (7,4 GBq) ugrađivan je u periodu 1968-1972. godine, dok je Eu-152 početne aktivnosti 400 mCi (14,8 GBq) ugrađivan u periodu 1972-1991.godine. Sa donošenjem nove zakonske regulative koja je zabranjivala ugradnju novih radioaktivnih gromobrana i uklanjanje postojećih, pojavio se problem pojave ovih radioaktivnih izvora u otpadnom metalu, kao posledica neovlašćenog uklanjanja radioaktivnih gromobrana sa ranijih privrednih ili stambenih objekata. Ovo je dovodilo i do akcidentalnih situacija u kojima je moglo da dođe do ozračavanja lica koja se nađu u blizini skinutih radioaktivnih gromobrana.

Kao primer upotrebe radioizotopa u merno-regulacione svrhe u industriji, sa aspekta zaštite od zračenja, analizirana je situacija koja se odnosi na krečnu peć sa odgovarajućim pozicijama zatvorenih izvora jonizujućeg zračenja Co-60 lociranim na zidu krečne peći, i procenjene godišnje ekvivalentne doze za radnike. Takođe, upotreba različitih materijala sa povećanom prirodnom radioaktivnošću u keramičkoj industriji (cirkonil, frita,

pigmenti,...) može da dovede do eksternog i internog ozračavanja radnika iznad propisanih nivoa ukoliko se ne posveti dovoljna pažnja zaštiti od jonizujućih zračenja. Analiza kontaminacije zemljišta usled upotrebe projektila koji sadrže osiromašeni uranijum zahtevala je razvoj pouzdane laboratorijske gama-spektrometrijske metode za određivanje sadržaja osiromašenog uranijuma [6] u uzorcima zemljišta.

## 2. Distribucija Cs-137 u zemljištu nakon černobiljskog akcidenta

Distribucija Cs-137 ispitivana je u tipovima zemljišta koji pripadaju različitim geomorfološkim formacijama:

- a) Lesni plato (černozem - region Subotice)
- b) Aluvijalna ravan (smonica - region Vršca)
- c) Lesna terasa (černozem - region Novog Sada)

Usled agrotehničkog tretmana (oranja, itd) zemljišta, na svim lokacijama se vertikalna distribucija do dubine od 30 cm nije mogla precizno odrediti. Uzorci zemljišta sa 4 dubine (10, 40, 100 i 300 cm) uzeti su tokom 1988. i 1989. godine. Izmerene koncentracije aktivnosti prikazane su u tabeli 1.

**Tabela 1. Izmerene koncentracije aktivnosti Cs-137 u uzorcima zemljišta.**

Dubina (cm)	Koncentracija aktivnosti Cs-137 (Bq/kg)					
	Lokacija a)		Lokacija b)		Lokacija c)	
	1988	1989	1988	1989	1988	1989
10	9,0 (12)	6,5 (9)	44 (6)	23 (3)	8,7 (14)	6,6 (13)
40	1,3 (5)	2,5 (7)	5,3 (8)	4,3 (7)	0,7 (3)	2,1 (6)
100	< 0,6	< 0,7	< 0,4	< 0,7	< 0,4	< 0,5
300	< 0,3	< 0,3	< 0,3	< 0,4	< 0,3	< 0,3
$\alpha(\text{cm}^{-1})$	0,06	0,03	0,07	0,05	0,08	0,04

Uzimajući u obzir pretpostavku [7] da je vertikalna distribucija radionuklida eksponencijalna, koeficijenti distribucije su određeni na sledeći način:

$$A(d) = A(d_0) \cdot e^{-\alpha(d-d_0)}$$

gde su  $A(d)$  i  $A(d_0)$  koncentracije aktivnosti na dubinama  $d$  i  $d_0$ .

## 3. Nuklearni akcident u Fukušimi, Japan, 2011.godine

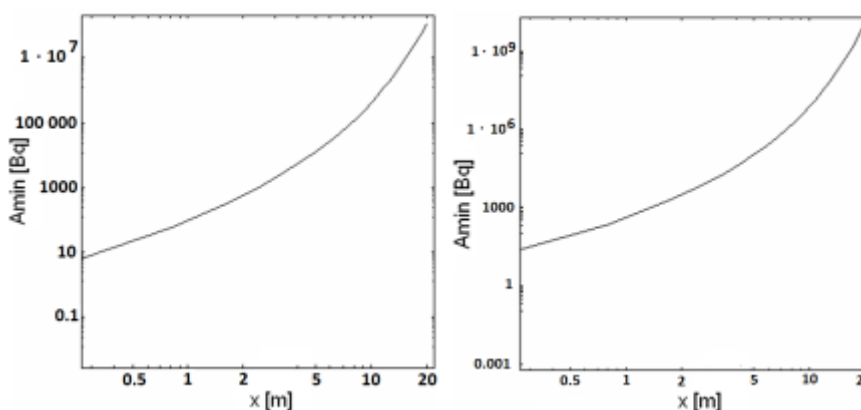
Aerosoli iz vazduha uzorkovani su u Novom Sadu na standardnom filter papiru uzorkivačem model F&J DFHV-1[8]. Ovaj uzorkivač poseduje visok protok od oko 2 m<sup>3</sup> vazduha u minuti, poseduje digitalni merač protoka, može meriti proteklo vreme i akumuliranu zapreminu. Tačnost očitanoog protoka je u opsegu ± 4%. Aerosoli su sakupljeni na filter papiru svakodnevno u trajanju od oko 2 sata. Posle prve detekcije <sup>131</sup>I u uzorku sakupljanom 24. marta u Novom Sadu, moglo se očekivati da se radioaktivne materije sa pretpostavljenim poreklom iz Fukushime mogu pojaviti u detektabilnim vrednostima i u drugim uzorcima iz životne sredine. Počevši od 28. marta sve do 20. aprila, svakodnevno su sakupljeni i analizirani uzorci iz životne sredine (mleko, zelena salata, spanać, kišnica, trava,...). Lokacije sa kojih su uzorci uzimani su bile na teritoriji Vojvodine, kišnica je sakupljena u meteorološkoj stanici Rimski Šančevi, sa površine od oko 1 m<sup>2</sup>. Glavni kriterijum za izbor uzoraka hrane bio je stepen usvajanja radioaktivnih elemenata iz aerosola, u skladu sa tim birane su zelene biljke sa širokim

listovima (spanać). Dnevno su uzorkovani ovčije i kozije mleko, kao i spanać. Uzorci su uzorkovani i pripremani u skladu sa metodom [9].

Detektorski sistem kojim su merene koncentracije aktivnosti je niskofonski gama spektrometar, relativne efikasnosti 100% [10].

#### 4. Detekcioni limiti za radioaktivne izvore koji se nalaze u gvozdenom metalnom otpadu

Izračunate su odgovarajuće minimalne aktivnosti  $A_{\min}$  za radioaktivne izvore  $^{60}\text{Co}$  i  $^{137}\text{Cs}$ , koje oni moraju da poseduju, u funkciji debljine,  $x$ , gvozdenog sloja da bi na površini gvozdenog sloja rezultujuća brzina doze iznosila  $0,2 \mu\text{Gy}/\text{h}$ . Naši rezultati su prikazani na sledećim graficima.



Slika 1. Minimalna aktivnost  $A_{\min}$   $^{60}\text{Co}$  (levo) i  $^{137}\text{Cs}$  (desno) kao funkcija debljine  $x$  sloja gvožđa.

Ovi rezultati pokazuju da atenuacija jonizujućeg zračenja u gvožđu značajno redukuje mogućnost detekcije radioizotopa zaklonjenih metalnim otpadom. Radioaktivni izvori koji emituju visoko-energetske gama zrake mogu biti lakše detektovani, čak iako su aktivnosti ovih izvora relativno niske. Sa druge strane, nisko-energetski gama emiteri, kao što je  $^{241}\text{Am}$  su u potpunosti ekranirani već sa 1 cm gvožđa, kada minimalna detektabilna aktivnost iznosi  $10^7$  Bq. U ovom pojednostavljenom pristupu u obzir smo uzeli samo gama zračenje koje je direktno emitovano od izvora ka detektoru, ignorišući Komptonovo rasejanje gama zračenja na gvozdenom sloju. Takođe, pretpostavili smo da je prostor između izvora i detektora homogeno ispunjen gvožđem, dok je u realnosti taj prostor ispunjen gvožđem i vazduhom. Uključivanjem zanemarenih faktora u račun naš metod se može poboljšati. Na bazi naših izračunavanja, doza i radijacioni rizik u blizini transportnog vozila mogu biti jednostavno procenjeni ukoliko se pretpostavi odgovarajuća aktivnost određenog izvora skrivenog iza gvozdenog sloja odgovarajuće debljine, i obrnuto, moguće je proceniti aktivnost skrivenog izvora na bazi izvršenih dozimetrijskih merenja.

U nastavku navodimo kratak opis konstrukcije radioaktivnog gromobrana, čiji radioaktivni izvor Co-60, ili Eu-152, nakon neovlašćenog uklanjanja može dospeti u metalni otpad. Gromobranska instalacija radioaktivnog gromobrana postavljenog na stub koji može da se nalazi na zemlji ili krovu nekog objekta, sastoji se iz: hvataljke sa izvorom jonizujućeg zračenja, najmanje dva odvodna voda, mernog spoja i uzemljenja.

Hvataljka sa izvorom jonizujućih zračenja čini osnovni element gromobranske instalacije [11]. Sastavni delovi hvataljke su: radni zaštitni kontejner, izvor jonizujućeg zračenja, visokonaponski izolator, konusni metalni prsten, spoljni vezujući elementi (šiljak, zavrtanj, noseća pocinkovana cev i sl.), postolje za učvršćenje.

Radni zaštitni kontejner služi za nošenje radioaktivnog izvora i zaštitu prostora ispod kontejnera od štetnog dejstva jonizujućeg zračenja. Izvor jonizujućeg zračenja ima formu prstena smeštenog u žleb kontejnera. Izvor zračenja je u obliku žice prečnika 0,8 mm, dužine 120 mm, koja je uvučena u cevčicu od nerđajućeg čelika zavarenu na krajevima. Izvor je osiguran od ispadanja na taj način što je žleb zaliven specijalnom masom i odozgo zatvoren poklopcem od aluminijuma. Visokonaponski izolator izoluje konusni metalni prsten od mase. Konusni metalni prsten vrši usmeravanje električnog polja, čime se poboljšava efikasnost radioaktivnog gromobrana. Glava radioaktivnog gromobrana, odnosno hvataljka, se utvrđuje na noseću pocinkovanu cev najčešće dužine 4m. Radioaktivni gromobrani su se postavljali u većini slučajeva na krovne konstrukcije. Druga varijanta je bilo postavljanje radioaktivnih gromobrana na stubove visine oko 25 m koji su montirani direktno na podlogu. Krovna konstrukcija – noseći građevinski delovi su morali da budu takvi da se svede na minimum mogućnost da dođe do požara ili pada gromobranske konstrukcije. Koristan snop zračenja je usmeren naviše i ima oblik konusa. Zaštićena zona u smislu zaštitnog dejstva gromobrana od udara groma se prostirala na preko 100 m od samog gromobrana (zaštitnika).

### 5. Primer korišćenja radioaktivnog izvora u merno-regulacione svrhe u industriji i problem zaštite od zračenja

Proračun brzine doze za radioaktivni izvor Co-60 koji je smešten pri vrhu krećne peći:

- Početna aktivnost izvora Co-60 :  $A_0 = 35$  mCi ( 05.08.2002. ), Period poluraspada  $T_{1/2} = 5,27$  godina

- Aktivnost izvora Co-60 na dan 05.05.2012. :  $A = 9,71$  mCi

Izračunavanje brzine doze jonizujućeg zračenja pri otvorenom olovnom kontejneru u kojem je smešten izvor na poziciji detektora lociranog naspram izvora zračenja:

$$D = J_{\gamma} A / R^2, \quad D - \text{brzina doze}$$

$$J_{\gamma} - \text{jonizaciona konstanta} \quad [ R \text{ cm}^2 / (\text{mCi} \cdot \text{h}) ]$$

$$A - \text{aktivnost izvora} \quad [ \text{mCi} ]$$

$$R - \text{rastojanje od izvora} \quad [ \text{cm} ]$$

Energije emitovanih fotona Co-60 iznose  $E_{\gamma 1} = 1,17$  MeV ( $p_{\gamma 1} = 1$ ) i  $E_{\gamma 2} = 1,33$  MeV ( $p_{\gamma 2} = 1$ ).

$$J_{\gamma} = i_{\gamma 1} \cdot p_{\gamma 1} + i_{\gamma 2} \cdot p_{\gamma 2}$$

Jonizacione konstante  $i_{\gamma 1}$  i  $i_{\gamma 2}$  za dve navedene energije iznose:

$$i_{\gamma 1} = 6,5 R \cdot \text{cm}^2 / (\text{mCi} \cdot \text{h}), \quad i_{\gamma 2} = 7 R \cdot \text{cm}^2 / (\text{mCi} \cdot \text{h}).$$

$$J_{\gamma} = 6,5 R \cdot \text{cm}^2 / (\text{mCi} \cdot \text{h}) + 7 R \cdot \text{cm}^2 / (\text{mCi} \cdot \text{h}) = 13,5 R \cdot \text{cm}^2 / (\text{mCi} \cdot \text{h})$$

$$A = 9,71 \text{ mCi}$$

Ukupno rastojanje od izvora zračenja do pozicije detektora iznosi

$$R = 500 \text{ cm.}$$

Izračunata brzina doze iznosi:

$$D = 13,5 \frac{R \text{ cm}^2}{\text{mCi h}} \cdot \frac{9,71 \text{ mCi}}{(500 \text{ cm})^2} \Rightarrow D = 5,2434 \cdot 10^{-4} \text{ R/h,}$$

a kako je  $1 \text{ R} = 0,0087 \text{ Gy} \Rightarrow D = 4,56 \cdot 10^{-6} \text{ Gy/h} \Rightarrow D = 4,56 \mu\text{Sv/h.}$

## 6. Primena materijala sa povećanom prirodnom radioaktivnošću u keramičkoj industriji

Merenja jačine ambijentalnog ekvivalenta doze su izvršena na različitim pozicijama u skladišnom prostoru i karakterističnim tačkama proizvodne linije gde se upotrebljavaju odgovarajući materijali za izradu keramičkih pločica. Jačina ambijentalnog ekvivalenta doze jonizujućeg zračenja odstupala je od fonskog nivoa (0,10 – 0,15  $\mu\text{Sv/h}$ ) u neposrednom kontaktu sa sirovinama cirkobit, sirovi kaolin, feldspat, pigmenti.

U tabeli 2 su navedeni rezultati merenja jačine ambijentalnog ekvivalenta doze, sa kratkim opisom mernih pozicija.

**Tabela 2. Izmerene jačine ambijentalnog ekvivalenta doze.**

R.br.	Lokacija	Opis	Jačina ambijentalnog ekvivalenta doze ( $\mu\text{Sv/h}$ )
4.	Magacin sirovina - pigmenti	Kontaktno sa predmetnim materijalom	0,5 – 1,4
5.	Magacin sirovina ( na otvorenom ) - cirkobit	Kontaktno sa predmetnim materijalom	2,2
12.	Otvoreno skladište – sirovi kaolin	Kontaktno sa predmetnim materijalom	0,25 – 0,5

## 7. Određivanje sadržaja osiromašenog uranijuma u zemljištu gama-spektrometrijskim metodom

Koncentracija aktivnosti uranijuma-238 koji potiče od *osiromašenog uranijuma* :  $a(^{238}\text{U}_D)$ , može se izraziti na sledeći način [6]:

$$a(^{238}\text{U}_D) = a(^{238}\text{U}) - F a(^{226}\text{Ra}),$$

sa odgovarajućom mernom nesigurnošću

$$\Delta a(^{238}\text{U}_D) = \left\{ \left[ \Delta a(^{238}\text{U}) \right]^2 + \left[ \Delta a_F \right]^2 \right\}^{1/2}, \text{ gde je } \Delta a_F = F \left\{ \left[ \frac{\Delta a(^{226}\text{Ra})}{a(^{226}\text{Ra})} \right]^2 + \left( \frac{\Delta F}{F} \right)^2 \right\}^{1/2} a(^{226}\text{Ra}),$$

dok su:

$a(^{238}\text{U}) \pm \Delta a(^{238}\text{U})$  - koncentracija aktivnosti  $^{238}\text{U}$  dobijena iz linija  $^{234}\text{Th}$  i  $^{234}\text{Pa}$ ,

$a(^{226}\text{Ra}) \pm \Delta a(^{226}\text{Ra})$  - koncentracija aktivnosti  $^{226}\text{Ra}$  dobijena iz postradonskih linija izotopa  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{214}\text{Pb}$ ,  $^{214}\text{Bi}$ .

$F \pm \Delta F$  - empirijski uveden faktor koji predstavlja odnos koncentracija aktivnosti  $^{238}\text{U}$  i  $^{226}\text{Ra}$  (čime smo uzeli u obzir mogućnost narušavanja ravnoteže uranijumovog niza u prirodno prisutnom uranijumu),  $F = 1,3 \pm 0,3$ .

## 8. Diskusija i zaključak

Prethodno selektovani primeri problema zaštite od zračenja, kao i opisane akcidentalne situacije mogu se sumirati na sledeći način.

Kada su u pitanju ispitivanja kontaminacije zemljišta kao posledice Černobilskog akcidenta, utvrđeno je da je na dubinama od 100 cm i 300 cm koncentracija Cs-137 u



uzorcima bila ispod granice detekcije, tako da su vrednosti navedene u tabeli 1 dobijene na osnovu podataka za dve dubine. Najvažniji zaključak iz ovih merenja je da stacionarna distribucija radionuklida nije uspostavljena tri godine nakon površinske kontaminacije.

Imajući u vidu rezultate gama-spektrometrijskih merenja u okolini Novog Sada nakon akcidenta u Fukušimi, procenjena je doza zračenja koje bi stanovnici mogli primiti u toku jednog meseca kao posledicu udisanja aerosola iz vazduha i unosa mleka i spanaća u organizam [12], koji sadrže radioaktivni  $^{131}\text{I}$  u tragovima. Za ovčije mleko i spanać procenjen je mesečni unos od oko 30 litara mleka u oko 6 kg spanaća. Bazirano na procenjenim dozama (3,5 nSv-aerosol, 0,5  $\mu\text{Sv}$  – ovčije mleko, 0,1  $\mu\text{Sv}$  - spanać), može se zaključiti da je ukupna doza koju bi stanovnik primio (čak i kada bi  $^{131}\text{I}$  bio prisutan u vazduhu i hrani u toku cele godine), u koncentracijama koje su detektovane, daleko ispod maksimalne dozvoljene doze za stanovništvo od 1 mSv godišnje [13].

Prikazan je primer izračunavanja brzine doze jonizujućeg zračenja usled korišćenja izvora  $^{60}\text{Co}$  u merno-regulacione svrhe u industriji. Na bazi dobijenih rezultata moguće je izvršiti procenu godišnje ekvivalentne doze za radnike koji bi prema potrebi boravili na platformama oko krećne peći, npr. na poslovima čišćenja i održavanja platforme, kod detektora naspram izvora Co-60, uzimajući u obzir pretpostavku da se na analiziranoj poziciji radnik dnevno zadržavao do 1 sata. Tako se dobija da godišnja doza za navedenu poziciju (pri aktivnosti izvora  $^{60}\text{Co}$  od 9,71 mCi i praznoj peći) iznosi 1,1 mSv (zanemarujući pad aktivnosti navedenog izvora tokom jedne godine za koju je dozni račun izvršen). Izračunata vrednost ukazuje da je očekivana ekvivalentna doza koju radnik može da primi u toku godine značajno ispod 6 mSv, što radnike na analiziranim pozicijama svrstava u B kategoriju profesionalno izloženih lica.

U slučaju korišćenja materijala sa prirodno povišenom radioaktivnošću u keramičkoj industriji (cirkobit, sirovi kaolin, pigmenti,...) i imajući u vidu prosečna vremena boravka radnika u blizini navedenih materijala tokom transporta u pogonu, kao i boravka u proizvodnoj jedinici, sledi da su procenjene efektivne doze koje bi radnik primio usled eksternog izlaganja u toku jedne godine (~ 246 radnih dana), sledeće:

- 0,27 mSv/god ( za cirkobit u slučaju neposrednog kontakta )
- 0,06 mSv/god ( za sirovi kaolin u slučaju neposrednog kontakta )
- 0,17 mSv/god ( za pigmente u slučaju neposrednog kontakta )
- 0,042 mSv/god ( za feldspat u slučaju neposrednog kontakta )

-----  
0,54 mSv/god - Ukupno od predmetnih materijala

Navedene procenjene vrednosti su manje od efektivne doze od 1 mSv/god koja predstavlja graničnu vrednost doze za stanovništvo.

### 9. Literatura

- [1] I. Bikit, S. Lulić, F. Dolanszky, J. Simor. Hungarian-Yugoslav radioactivity investigation at the Danube border line from 1978 to 1984. *Izotoptechnika* (Hungary) 29, 1986, 109-121.
- [2] B. Salbu. Radionuclides Released to the Environment Following Nuclear Events. *Integrated Environ. Assess. Manag.* 7, 2011, 362-364.
- [3] J. Diaz Leon et al. Arrival time and magnitude of airborne fission products from the Fukushima, Japan, reactor incident as measured in Seattle, WA, USA. *J. Environ. Radioact.* 102, 2011, 1032-1038.

- [4] D. Pittauerova et al. Fukushima fallout in Northwest German environmental media. *J. Environ. Radioact.* 102, 2011, 877-880.
- [5] M. Manolopolou, E. Vagena, S. Stoulos, A. Ioannidou, C. Papastefanou. Radioiodine and radiocesium in Thessaloniki, Northern Greece due to the Fukushima nuclear accident. *J. Environ. Radioact.* 102, 2011, 796-797.
- [6] I. Bikit, J. Slivka, D. Mrdja, N. Zikic-Todorovic, S. Curcic, E. Varga, M. Veskovic, Lj. Conkic, Simple Method for Depleted Uranium Determination. *Jpn. J. Appl. Phys.* 42, 2003, 5269-5273.
- [7] H.W. Dickson et al. Environmental Gamma-ray Measurements Using in Situ and Core Sampling Techniques. *Health Phys.* 30, 1976, 221-227.
- [8] <http://www.fjspecialty.com/DFHV-1.html>
- [9] Measurement of Radionuclides in Food and the Environment - Section 5. - Collection and Preparation of Samples, Technical Reports Series No.295, IAEA, Vienna, 1989.
- [10] ASTM C 1402 – 04 Standard Guide for High-Resolution Gamma-Ray Spectrometry, 2004.
- [11] *Zbornik radova IV jugoslovenskog simpozijuma o radiološkoj zaštiti II*, 28-30.maj 1969, Baško Polje.
- [12] Pravilnik o granicama radioaktivne kontaminacije lica, radne i životne sredine i načinu sprovođenja dekontaminacije. Sl. glasnik RS br. 38/2011, 2011.
- [13] Zakon o zaštiti od jonizujućih zračenja i o nuklearnoj sigurnosti. Sl. glasnik RS br. 36/2009 i 93/2012, 2012.



## GENERAL PROBLEMS OF RADIATION PROTECTION; ACCIDENTS

**Dušan MRĐA, Ištvan BIKIT, Sofija FORKAPIĆ, Kristina BIKIT-ŠREDER,  
Nataša TODOROVIĆ and Jovana NIKOLOV**

*University of Novi Sad, Faculty of Sciences, Novi Sad, Serbia,*

*mrdjad@df.uns.ac.rs, bikit@df.uns.ac.rs, sofija@df.uns.ac.rs,*

*kristina.bikit@df.uns.ac.rs, natasa.todorovic@df.uns.ac.rs, jovana.nikolov@df.uns.ac.rs*

### ABSTRACT

Last 30 years the field of radiation protection was marked by two nuclear accidents – Chernobyl 1986 and Fukushima 2011, which consequences had world-wide impact. After these events, the systematic investigations of fission products in soil, food and in Dunav ecosystem in Serbia were performed.

The measured concentrations of  $^{131}\text{I}$  in aerosols, resulted from Fukushima accident, were order of magnitude of  $\text{mBq}\cdot\text{m}^{-3}$ , while  $^{131}\text{I}$  concentrations in rain-water and milk were about  $1\text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ .

The specific problem of radiation protection are different orphan radioactive sources, originated from industry and medicine, which can be embeded within metal scrap contingents. Our previous experience showed that in this situations the radioactive sources of  $^{60}\text{Co}$ , or  $^{152}\text{Eu}$  used within radioactive lightning rods, if inappropriately dismantled and removed, can be accidentally or intentionally mixed with metal scraps. This is the main reason for radiological control, which is performed when metal scrap is transported. The radiological control is based on measurement of dose rate at the surface of bulk of metal scrap. However, the main problem, which appears in radiological control, is the absorption of radiation in metal. The simple method used for the estimation of the minimal detectable activity is described in the paper.

In addition, an important problem in radiation protection in ceramic industry is related to use of different materials with enhanced natural radioactivity, which can lead to the increase of external and internal irradiation of workers.

Parallel with measurements related to accidents and radiation protection, the methods for determination of radionuclides concentration are developed and improved, like those for In-Situ gamma-spectrometry, as well as for depleted uranium determination.

## CHALLENGES IN RADIATION PROTECTION – THE POINT OF VIEW OF A SMALL RADIATION PROTECTION SOCIETY

Ines KRAJCAR BRONIĆ

Ruđer Bošković Institute, Zagreb, Croatia, [krajcar@irb.hr](mailto:krajcar@irb.hr)

### ABSTRACT

*Some challenges in radiation protection from the point of view of a small radiation protection society are presented, although some of them are not specific for the small societies. Future cooperation among regional radiation protection societies should be improved by organizing a joint conference. Participation in IRPA activities improves the visibility of small societies, but is associated with high financial costs. Challenges in radiation protection in medicine, in radioecology, as well as in method and instrumentation development are also discussed. Special focus is put on young generation in the field of radiation protection and radiation science. The challenges discussed here are certainly far from forming a complete list, however, they indicate that the radiation protection is a vivid area where young generation can find its professional accomplishment.*

### 1. Introduction

On the occasion of the 40th anniversary of Croatian Radiation Protection Association (CRPA) during the 12th Symposium of CRPA that was held in Varaždin in April 2019, a special session devoted to “Key challenges in radiation protection” was held [1]. The celebration of the 30th Symposium of the Society for Radiation Protection of Serbia and Montenegro gives the opportunity to review some challenges that we expect to cope with in the radiation protection area from a point of view of small radiation protection (RP) societies, such as our two societies are.

The following key challenges have been recognized[2] and will be discussed below:

- improvement of cooperation among radiation protection societies in the region
- involvement in IRPA activities and task groups
- participation at international and regional IRPA congresses
- higher involvement of young generation into activities of the societies
- better communication with general public and more visible presence in media
- accept and recognize radiation protection culture, especially in medicine, as a part of general safety culture
- monitoring environmental radioactivity and studies of the influence of radioactivity on humans and the environment

### 2. Regional cooperation

Radiation protection is the inter- and multi-disciplinary area that does not recognize political state borders. Therefore, international co-operation and experience exchange represent and should represent in future an important part of activities of our societies. Radiation protection societies from the region of Central and South-Eastern Europe, including our two RP societies, together with the individuals from countries that do not have national RP societies, have a long-term successful cooperation that is visible through various bilateral or multilateral projects, and by exchange of experience and information at the national RP symposia.

The idea of organization of the joint symposium appeared on the occasion of the celebration of the 50th anniversary of the radiation protection in the region, or in the former Yugoslavia. However, it seems that in 2013 the involved societies were not mature enough, and the celebrations were organized separately at the two national symposia. The organization of a joint symposium in 2023 to celebrate the 60th anniversary of RP would be a great challenge for our societies and their leadership.

### 3. Cooperation with IRPA

Regional RP societies are members of the International Radiation Protection Association (IRPA) and are taking part in various IRPA activities. Especially active is the co-operation with other European RP societies, within the group of European IRPA Associate Societies (AS). Regular annual meetings of representatives of the European IRPA AS are held every year in different countries. The 2019 meeting will be held in Zagreb, Croatia, on October 28, with an informal gathering on Sunday, October 27. As usually, the topics will include various issues of interest for individual European RP societies and the IRPA in general, such as election of the new Executive Council members at the General Assembly and organization of future congresses.

Activities of members of small societies in IRPA contribute to international recognition of the societies in Europe and in the world. Although it is not easy to be included on equal footing into various IRPA Task groups, CRPA has representatives in the IRPA Task Group on Non-ionizing Radiation and in the IRPA Task Group on the Impact of the Eye Lens Dose Limits.

Participation of the members of small RP societies at the European and international IRPA congress has become a great challenge during last decades, mostly because of the financial reasons. Namely, the fee for participation at the European and international IRPA congresses is very high, the cities are expensive (including the accommodation), and if the congress is on the other continent the travel expenses are rather high. The trend of increasing congress fees and the total costs of the participation caused a significant decrease of the number of CRPA participants at these congresses leading eventually to no participant at the 5th European Congress in The Hague in 2018. Small European RP societies have often pointed out that such trend could transform the international IRPA congresses into meeting of a few largest and richest societies. We are looking forward to lower fees for the congresses beyond IRPA 2020, including the 6<sup>th</sup> European IRPA Congress to be held in Budapest in 2022 [3]. The Congress will be organized jointly by the Hungarian and the Austrian RP societies, and it can also represent a challenge for the neighbouring RP societies, members of which can be actively engaged in the organization and coordination of specific congress sections.

### 4. Young generation

European RP societies initiated fostering young professionals and scientists in the RP field. Criteria for national selection of candidates were harmonized and adopted by individual societies, and the YSPA award (Young Scientists and Professionals Award) was established. The international competition was held for the first time in Helsinki during the 3rd European IRPA Congress in 2010. CRPA has its representative in 2010, and later on IRPA Congress in Glasgow 2012 and at the 4th European IRPA Congress in Geneva 2014, while for the following congresses (IRPA Congress 2016 in South Africa and 5th European IRPA Congress in The Netherlands 2018) CRPA did not have interested young participants. What can be the reason for such an absence of applications? The CRPA has numerous young members that are active in the Society and also produce valuable publications, so the main reason we have to seek in the financial arrangements. As mentioned earlier, the total costs for the participation are very high. For a young representative of a small RP societies (from not-so-rich countries) the total costs present an insurmountable obstacle, even if the national society gives some financial support. CRPA, together with some other small European RP societies, requested lower fees, or even waiving the fee, for all national representatives in the YSPA competition. The suggestion was partially accepted for the YSPA competitors at the 5<sup>th</sup> European IRPA Congress. However, the decision was made too late to allow new applications for the YSPA competition.

As an argument that there is a considerable number of young persons in the RP field in Croatia, the first independent meeting of the young CRPA members (up to 35 years of age) has to be mentioned [4]. There were 11 participants who held 10 lectures, which were very interesting and professionally prepared and that led to establishment of some new co-operation. It was decided to organize such meetings in 2-year period, i.e., in the years without a national symposium of CRPA, and also that there would be a socializing of the (still informal) young session during the national symposia. At the 12th CRPA Symposium such an event was organized for the first time and the young colleagues from the neighbouring societies were also invited to participate.

„Rejuvenation“ of RP societies is a general problem of IRPA associated societies and is not related exclusively to small societies. Therefore, IRPA takes special care of young RP professionals and radiation scientists by involving them in all activities of IRPA, by organizing a special network within IRPA– the Young Generation Network, by allocating a seat for a young representative in the IRPA Executive Council. CRPA also shares the concerns related to the young generation – how to employ young professionals in the radiation protection field and radiation science areas, how to prevent emigration of educated young generation from Croatia to other countries, how to motivate young people to get involved in the activities of CRPA. To achieve better integration of young persons into the society, CRPA promotes active involvement of young generation into organizing and scientific committees of national symposia, where they can get acquainted with the members of all generations and their activities.

### 5. Public relations

A special challenge in all RP societies is communication and interaction with the public and increased visibility of the society in the media, both classical and new social media. There are often some discussions or opinion in the media that are not supported by the science, but blurred with some prejudices or misunderstandings. In addition, there is a

certain fear of the scientists and/or RP specialists to get involved in such public discussions. A proposal of having a competent spokesman responsible for public relation could be a step forward better communication based on scientific and professional facts. Organization of round tables or public lectures on some special topics, in co-operation with other relevant societies, could also help in generating better public understanding and acceptance.

### **6. Medical application of radiation**

Increased use of ionizing radiation in medical procedures, both in diagnostics and in radiotherapy, make radiation protection in medicine extremely important. Requests by patients for radiological diagnostic procedures have been continuously growing although sometimes such procedures are not medically indicated and justified. Medical doctors are often forced by patients to carry on a number of high-technology diagnostic procedures. However, doctors have to take into account principles of justification and optimization to achieve higher benefits of radiological procedures compared to risks related to the use of ionizing radiation [5]. Radiation protection and especially radiation protection culture should become part of the general safety culture [5,6]. This can be achieved by better education of general practitioners in radiation protection and by raising public understanding of both the benefits and risks related to radiation and its various applications.

### **7. Optimization and natural radiation**

Natural radiation is everywhere around us and it is unavoidable, therefore, the risk (hypothetic or epidemiological) of natural radiation is a natural part of the life [7]. The natural radiation level represents therefore a natural limit for radiation protection, by defining the dose levels below which the radiation protection measures are not reasonable and not justified [7]. Optimization is one of the basic principles for radiation protection, but even optimization has to have (lower) action limit: measures to lower the dose below 0.1 mSv/yr for general population and below 1 mSv/yr for exposed professionals are not considered reasonable in operational radiation protection praxis [7].

### **8. Accidental situations**

Recent history has thought us that nuclear accidents can happen suddenly, without any prior notice. The reasons for accident may be different, from human and technical malfunctions to natural causes or natural catastrophe. Everybody knows about the two most well-known accidents in nuclear power plants in Chernobyl in 1986 and in Fukushima in 2011. Such accidents sometimes cannot be predicted and prevented, so it is of utmost importance to establish a monitoring system for radioactivity in the environment that will alert the responsible authorities on time in case of elevated radioactivity. Laboratories involved in environmental monitoring should develop and continuously improve methods for fast and reliable determination of the radiation level in all environmental compartments (water, air, food, soil, etc.). In addition, a database of natural radioactivity level for various regions should be developed and continuous monitoring should be performed. Such preparation represents a specific challenge for radioanalytical laboratories all over the world, both in terms of finances and human work load.

### 9. Conclusion

The list of recognized challenges, although relatively comprehensive, is certainly not a complete list of future challenges to radiation protection. The recognized challenges prove that the radiation protection is a very vivid area that opens various opportunities to different scientists and professionals, including the young generation, for their professional accomplishment.

### 10. References

- [1] *Zbornik 12. simpozija Hrvatskog društva za zaštitu od zračenja (Proceedings of the 12th Symposium of the Croatian Radiation Protection Association)*. J. Popić, I. Coha, I. Krajcar Bronić, Ž. Knežević Medija, eds. HDZZ/CRPA, 2019. available at <http://www.hdzz.hr/hdzz12/radovi/zbornik-radova/>.
- [2] I. Krajcar Bronić, M. Ranogajec-Komor, S. Miljanić, Ž. Knežević. Prvih 40 godina Hrvatskog društva za zaštitu od zračenja i izazovi budućnosti (The first 40 years of the Croatian Radiation Protection Association and future challenges). In: J. Popić, I. Coha, I. Krajcar Bronić, Ž. Knežević Medija, eds. *Proceedings of the 12<sup>th</sup> Symposium of the Croatian Radiation Protection Association*, Varaždin, Croatia, April 10 – 12, 2019. Publisher: HDZZ/CRPA, 2019, 47-52.
- [3] <https://irpa2022.akcongress.com/>.
- [4] <http://www.hdzz.hr/blog/1-skup-sekcije-mladih-hrvatskog-drustva-za-zastitu-od-zracenja/>.
- [5] J. Popić, M. Slavica, I. Kralik. Moderni izazovi u opravdanosti radioloških snimanja. In: J. Popić, I. Coha, I. Krajcar Bronić, Ž. Knežević Medija, eds. *Proceedings of the 12<sup>th</sup> Symposium of the Croatian Radiation Protection Association*, Varaždin, Croatia, April 10 – 12, 2019. Publisher: HDZZ/CRPA, 2019, 53-56.
- [6] J. Popić Ramač, I. Kralik, Ž. Knežević. Kultura zaštite od zračenja u medicini. In: V. Radolić, M. Poje Sovilj, I. Krajcar Bronić, eds. *Proceedings of the 11<sup>th</sup> Symposium of the Croatian Radiation Protection Association*, Osijek, Croatia, April 5 – 7, 2017. Publisher: HDZZ/CRPA, 2017, 15-26.
- [7] R. Michel, B. Lorenz, H. Völkle. Radiation protection today – success, problems, recommendation for the future. Statement paper of the “Club of the Philosophers” of the German-Swiss Association for Radiation Protection. 2018. [https://fs-ev.org/fileadmin/user\\_upload/09\\_Themen/Philosophen/Future\\_of\\_Radiation\\_Protection\\_20180921.pdf](https://fs-ev.org/fileadmin/user_upload/09_Themen/Philosophen/Future_of_Radiation_Protection_20180921.pdf).

### **IZAZOVI U ZAŠTITI OD ZRAČENJA – POGLED IZ PERSPEKTIVE MALOG DRUŠTVA ZA ZAŠTITU OD ZRAČENJA**

**Ines KRAJCAR BRONIĆ**

*Institut Ruđer Bošković, Zagreb, Hrvatska, [krajcar@irb.hr](mailto:krajcar@irb.hr)*

#### **SADRŽAJ**

U radu su prikazani neki izazovi budućnosti za područje zaštite od zračenja iz perspektive malog društva za zaštitu od zračenja, iako neki od njih nisu specifični samo za mala društva. Iako i dosad postoji dobra suradnja među malim društvima za zaštitu od zračenja u regiji, u budućnosti bi bilo dobro podignuti razinu suradnje organizacijom zajedničkog skupa povodom obilježavanja 60. obljetnice zaštite od zračenja u regiji 2023. godine. Sudjelovanje u aktivnosti IRPA-e, uključujući i sudjelovanje na kongresima, podiže ugled malih društava, ali je povezano s visokim financijskim troškovima. Spomenuti su najvažniji izazovi u zaštiti od zračenja u medicini, u radioekologiji i u razvoju metoda monitoringa. Posebna je pažnja posvećena mladoj generaciji u području zaštite od zračenja i znanosti o zračenju. Navedeni izazovi koji stoje pred područjem zaštite od zračenja zasigurno ne predstavljaju potpuni spisak svih mogućih izazova u budućnosti. Navedeni izazovi ukazuju da je područje zaštite od zračenja vrlo „živo“ i da pruža mogućnosti brojnim pojedincima da u njemu nađu svoj profesionalni interes.





**РАДИОЕКОЛОГИЈА И ИЗЛАГАЊЕ  
СТАНОВНИШТВА**



Pregledni rad-predavanje po pozivu

**RADIOEKOLOGIJA I IZLAGANJE STANOVNIŠTVA –  
PRVIH 55 GODINA**

**Dragana J. TODORVIĆ<sup>1</sup>, Ivana S. VUKANAC<sup>1</sup>, Gordana K. PANTELIĆ<sup>1</sup>,  
Sofija FORKAPIĆ<sup>2</sup>, Branislava M. MITROVIĆ<sup>3</sup>, Jovana S. ILIĆ<sup>4</sup>,  
Marija M. JANKOVIĆ<sup>1</sup>, Jelena D. KRNETA NIKOLIĆ<sup>1</sup>, Milica M. RAJAČIĆ<sup>1</sup>,  
Nataša B. SARAP<sup>1</sup> i Mirjana B. RADENKOVIĆ<sup>1</sup>**

- 1) *Univerzitet u Beogradu, Institut za nuklearne nauke "Vinča", Laboratorija za zaštitu od zračenja i zaštitu životne sredine, Mike Petrovića Alasa 12-14, 11001 Beograd, Srbija, [beba@vinca.rs](mailto:beba@vinca.rs), [vukanac@vinca.rs](mailto:vukanac@vinca.rs), [pantelic@vinca.rs](mailto:pantelic@vinca.rs), [marijam@vinca.rs](mailto:marijam@vinca.rs), [jnikolic@vinca.rs](mailto:jnikolic@vinca.rs), [milica100@vinca.rs](mailto:milica100@vinca.rs), [natasas@vinca.rs](mailto:natasas@vinca.rs), [mirar@vinca.rs](mailto:mirar@vinca.rs)*
- 2) *Prirodno matematički fakultet Univerziteta u Novom Sadu, Departman za fiziku, Trg Dositeja Obradovića 1, 21000 Novi Sad, Srbija, [sofija@df.uns.ac.rs](mailto:sofija@df.uns.ac.rs)*
- 3) *Univerzitet u Beogradu, Fakultet Veterinarske medicine, Katedra za radiologiju i radijacionu higijenu, Bulevar Oslobođenja 18, 11000 Beograd, Srbija, [radijacija@vet.bg.ac.rs](mailto:radijacija@vet.bg.ac.rs),*
- 4) *Institut za medicinu rada Srbije, "Dr Dragomir Karajović", Centar za radiološku zaštitu, Laboratorija za ispitivanje radioaktivnosti, Deligradska 29, 11000 Beograd, Srbija, [jovana.ilic@institutkarajovic.rs](mailto:jovana.ilic@institutkarajovic.rs)*

**SADRŽAJ**

*U ovom radu dat je pregled radova prezentovanih u oblasti Radioekologije i izlaganja stanovništva na skupovima Društva za zaštitu od zračenja, počev od I jugoslovenskog simpozijuma o radiološkoj zaštiti u Portorožu 1963. godine i zaključno sa XXIX Simpozijumom Društva za zaštitu od zračenja Srbije i Crne Gore održanom na Srebrnom jezeru 2017. godine. U radu je dat pregled aktuelnih tema, osvrt na razvoj metoda i tehnika merenja, kao i opšti trendovi razvoja i diferenciranja oblasti radioekologije uslovljenih događanjima u obuhvaćenom vremenskom periodu.*

**1. Uvod**

Davne 1963. godine, u Portorožu, 11. oktobra, za vreme održavanja I Jugoslovenskog simpozijuma o radiološkoj zaštiti, osnovano je Jugoslovensko društvo za zaštitu od zračenja. Na samoj osnivačkoj skupštini izabrana je privremena uprava, a nekoliko dana kasnije 23. oktobra iste godine, privremena uprava izabrala je Izvršni odbor društva. Organizatori I Jugoslovenskog simpozijuma o radiološkoj zaštiti bili su: Uprava za civilnu zaštitu DSNO uz saradnju Jugoslovenske akademije nauke i umetnosti, Slovenske akademije znanosti i umjetnosti, Srpske akademije nauka i Savezne komisije za nuklearnu energiju.

Od početka svog rada do današnjih dana, održano je 29. simpozijuma, na kojima je prezentovano 2893 rada, a takođe organizovano je i 7 tematskih savetovanja, sa 140 publikovanih radova. Na slici 1, dat je prikaz broja radova po održanim simpozijumima.

Problematicom koja je vezana za zaštitu od zračenja, u početku, bavile su se institucije koje su bile vezane za medicinska istraživanja: Institut za medicinska istraživanja i medicinu rada, Zagreb, Institut za medicinu rada SRS Beograd, Institut za higijenu i socijalnu medicinu Medicinskog fakulteta Sarajevo, kao i prvi naučni Instituti i zavodi u tadašnjoj Jugoslaviji: Institut "Jože Štefan", Ljubljana, Institut za nuklearne nauke "Boris Kidrič", Beograd, Institut za primenu nuklearne energije u poljoprivredi, veterini i šumarstvu, Beograd, Zavod za zdravstveno i tehničko varnost, Ljubljana. Mnoge od navedenih institucija, vremenom menjaju svoju organizaciju kao i imena, ali aktivno učestvuju u radu društva na svim simpozijumima. Takođe, kasnijih godina, osnivaju se nove institucije, koje se uključuju u problematiku koja je vezana za zaštitu od zračenja, tako da je od svog osnivanja pa do današnjih dana, preko 40 institucija učestvovalo u radu društva [1].

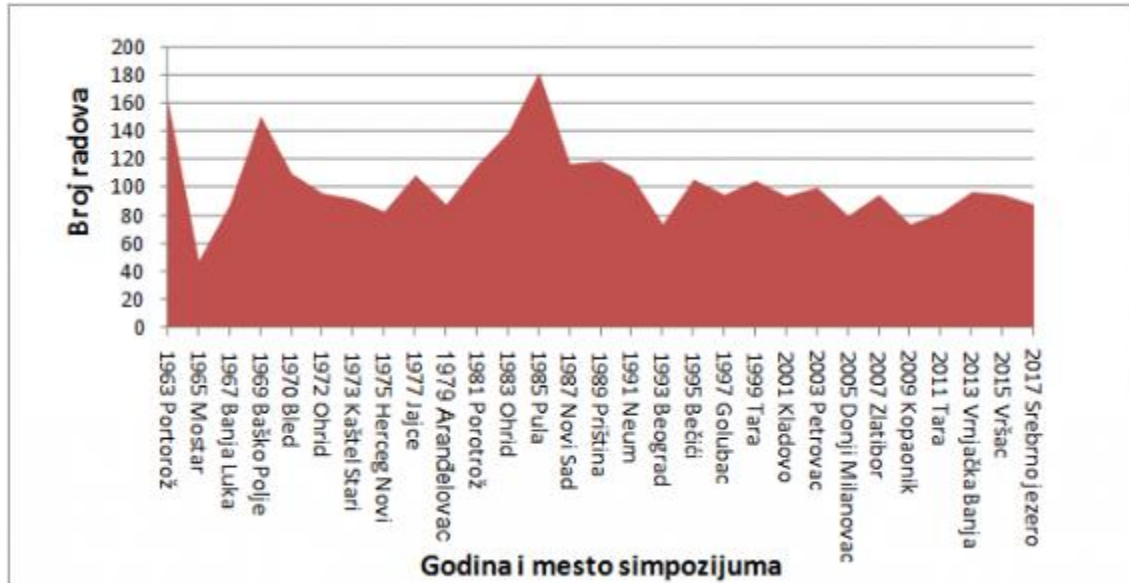
1970. godine na Bledu, održan je V simpozijum u organizaciji Jugoslovenskog društva za radiološku zaštitu (JDRZ) [2], a već naredni VI simpozijum u Ohridu, 1972. godine, održan je u organizaciji Jugoslovenskog društva za zaštitu od zračenja (JDZZ) [3]. Od 2007. godine, Jugoslovensko društvo za zaštitu od zračenja (JDZZ), menja ime u Društvo za zaštitu od zračenja Srbije i Crne Gore (DZZSCG).

Na prvim simpozijumima Društva (1963. godine, Portorož), problematika radioekologije nije bila značajno zastupljena, odnosno samo 13% radova (ukupno 22 rada), odnosilo se na datu problematiku i bili su usmereni na metodologije merenja fisionih radionuklida ( $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{131}\text{I}$ ) u aerosolima, padavinama, hrani, biološkom materijalu, mleku, kao i na merenju ukupne beta aktivnosti. S obzirom na to da je prva nuklearna eksplozija izvršena 16. jula 1945. god. u blizini grada Almgorodo, država New Mexico, SAD, u eksperimentalne svrhe i da je sve do 1980. godine (potpisivanje moratorijuma) u severnoj hemisferi izvršeno 352 eksplozije od ukupno 809, logično je da je predmet ispitivanja u oblasti radioekologije u ovom periodu bio vezan za merenje fisionih radionuklida u životnoj sredini.

Od VIII Simpozijuma JDZZ (1975. godina, Herceg Novi [4]) radioekologija, postaje značajna oblast ispitivanja u zaštiti od zračenja, tako da se na XXVI Simpozijumu JDZZ (2011. godina Tara [5]) 32,4% radova odnosilo na navedenu problematiku. Na savetovanju u Budvi, 1996. godine, sa temom "10 godina od Černobilja", 50% radova je bilo iz oblasti radioekologije [6], a u zborniku radova "30 godina od Černobilja", 2016. godine [14], 95% radova bilo je iz oblasti radioekologije.

Od devedesetih godina prošlog veka, sve veći broj radova u oblasti radioekologije, odnosio se na izučavanje prirodnih izvora zračenja. Kako 3/4 godišnje efektivne ekvivalentne doze koju stanovništvo prima potiče iz prirodnih izvora zračenja, JDZZ, ovom problemu posvećuje više pažnje, tako da u 1986. godini, organizuje, savetovanje sa temom: "Izlaganje zračenju iz prirodne sredine i procena odgovarajućeg radijacionog rizika" [7], a 1995. godine, objavljuje monografiju "Jonizujuća zračenja iz prirode" [11].

Zadnjih godina, pored navedenih oblasti, jedna od tema radioekologije je i tehnološki povišena prirodna radioaktivnost (u početku TENORM, a zatim NORM), koja je posledica primene materijala sa povišenim sadržajem prirodnih radionuklida u industriji.



Slika 1. Broj radova na simpozijumima društva za zaštitu od zračenja od 1963. do 2017. Godine.

Ukoliko pogledamo sve radove na svim simpozijumima Društva, uočava se da se na saopštenjima, koja su bila na prvim simpozijumima, nisu navodile detaljno karakteristike instrumentacije, koja se koristila za merenje, i da se do rezultata često dolazilo, korišćenjem matematičkih prepostavki. Razvoj instrumentacije, kao i računarske tehnologije, uticao je, da se u saopštenjima na simpozijumima, od osamdesetih godina prošlog veka, pa nadalje, koriste i matematički modeli kao i detaljniji statistički proračuni i analize i kvalitetniji grafički prikazi.

## 2. Monitoring / sistematsko merenje aktivnosti uzoraka iz životne sredine

Od prvog simpozijuma Društva, 1963. godine, u Portorožu, jedan manji broj radova bio je usmeren u pravcu merenja ukupne beta aktivnosti padavina, slobodno nataložene prašine, pijaće vode, dunavske vode, zemlje, rastinja, u Srbiji, Bosni i Hercegovini, Sloveniji, u periodu od 1959. do 1963. godine. Ovo su bili prvi počeci monitoringa na prostorima bivše Jugoslavije. Međutim, veći deo radova na ovom Simpozijumu, odnosio se na ispitivanje proizvedenog radionuklida  $^{90}\text{Sr}$  u lancu ishrane, ukoliko posmatramo oblast radioekologije.

Nastavak objavljivanja radova u oblasti radioekologije, koji se odnose na problematiku monitoringa radioaktivnosti, uočavamo na IV Simpozijumu, 1969. godine, Baško Polje (ukupna beta aktivnost u aerosolima, 1962-1968. godina;  $^{137}\text{Cs}$  u padavinama i životinjskim kostima 1955-1968. godina;  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{40}\text{K}$ , ukupna beta u rastinju 1962-1967. godina) [8].

Na sledećem V Simpozijumu (1970. godina, Bled [2]), dat je prvi pregledni rad pod naslovom "Prvi bilans radioaktivne kontaminacije teritorije SFRJ sa fisionim produktima u periodu od 1962 do 1969. godine", autora R. Radovanovića i R. Feliksa, koji predstavlja prve rezultate monitoringa na prostorima tadašnje SFRJ. Takođe na istom Simpozijumu, dati su u rezultati merenja jačine ekspozicione doze prirodnog zračenja u gradovima u SFRJ, odnosno prvi dozimetrijski monitoring. Kasnijih godina, a naročito nakon akcidenta na nuklearnom postrojenju u Černobilju, broj radova u oblasti

monitoringa se povećava, i odnosi se na merenje radioaktivnosti: aerosola, padavina, ukupnog depozita, hrane za ljude i životinje (mleko i mlečni proizvodi, pečurke, voće, povrće) i zemljišta.

Institut "Vinča", od svog osnivanja uvodi monitoring radioaktivnosti, odnosno vrši sistematsko ispitivanje radioaktivnosti u okolini istraživačkog nuklearnog reaktora RA, eksperimentalnog reaktora nulte snage RB i hangar za skladištenje radioaktivnog otpada. Rezultati datih ispitivanja publikovani su na mnogim simpozijumima Društva [6, 7, 14].

Nakon formiranja Javnog preduzeća "Nuklearni objekti Srbije" (JP NOS), dati monitoring radioaktivnosti u životnoj sredini, nastavlja da obavlja navedena institucija, s obzirom na to da su navedeni objekti povereni na upravljanje Javnom preduzeću "Nuklearni objekti Srbije". Na XXIX Simpozijumu Društva, prikazani su rezultati dvogodišnje kontrole (2014. - 2016. godina) monitoringa radioaktivnosti u okolini nuklearnih objekata, koji su obuhvatili ispitivanje aerosola, padavina, površinskih voda, rečnog sedimenta, zemljišta i hrane [16]. Monitoring u okolini termoelektrana, posebna je problematika u oblasti radioekologije, i odnosi se na godišnju kontrolu radioaktivnosti radne i životne sredine termoelektrana. Rezultati ovih ispitivanja, počeli su da se publikuju od VI Simpozijuma, Ohrid, 1972. godine [3], "Jačina ekspozicione doze u rudnicima i klimatskim lečilištima na teritoriji Republike Makedonije", a zatim je nastavljeno sa publikovanjem i na sledećim simpozijumima: XV Simpozijum, 1989. godina, Priština [9], "Prirodni radionuklidi u šljakama i pepelima u termoelektranama na ugljen", Hrvatska, "Sadržaj prirodnih radionuklida u uzorcima uglja sa termoelektrana u Bosni i Hercegovini"; XXI Simpozijum, 2001. godine, Kladovo [10], "Radioaktivnost površinskih i otpadnih voda u okolini termoelektrana u periodu od 1990-2000. godine", Srbija, i tematskim zbornicima radova: Jonizujuća zračenja iz prirode, 1995. godine [11], "Radioaktivnost uglja, pepela i šljake, termoelektrane Nikola Tesla", Obrenovac, Srbija.

Jedan broj radova se odnosio na određivanje efektivne ekvivalentne doze, i proračun radijacionog opterećenja stanovništva: 1) XVI Simpozijum, 1991. godina, Neum [12], "Interna kontaminacija  $^{137}\text{Cs}$  putem ishrane za stanovništvo Srbije u periodu 1986-1990. godina" 2) XXI Simpozijum, 2001. godina, Kladovo, [10], "Kontaminacija jestivih gljiva  $^{137}\text{Cs}$ , moguće radijaciono opterećenje stanovništva", teritorija Srbije i Crne Gore i drugi radovi.

Detaljnije o samom monitoringu radioaktivnosti u životnoj sredini u Srbiji, načinu uzorkovanja, metodama merenja i proceni efektivne doze koja potiče od unosa  $^{137}\text{Cs}$  i  $^{90}\text{Sr}$  ingestijom prikazano je na XXIII simpozijumu [15].

### 3. Radionuklidi/metode merenja

Radioekologija, je obuhvatila praćenje distribucije u početku fisionih, a kasnije i prirodnih radionuklida u životnoj sredini. Fisioni radionuklidi su praćeni u svim uzorcima iz životne sredine, odnosno u celom lancu ishrane: vazduh, padavine, ukupni depozit – zemljište – vodeni tokovi (podzemne i površinske vode, rečni i morski tokovi, vode za piće) – hrana namenjena ljudskoj i životinjskoj ishrani (voće, povrće, meso, mleko i mlečni proizvodi, čajevi, pečurke). Na svim Simpozijumima JDZZ, glavna problematika u okviru radioekologije, bila je praćenje distribucije fisionih radionuklida u lancu ishrane i to na svim prostorima tadašnje SFRJ.

Ako posmatramo prirodne radionuklide, prvi rad u kome su dati rezultati merenja radioaktivnosti ovih radionuklida u hrani, objavljen je na III Simpozijumu, 1967. godine, Banja Luka, "Određivanje prirodnih radionuklida u hrani" [13].

Na XX Simpozijumu, 1999. godine Tara, pored fisijonih radionuklida, počinje se i sa merenjem uranijuma u uzorcima zemljišta, kako bi se ocenio uticaj korišćenje municije sa osiromašenim uranijumom na prostorima Srbije tokom 1999. godine [5].

Metode koje su se koristile za detekciju radionuklida bile su mnogobrojne, navedimo samo neke: merenje ukupne alfa i beta aktivnosti, spektrometrija gama, alfa i beta emitera, određivanje sadržaja  $^3\text{H}$  (sa i bez elektrolitičkog obogaćenja), merenje jačine ambijentalne doze gama zračenja u vazduhu, nuklearna aktivaciona analiza, atomska absorpcija, radiohemijske separacije, ekstrakcione metode sa TBF, radiometrijska metoda sa elektrodepozicijom uzoraka, merenje površinske kontaminacije, rendgenska difrakciona analiza, hromatografska, fluorometrijska, merenja Čerenkovljevim zračenjem beta emitera, plamena spektrofotometrija i druge.

Tokom prvih deset Simpozijuma JDZZ, velika pažnja se poklanjala, razvoju metoda za detekciju radionuklida, posebno  $^{90}\text{Sr}$  u uzorcima aerosola, vode, hrane, zemljišta, biološkom materijalu. To su bili sami počeci istraživanja u oblasti radioaktivnosti, koja su se odnosila kako na distribuciju radionuklida, tako i na metode detekcije.

Takođe od samog početka pa do danas, koristi se različita instrumentacija, koja je bila najsavremenija u datom periodu, kao što su: proporcionalni brojači, beta brojači TRACERLAB, alfa i gama spektrometri (Ge (Li), HPGe, NaI, PIPS), in situ gama spektrometar BEGe Falcon 5000 sa električnim hlađenjem, plastični scintilatori, tečni scintilacioni detektori, (TRI CARB), scintilacioni detektori ZnS(Ag), X spektrometri, ručni monitori zračenja sa NaI, halogeni GM brojač sa antikoincidentalnom spregom, antikoincidentni brojači za niske aktivnosti LARA-5, LOLA, prenosni merači kontaminacije RMK-10P, KOMO-TL, KOMO-TM, spektrofotometri Perkin Elmer i drugi.

Primena savremenijih metoda merenja kao i uvođenje sistema kvaliteta u mnogim institucijama, zahtevala je da se učestvovanje u interkomparacijama. Na II savetovanju "Izlaganje zračenju iz prirodne sredine i procena odgovarajućeg radijacionog rizika", koje je održano 1986. godine u Kragujevcu, dati su rezultati Prve interkomparacije jugoslovenskih gama spektrometara, koja je organizovana od strane Saveznog komiteta za rad, zdravstvo i socijalnu politiku [7]. I na ostalim, kasnijim Simpozijumima JDZZ, saopštavani su rezultati učestvovanja u narednim interkomparacijama, a takođe počinje sve više da se posvećuje pažnja kontroli kvaliteta u akreditovanim laboratorijama.

#### 4. Akcidenti

Prvi akcident koji se dogodio 15. oktobra 1958. godine, na našim prostorima bio je na nuklearnom reaktoru RB u Vinči. Međutim na prvom Simpozijumu JDZZ, 1963. godine u Portorožu nije bilo radova posvećenih datom akcidentu, kao ni na sledećim simpozijumima. Sve do akcidenta na nuklearnom postrojenju u Černobilju, radovi iz radioekologije, odnosili su se na posledice nuklearnih testova u životnoj sredini i to uglavnom na distribuciju dugoživećih radionuklida u životnoj sredini.

Nakon 1986. godine, na Simpozijumima JDZZ, većina radova se odnosi na određivanje radioloških posledica datog akcidenta, na području bivše Jugoslavije. Takođe tri tematska zbornika posvećena su datoj problematici, 1986. godina, II savetovanje Kragujevac "Izlaganje zračenju iz prirodne sredine i procena odgovarajućeg radijacionog rizika" [7]; 1996. godina, "10 godina od Černobilja" Budva [6]; 2016. godina



Beograd, " Černobilj 30 godina posle " [14]. U okviru publikacije " Černobilj 30 godina posle ", dati su pregledni radovi, koji su se odnosili na radioaktivnost u životnoj sredini: pre, za vreme akcidenta i nakon akcidenta u Černobilju, odnosno period od 1985. godine pa nadalje. Prikazani su rezultati sistematskih kontrola radioaktivnosti aerosola, padavina, zemljišta, hrane u Republici Srbiji i u Crnoj Gori. Takođe posebno su razmatrani akcidenti i posledice akcidenta na životnu sredinu. I nakon 30 godina od Černobilja, u uzorcima iz životne sredine, mogu se detektovati  $^{137}\text{Cs}$  i  $^{90}\text{Sr}$ , tako da je očigledno da će ova dva radionuklida, biti predmet ispitivanja i narednih godina.

Akcident koji se dogodio u Fukušimi, 2011. godine, bio je aktuelan samo na XXVI Simpozijumu, 2011. godine, Tara, sa ukupno 4 rada. Kontaminacija biosfere nakon akcidenta, bila je mnogo manjih razmera, odnosno fisioni radionuklidi  $^{131}\text{I}$ ,  $^{134}\text{Cs}$  i  $^{137}\text{Cs}$ , mogli su da se detektuju na našim prostorima samo u periodu od kraja marta do sredine aprila meseca. Predmet ispitivanja su bili aerosoli, mleko, hrana za ljude i životinje [5].

### 5. Zaključak

Prvih 55 godina, radioekologije, možemo podeliti u tri perioda, u zavisnosti od problematike koja je bila zastupljena. Prvi period je vreme intezivnih nuklearnih eksplozija, drugi period je vezan za akcident na nuklearnom postrojenju u Černobilju, i treći period možemo nazvati posle – černobiljskog akcidenta. Ako pogledamo atmosferu, kao deo životne sredine, preko koje se najlakše širi kontaminacija, koncentracija  $^{137}\text{Cs}$  u atmosferi u periodu intezivnih nuklearnih eksplozija, bila je reda veličine  $10^{-4} \text{ Bq/m}^3$ , u periodu pre akcidenta u Černobilju, reda veličine od  $10^{-6}$  do  $10^{-5} \text{ Bq/m}^3$ , u periodu samog akcidenta, maj 1986. godine reda veličine  $10^{-1} \text{ Bq/m}^3$ , a i danas je reda veličine od  $10^{-7}$  do  $10^{-6} \text{ Bq/m}^3$ . Očigledan je trend opadanja radioaktivnosti u atmosferi, a takođe se dati trend primećuje i u drugim medijumima u životnoj sredini, tako da je npr. aktivnost  $^{137}\text{Cs}$  u vodenim tokovima, danas ispod minimalne granice detekcije, kao i u mnogim uzorcima hrane, osim pečuraka i bobičastog voća.

Razvoj instrumentacije značajno je doprineo, smanjivanju minimalne granice detekcije, a takođe, prisutan je i trend razvoja novih metoda detekcije, pomoću kojih se mogu meriti niske koncentracije radionuklida u životnoj sredini.

Nadajmo se da u budućnosti, u novom periodu od 55 godina, neće biti akcidenta velikih razmera, i da će oblast istraživanja u radioekologiji, biti usmerena na problematiku vezanu za prirodne radionuklide.

Primetan je porast broja radova koji se odnosi na problematiku NORM, i s obzirom na to da je neizbežan razvoj industrije, očigledno je da će biti sve više ispitivanja koja se odnose na upotrebu materijala sa povišenim sadržajem prirodnih radionuklida, kao i ispitivanja radioaktivnosti otpadnih materijala.

### 6. Zahvalnica

Rad je finasiran sredstvima Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije (projekat III 43009, TR31003, III 43002).

### 7. Literatura

- [1] *Kratki sadržaj sopćenja, I Jugoslovenski simpozijum o radiološkoj zaštiti*, 8–12. oktobar 1972, Portorož, 1972.



- [2] *Radovi V jugoslovenskog simpozijuma o radiološkoj zaštiti*, 6–9. oktobar 1970, Bled, 1970.
- [3] *Radovi VI jugoslovenskog simpozijuma – Zaštita od jonizujućih zračenja*, 25–28. april 1972, Ohrid, 1972.
- [4] *Zbornik radova VIII simpozijuma Jugoslovenskog društva za zaštitu od zračenja*, 20–23. maj 1975, Herceg Novi, 1975.
- [5] *Zbornik radova XXVI simpozijuma DZZ SCG*, 12 – 14 oktobar 2011, Tara, 2011.
- [6] *Zbornik radova savetovanja "Černobilj 10 godina posle"*, 4 –7. jun 1996, Budva, 1996.
- [7] *Zbornik radova II savetovanja "Izlaganje zračenju iz prirodne sredine i procena odgovarajućeg radijacionog rizika"*, 6 – 8 oktobar 1986, Kragujevac, 1986.
- [8] *Zbornik radova IV jugoslovenskog simpozijuma o radiološkoj zaštiti*, 28–30. maj 1969, Baško Polje.
- [9] *Zbornik radova XV jugoslovenski simpozijum za zaštitu od zračenja*, 6–9. juni 1989, Priština, 1989.
- [10] *Zbornik radova XXI simpozijuma JDZZ*, 10–12. oktobar 2001, Kladovo, 2001.
- [11] *Monografija "Jonizujuća zračenja iz prirode"*, Beograd, 1995.
- [12] *Zbornik radova XVI jugoslovenski simpozijum za zaštitu od zračenja*, 28–31. maj 1991, Neum, 1991.
- [13] *Merenja i instrumentacija u zaštiti od jonizujućeg zračenja, Zbornik materijala III jugoslovenskog simpozijuma o radiološkoj zaštiti*, 23-26. oktobar 1967, Banja Luka, 1967.
- [14] *Monografija "Černobilj 30 godina posle"*, Beograd, 2016.
- [15] *Zbornik radova XXIII simpozijuma DZZ SCG*, 26–28. septembar 2005, Donji Milanovac, 2005.
- [16] *Zbornik radova XXIX simpozijuma DZZ SCG*, 27–29. septembar 2017, Srebrno jezero, 2017.

## RADIOECOLOGY AND POPULATION EXPOSURE TO IONIZING RADIATION - THE FIRST 55 YEARS

**Dragana J. TODORVIĆ<sup>1</sup>, Ivana S. VUKANAC<sup>1</sup>, Gordana K. PANTELIC<sup>1</sup>, Sofija FORKAPIĆ<sup>2</sup>, Branislava M. MITROVIĆ<sup>3</sup>, Jovana S. ILIĆ<sup>4</sup>, Marija M. JANKOVIĆ<sup>1</sup>, Jelena D. KRNETA NIKOLIĆ<sup>1</sup>, Milica M. RAJAČIĆ<sup>1</sup>, Nataša B. SARAP<sup>1</sup> and Mirjana B. RADENKOVIĆ<sup>1</sup>**

- 1) *University of Belgrade, Vinča Institute of Nuclear Sciences, Department of Radiation Protection and Environmental Monitoring, Belgrade, Serbia, [beba@vinca.rs](mailto:beba@vinca.rs), [vukanac@vinca.rs](mailto:vukanac@vinca.rs), [pantelic@vinca.rs](mailto:pantelic@vinca.rs), [marijam@vinca.rs](mailto:marijam@vinca.rs), [jnikolic@vinca.rs](mailto:jnikolic@vinca.rs), [milical100@vinca.rs](mailto:milical100@vinca.rs), [natasas@vinca.rs](mailto:natasas@vinca.rs), [mirar@vinca.rs](mailto:mirar@vinca.rs)*
- 2) *University of Novi Sad, Faculty of Sciences, Department of Physics, Trg Dositeja Obradovića 1, 21000 Novi Sad, Serbia, [sofija@df.uns.ac.rs](mailto:sofija@df.uns.ac.rs)*
- 3) *University of Belgrade, Faculty of Veterinary Medicine, Department of radiology and Radiation hygiene, Bulevar Oslobođenja 18, 11000 Belgrade, Serbia, [radijacija@vet.bg.ac.rs](mailto:radijacija@vet.bg.ac.rs)*
- 4) *Serbian Institute of Occupational Health “Dr Dragomir Karajovic”, Radiation Protection Center, Laboratory for radioactivity testing, Deligradska 29, 11000 Belgrade, Serbia, [jovana.ilic@institutkarajovic.rs](mailto:jovana.ilic@institutkarajovic.rs)*

### ABSTRACT

This paper gives an overview of the papers in the field of radioecology and population exposure to ionizing radiation presented at the Radiation Protection Association symposia starting with the 1<sup>st</sup> Yugoslav Radiation Protection Association symposium held in Portorož in 1963 and concluding with the 29<sup>th</sup> symposium of the Society for Radiation Protection of Serbia and Montenegro held at Srebrno jezero in 2017. An overview of current topics, methods and measurement techniques development review, as well as general trends in the development and differentiation of the radioecology field due to different events in the covered period are presented.

## PETNAESTOGODIŠNJI TRENDОВИ SPECIFIČNE AKTIVNOSTI BERILIJUMA-7 U VAZDUHU U EVROPI

Jelena AJTIĆ<sup>1</sup>, Erika BRATTICH<sup>2</sup>, Miguel Angel HERNÁNDEZ CEBALLOS<sup>3</sup>  
i Vladimir DJURDJEVIĆ<sup>4</sup>

- 1) Univerzitet u Beogradu, Fakultet veterinarske medicine, Beograd, Srbija, [jelena.ajtic@vet.bg.ac.rs](mailto:jelena.ajtic@vet.bg.ac.rs)
- 2) Alma Mater Studiorum University of Bologna, Department of Physics and Astronomy, Bolonja, Italija, [erika.brattich@unibo.it](mailto:erika.brattich@unibo.it)
- 3) European Commission, Joint Research Centre, Ispra, Italija, [miguel-angel.hernandez-ceballos@ec.europa.eu](mailto:miguel-angel.hernandez-ceballos@ec.europa.eu)
- 4) Univerzitet u Beogradu, Fizički fakultet, Beograd, Srbija, [vdj@ff.bg.ac.rs](mailto:vdj@ff.bg.ac.rs)

### SADRŽAJ

Među najbitnije faktore koji utiču na specifičnu aktivnost berilijuma-7 u prizemnom sloju atmosfere spadaju temperatura i količina padavina. U ovom radu stoga razmatramo njihove vremenske trendove između 2000. i 2014. godine, na šest lokacija u Evropi: Madrid i Bilbao (Španija) na jugu; Beč (Austrija) i Luksemburg (Luksemburg) u centralnoj oblasti; kao i Riso (Danska) i Ivalo (Finska) na severu kontinenta. Podaci za specifičnu aktivnost berilijuma-7 preuzeti su iz Radioactivity Environmental Monitoring data bank (REMdb), a podaci za lokalnu temperaturu i količinu padavina iz E-OBS gridovane klimatologije (verzija 15) i potom bilinearnom interpolacijom ekstrahovani na šest lokacija uzorkovanja berilijuma-7. Za dobijanje trendova koristili smo sezonski Kendalov test, u kome se za svaki mesec tokom godine prvo primeni Man-Kendalov trend test, a potom se rezultati kombinuju. Statistički značajni ( $p < 0,05$ ) pozitivni trendovi specifične aktivnosti berilijuma-7 dobijeni su za četiri lokacije: Madrid ( $8,71 \cdot 10^{-5}$  Bq·m<sup>-3</sup>/god), Bilbao ( $3,13 \cdot 10^{-5}$  Bq·m<sup>-3</sup>/god), Luksemburg ( $4,00 \cdot 10^{-5}$  Bq·m<sup>-3</sup>/god), i Ivalo ( $1,91 \cdot 10^{-5}$  Bq·m<sup>-3</sup>/god), a statistički značajan pozitivan trend temperature detektovan je samo za Madrid. Naša analiza ukazuje na povećanje koncentracije berilijuma-7 u Evropi tokom 2000–2014, sa izraženijim trendom na jugu nego na severu. Međutim, kako dobijeni trendovi za temperaturu i količinu padavina uglavnom nisu statistički značajni, nije moguće razmotriti njihovu međusobnu povezanost. U budućim analizama ovog problema stoga treba uzeti u obzir duže vremenske nizove ovih promenljivih.

### 1. Uvod

Berilijum-7 (<sup>7</sup>Be) je jedan od radionuklida (period poluraspada 53,28 dana) čija se specifična aktivnost u prizemnom sloju vazduha prati u sklopu programa monitoringa radioaktivnosti u životnoj sredini u mnogim zemljama. Njegova detekcija relativno je lak proces, jer se odmah posle formiranja vezuje za aerosole [1] i, kao gama emiter, može se identifikovati standardnom gama spektrometrijom u uzorcima aerosola. Dalje, kao prirodni radionuklid koji se stvara u reakcijama kosmičkog zračenja i lakih elemenata u stratosferi (oko 70%) i višim slojevima troposfere (oko 30%) [2], a potom

spušta do površine zemlje,  $^7\text{Be}$  može poslužiti kao obeleživač vazdušnih masa [3]. Drugim rečima, njegov transport kroz atmosferu zajedno sa vazdušnim masama čini ga dobrim pokazateljem procesa koji se odvijaju u atmosferi.

Među najbitnije faktore koji utiču na specifičnu aktivnost  $^7\text{Be}$  u prizemnom sloju atmosfere spadaju temperatura i količina padavina [4,5]. Porast temperature može da dovede do bržeg spuštanja vazdušnih masa bogatih  $^7\text{Be}$ , čime dolazi do povećanja njegove koncentracije na površini. Međutim, padavine efektivno uklanjaju ovaj radionuklid iz atmosfere, i tako sprečavaju njegovo nakupljanje.

Naša pretpostavka je da su trenovi temperature i padavina sa jedne strane, i trend specifične aktivnosti  $^7\text{Be}$  sa druge strane, povezani. Da bismo proverili ovu hipotezu, izračunali smo vremenske trendove temperature, količine padavina i specifične aktivnosti  $^7\text{Be}$  na šest lokacija u Evropi između 2000. i 2014. godine.

## 2. Materijal i metode

Izmerene vrednosti specifične aktivnosti  $^7\text{Be}$  preuzete su iz baze podataka Monitoring radioaktivnosti u životnoj sredini (na engleskom „Radioactivity Environmental Monitoring data bank”) koju održava Institut za transuranijske elemente Objedinjenog istraživačkog centra u Ispri, Italija. Bazu čine višegodišnja merenja specifične aktivnosti  $^7\text{Be}$  u prizemnom sloju vazduha koja se sprovode na 34 lokacije širom Evrope [6].

U ovom radu obradili smo podatke sa šest mernih stanica na kojima se između 2000. i 2014. godine uzorkovanje sprovodilo uglavnom jednom nedeljno. Geografske koordinate ovih lokacija, kao i broj uzoraka u posmatranom vremenskom intervalu, dati su u tabeli 1.

**Tabela 1. Lokacije na kojima su prikupljeni uzorci aerosola.**

Merno mesto	Geografska širina i dužina (°N; °E)	Nadmorska visina (m n.v.)	Broj uzoraka
Madrid	(40,45; -3,69)	715	798
Bilbao	(43,17; -2,94)	380	817
Beč	(48,22; 16,35)	193	816
Luksemburg	(49,63; 06,13)	280	715
Risoe	(55,69; 12,10)	9	802
Ivalo	(68,64; 27,57)	130	753

Meteorološki podaci preuzeti su iz E-OBS gridovane klimatologije, verzija 15, koja sadrži podatke od 1950. godine [7,8]. Srednja dnevna temperatura i količina padavina za svaku od lokacija u periodu 2000–2014, dobijene su bilinearnom interpolacijom sa E-OBS mreže pravilno raspoređenih tačaka čija horizontalna rezolucija iznosi 0,25 °. Dnevne vrednosti ovih meteoroloških parametara potom su usrednjene na nedeljne vrednosti kako bi se dobili nizovi sa istim vremenskim intervalom kao i izmerene specifične aktivnosti  $^7\text{Be}$ .

Za svaku od lokacija izračunali smo trendove u vremenskim serijama specifične aktivnosti  $^7\text{Be}$ , temperature i količine padavina. Trendove smo dobili iz sezonskog Kendalovog testa [9] u kome se za svaki mesec tokom godine prvo primeni Man-Kendalov trend test, a potom se rezultati kombinuju. Na taj način smo iz nizova prvo uklonili sezonalnost koja može da utiče na vremenski trend. Ovaj test kao rezultat daje

trend koji može biti: pozitivan što ukazuje na ukupan rast posmatrane varijable; negativan što ukazuje na opadanje njene vrednosti tokom vremena; i nula što ukazuje na nepostojanje trenda date varijable.

### 3. Rezultati i diskusija

Statistički značajni ( $p < 0,05$ ) pozitivni trendovi specifične aktivnosti  $^7\text{Be}$  dobijeni su za četiri lokacije:  $8,71 \cdot 10^{-5} \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}/\text{god}$  za Madrid,  $3,13 \cdot 10^{-5} \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}/\text{god}$  za Bilbao,  $4,00 \cdot 10^{-5} \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}/\text{god}$  za Luksemburg, i  $1,91 \cdot 10^{-5} \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}/\text{god}$  za Ivalo. Sa druge strane, nismo dobili statistički značajne trendove za temperaturu i količinu padavina na ispitivanim lokacijama. Jedini izuzetak je pozitivan trend temperature detektovan za Madrid.

Naša analiza ukazuje na porast specifične aktivnosti  $^7\text{Be}$  u površinskom sloju vazduha u Evropi tokom 2000–2014. godine i u saglasnosti je sa literaturnim podacima [10]. Statistički značajni trendovi većeg intenziteta dobijeni su za stanice na jugu kontinenta. Međutim, kako u ovom radu nismo dobili statistički značajne trendove za vremenske serije temperature i količine padavina, ne mogu se izvesti zaključci o eventualnoj povezanosti dugoročne promene ovih meteoroloških parametara sa količinom  $^7\text{Be}$  u vazduhu. Postoji mogućnost da bi analiza dužih vremenskih serija ponudila odgovor na našu početnu pretpostavku.

Stoga smo pogledali vremenske trendove temperature i količine padavina između 1960. i 2016. godine koje je objavila Evropska agencija za zaštitu životne sredine [11]. Prema tom izveštaju, statistički značajan porast godišnje temperature od  $\sim 0,30 \text{ }^\circ\text{C}/\text{dekadi}$  detektovan je na jugu i  $\sim 0,20 \text{ }^\circ\text{C}/\text{dekadi}$  na severu kontinenta, a trendovi u količini padavina iznose  $-0,30 \text{ mm}/\text{dekadi}$  na jugu, odnosno  $+0,20 \text{ mm}/\text{dekadi}$  na severu. Kombinovani efekat povišene temperature i smanjene količine padavina na jugu može da objasni pozitivan trend većeg intenziteta koji vidimo na jugu Evrope. Nasuprot tome, povećanje temperature na severu koje bi moglo da dovede do povećanje koncentracije  $^7\text{Be}$  u vazduhu, umanjeno je donekle povećanjem količine padavina, odnosno povećanjem ispiranja aerosola iz atmosfere. Ova kombinacija bi mogla da objasni razlog za slabije trendove koje smo detektovali na severu nego na jugu kontinenta.

Takođe, moguće je da zajedničko dejstvo glavnih faktora koji utiču na koncentraciju  $^7\text{Be}$ , konkretno temperature i količine padavina, dovodi do njegovog trenda koji je tokom 15 ispitivanih godina izraženiji nego trendovi u pojedinačnim faktorima. Treba imati u vidu i da je za potpuno objašnjenje trenda specifične aktivnosti  $^7\text{Be}$  neophodno razmotriti i ostale faktore, na primer, njegovu brzinu stvaranja u atmosferi ili insolaciju.

### 4. Zaključak

U ovom radu, pretpostavili smo da su vremenski trendovi temperature i količine padavina sa jedne strane, i specifične aktivnosti  $^7\text{Be}$  sa druge strane, povezani, te smo izračunali trendove ovih promenljivih na šest lokacija u Evropi, između 2000. i 2014. godine. Na četiri lokacije dobili smo statistički značajne pozitivne trendove specifične aktivnosti  $^7\text{Be}$  koji ukazuju na porast koncentracije ovog radionuklida u prizemnom sloju vazduha. Trendovi većeg intenziteta dobijeni su na jugu nego na severu kontinenta. Sa druge strane, na ispitivanim lokacijama nismo dobili statistički značajne trendove za temperaturu i količinu padavina, osim za Madrid gde smo detektovali pozitivan trend

temperature. Smatramo da bi buduća analiza koja uključuje nizove podataka duže od 15 godina mogla da ponudi odgovor na našu početnu hipotezu.

### 5. Zahvalnica

Ovaj rad je realizovan u okviru projekta „Istraživanje klimatskih promena na životnu sredinu: praćenje uticaja, adaptacija i ublažavanje“ (43007) koji finansira Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije u okviru programa Integrisanih i interdisciplinarnih istraživanja za period 2011-2019. godine.

### 6. Literatura

- [1] D. M. Koch, D. J. Jacob, W. C. Graustein. Vertical transport of tropospheric aerosols as indicated by  $^7\text{Be}$  and  $^{210}\text{Pb}$  in a chemical tracer model. *J. Geophys. Res.* 101, 1996, 18651–18666.
- [2] D. Lal, B. Peters. Cosmic ray produced radioactivity on the earth. *Handb. Phys.* 46, 1967, 551–612.
- [3] E. F. Danielsen. Stratospheric-tropospheric exchange based on radioactivity, ozone and potential vorticity. *J. Atmos. Sci.* 25, 1968, 502–518.
- [4] A. Ioannidou, M. Manolopoulou, C. Papastefanou. Temporal changes of  $^7\text{Be}$  and  $^{210}\text{Pb}$  concentrations in surface air at temperate latitudes (40 °N). *Appl. Radiat. Isot.* 63, 2005, 277–284.
- [5] J. Ajtić, E. Brattich, D. Sarvan, V. Djurdjevic, M. Á. Hernández Ceballos. Factors affecting the  $^7\text{Be}$  surface concentration and its extremely high occurrences over the Scandinavian Peninsula during autumn and winter. *Chemosphere* 199, 2018, 278–285.
- [6] M. A. Hernández-Ceballos, G. Cinelli, M. Marín Ferrer, T. Tollefsen, L. De Felice, E. Nweke, P. V. Tognoli, S. Vanzo, M. De Cort. A climatology of  $^7\text{Be}$  in surface air in European Union. *J. Environ. Radioact.* 141, 2015, 62–70.
- [7] M. R. Haylock, N. Hofstra, A. M. G. Klein Tank, E. J. Klok, P. D. Jones, M. New. A European daily high-resolution gridded dataset of surface temperature and precipitation. *J. Geophys. Res.* 113, 2008, D20119.
- [8] E. J. M. van den Besselaar, M. R. Haylock, G. van der Schrier, A. M. G. Klein Tank. A European daily high-resolution observational gridded data set of sea level pressure. *J. Geophys. Res.* 116, 2011, D11110.
- [9] R. M. Hirsch, J. R. Slack, R. A. Smith. Techniques of trend analysis for monthly water quality data. *Water Resour. Res.* 18, 1982, 107–121.
- [10] S. Bianchi, W. Plastino, E. Brattich, V. Djurdjevic, A. Longo, M. A. Hernández-Ceballos, D. Sarvan, J. Ajtić. Analysis of trends, periodicities, and correlations in the beryllium-7 time series in Northern Europe. *Appl. Radiat. Isot.* 148, 2019, 160–167.
- [11] European Environment Agency. <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators> (accessed 29 May 2019).



## **BERYLLIUM-7 ACTIVITY CONCENTRATION TRENDS IN THE SURFACE AIR IN EUROPE: 2000–2014**

**Jelena AJTIĆ<sup>1</sup>, Erika BRATTICH<sup>2</sup>, Miguel Angel HERNÁNDEZ CEBALLOS<sup>3</sup>  
and Vladimir DJURDJEVIĆ<sup>4</sup>**

1) *University of Belgrade, Faculty of Veterinary Medicine, Belgrade, Serbia,*  
[jelena.ajtic@vet.bg.ac.rs](mailto:jelena.ajtic@vet.bg.ac.rs)

2) *Alma Mater Studiorum University of Bologna, Department of Physics and  
Astronomy, Bologna, Italy,* [erika.brattich@unibo.it](mailto:erika.brattich@unibo.it)

3) *European Commission, Joint Research Centre, Ispra, Italy,*  
[miguel-angel.hernandez-ceballos@ec.europa.eu](mailto:miguel-angel.hernandez-ceballos@ec.europa.eu)

4) *University of Belgrade, Faculty of Physics, Belgrade, Serbia,* [vdj@ff.bg.ac.rs](mailto:vdj@ff.bg.ac.rs)

### **ABSTRACT**

Temperature and precipitation are considered the major factors that influence the beryllium-7 activity concentration in the surface air. For that reason, our analysis investigates their temporal trends in Europe over fifteen years, between 2000 and 2014, and their possible interconnexion. We use data from the Radioactivity Environmental Monitoring data bank (REMdb) to calculate trends in the beryllium-7 activity concentration in six locations across Europe: Madrid and Bilbao (Spain) in the south, Vienna (Austria) and Luxembourg (Luxembourg) in the central part of the continent, and Risoe (Denmark) and Ivalo (Finland) in the north. In addition, we calculate trends in the local temperature and precipitation for each of the six sites. The meteorological parameters are extracted onto the locations of the beryllium-7 sampling sites from the E-OBS gridded climatology (version 15) using bilinear interpolation. To calculate the trends, we use the seasonal Kendall test, which applies the Mann-Kendall trend test separately for each month and then combines the results. This method gives statistically significant ( $p < 0.05$ ) positive trends in beryllium-7 concentration measured in four locations: Madrid ( $8.71 \cdot 10^{-5}$  Bq·m<sup>-3</sup>/year), Bilbao ( $3.13 \cdot 10^{-5}$  Bq·m<sup>-3</sup>/year), Luxembourg ( $4.00 \cdot 10^{-5}$  Bq·m<sup>-3</sup>/year), and Ivalo ( $1.91 \cdot 10^{-5}$  Bq·m<sup>-3</sup>/year). Only in Madrid the beryllium-7 trend is concurrent with a statistically significant positive trend in temperature. Our trend analysis implies that over 2000–2014, the beryllium-7 surface concentration increased across Europe, with the strongest trends in the south, and weakening towards the north of the continent. However, the obtained temperature and precipitation trends are not statistically significant, thus not allowing a further investigation of the interconnexion between the trends. A future study would benefit from longer data records which would help to resolve a mutual relationship between the temporal trends of the beryllium-7 activity concentration, temperature and precipitation.

## UTICAJ KOSMIČKOG ZRAČENJA NA KONCENTRACIJU $^7\text{Be}$ U UKUPNOM DEPOZITU

Milica RAJAČIĆ, Dragana TODORVIĆ, Jelena KRNETA NIKOLIĆ,  
Nataša SARAP, Marija JANKOVIĆ, Gordana PANTELIĆ,  
Ivana VUKANAC i Mirjana RADENKOVIĆ

Univerzitet u Beogradu, Institut za nuklearne nauke "Vinča", Laboratorija za zaštitu od zračenja i zaštitu životne sredine, Beograd, Srbija, [milica100@vinca.rs](mailto:milica100@vinca.rs), [beba@vinca.rs](mailto:beba@vinca.rs), [jnikolic@vinca.rs](mailto:jnikolic@vinca.rs), [natasas@vinca.rs](mailto:natasas@vinca.rs), [marijam@vinca.rs](mailto:marijam@vinca.rs), [pantelic@vinca.rs](mailto:pantelic@vinca.rs), [vukanac@vinca.rs](mailto:vukanac@vinca.rs), [mirar@vinca.rs](mailto:mirar@vinca.rs)

### SADRŽAJ

Berilijum-7 ( $^7\text{Be}$ ) je radioaktivni berilijumov izotop koji nastaje u interakcijama kosmičkog zračenja sa atomima atmosfere. Intenzitet kosmičkog zračenja usled nehomogenosti magnetnog polja Zemlje, ispoljava prostornu distribuciju, dok je vremenska distribucija posledica vremenski promenljivog magnetnog polja Sunca. Cilj ovog istraživanja je da se izvrši analiza uticaja vremenske promene intenziteta kosmičkog zračenja na koncentraciju  $^7\text{Be}$  u kompozitnim mesečnim uzorcima ukupnog (suvog i mokrog) depozita. Uzorci depozita su sakupljeni u Institutu za nuklearne nauke "Vinča", a sva merenja koncentracije  $^7\text{Be}$  su urađena u Laboratoriji za zaštitu od zračenja i zaštitu životne sredine. Rezultati merenja uzoraka prikupljenih u periodu od 1994. do 2016. su korelirani sa mesečnim podacima o intenzitetu kosmičkog zračenja iz istog perioda, preuzetim sa sajta stanice "Apatity", Polarnog geofizičkog instituta, Ruske akademije nauka. Ova stanica poseduje neutronske monitor "Standard 18-NM-64" lociran na nadmorskoj visini od 181 m sa geografskim koordinatama od N: 67,57° i E: 33,39°. Takođe, rezultati merenja oba posmatrana parametra su grupisani po godinama i mesecima u godini, a zatim su određeni njihovi godišnji i mesečni indeksi. Nakon toga, za ispitane parametre su međusobno korelirani kako godišnji, tako i njihovi mesečni indeksi. Dobijeni rezultati ukazuju da fluktuacije kosmičkog zračenja utiču samo na varijacije godišnjih indeksa koncentracije  $^7\text{Be}$  u ukupnom depozitu. Koeficijent determinacije godišnjih indeksa posmatranih parametara govori da se moduliranošću kosmičkog zračenja može objasniti 33% varijacije godišnjih vrednosti koncentracije  $^7\text{Be}$  u depozitu.

### 1. Uvod

Primarno kosmičko zračenje (deo koji pogodi atmosferu) podrazumeva čestično i elektromagnetno zračenje koje potiče iz kosmosa. Ono se najvećim delom sastoji od visokoenergetskih čestica, od kojih su najzastupljenija jonizovana jezgra vodonika (oko 85%) i helijuma (oko 12%) [1].

Na osnovu svog porekla, čestice primarnog kosmičkog zračenja se mogu podeliti u dve veće grupe: solarne (potiču sa Sunca) i galaktičke (vode poreklo iz naše i drugih galaksija). Čestice koje nastaju interakcijom primarnog dela kosmičkog zračenja sa česticama atmosfere, spadaju u sekundarno kosmičko zračenje.



Pokazalo se da dnevne, kao ni godišnje varijacije intenziteta kosmičkog zračenja uglavnom nisu veće od 10% što navodi na mišljenje da Sunce, kao izvor kosmičkog zračenja, nema veliki uticaj na Zemlji [2, 3]. Međutim, 1950-ih godina, Skot Forbuš (Scott E. Forbush) je uočio da kosmičko zračenje na Zemlji varira inverzno intenzitetu Sunčeve aktivnosti [4]. Naime, prodoru čestica primarnog kosmičkog zračenja do Zemlje se najpre suprotstavlja Sunčevo, a zatim i Zemljino magnetno polje. Dejstvom Lorencove sile, ova polja skreću naelektrisane čestice, smanjuju njihov fluks i na taj način predstavljaju zaštitu od kosmičkog zračenja. U periodima povećane Sunčeve aktivnosti, njegovo magnetno polje je jače, što povećava zaštitu Sunčevog sistema od galaktičkog kosmičkog zračenja, dovodeći do smanjenja njegovog intenziteta na Zemlji za oko 30% [2]. Zaključuje se da, iako solarni deo nema veliki udeo u ukupnom fluksu kosmičkog zračenja, Sunce ipak igra приметnu ulogu u zaštiti Zemlje od galaktičkog zračenja.

Deo interakcije kosmičkog zračenja sa jezgrima zastupljenim u gornjim slojevima atmosfere utiče na radioaktivnost atmosfere proizvodeći kosmogene radionuklide. Kratkoživeći deo ove grupe radionuklida se raspadne pre nego što stigne do prizemnih slojeva, dok dugoživeći radionuklidi mogu da stignu do površine Zemlje, da se zadrže u biosferi i tako učestvuju u njenim procesima (kruženje vode u prirodi, lanac ishrane, kretanje vazдушnih masa i dr.).

Nakon formiranja, kosmogeni radionuklidi se brzo vezuju za submikronske aerosolne čestice [5]. Ukoliko aerosoli različitim mehanizmima transporta kroz atmosferu dospeju do površine Zemlje, onda životinje i ljudi ove radionuklide mogu da usvoje putem inhalacije ili ingestije [5].

Kako je proizvodnja kosmogenih izotopa u Zemljinoj atmosferi direktna posledica prisustva kosmičkog zračenja, u ovom radu je u uzorcima ukupnog depozita ispitano nivo linearne koreliranosti koncentracije berilijumovog izotopa  $^7\text{Be}$ , kao jednog od predstavnika kosmogenih radionuklida, sa promenom intenziteta kosmičkog zračenja.

## 2. Metoda merenja

U Institutu "Vinča" (N: 44° 45' 32,3"; E: 20° 35' 59,5"; 95 m nadmorske visine), na pravougaonom uzorkivaču, površine 0,16 m<sup>2</sup> (slika 1) se neprekidno talože suvi i mokri depoziti, formirajući kompozitni mesečni uzorak. U ovim uzorcima, Laboratorija za zaštitu od zračenja Instituta "Vinča" od 1994. godine redovno meri koncentraciju  $^7\text{Be}$ .

$^7\text{Be}$  se elektronskim zahvatom transformiše u  $^7\text{Li}$ . U približno 10% slučajeva, relaksiranje do stabilnog  $^7\text{Li}$  se dešava preko pobuđenog jezgra  $^7\text{Li}$ , koje se deekscituje emisijom fotona gama zračenja energije 477,6 keV. Zahvaljujući ovome, koncentracija  $^7\text{Be}$  u različitim vrstama uzoraka može se odrediti metodom gamaspektrometrije.

Suvi ostaci uzoraka su mineralizovani na 450 °C, a zatim preneti u geometriju merenja (planšeta do 2008. godine, a kasnije fiola; slika 2). U zavisnosti od vremenskog perioda, merenja su obavljena na četiri HPGe detektora, sa rezolucijom od 1,89 keV na 1332 keV i relativnim efikasnostima 20% (proizvođača Ortec), 18%, 20% i 50% (proizvođača Canberra).

Merenja su trajala 60000 s, nakon čega su za statističku obradu snimljenih podataka korišćena dva softverska paketa SPECTRAN-AT (do marta 2005.) i Genie 2000 (2005–danas). Aktivnost kompozitnog mesečnog uzorka se deli sa površinom uzorkovanja i brojem dana tokom kojih je uzorak prikupljen, pa su rezultati merenja izraženi kao koncentracija aktivnosti ( $A_M$ ) po jedinici površine u jedinici vremena ( $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dan}^{-1}$ ).

Shodno tome da je vreme poluraspada  ${}^7\text{Be} \approx 53,2$  dana i da, usled perioda prikupljanja (oko 30 dana) i pripreme uzorka, vremenska distanca između sakupljanja pojedinih delova uzorka i merenja može biti i više od 45 dana, nakon određivanja koncentracije, u svim uzorcima je izvršena korekcija na dan uzorkovanja.



**Slika1. Uzorkivač depozita.**



**Slika 2. Geometrije merenja: fiola (levo) i planšeta (desno).**

Korišćeni podaci o intenzitetu kosmičkog zračenja u periodu 1995-2016. su javno dostupni na sajtu stanice "Apatity" (N: 67,57°; E: 33,39°; 181 m nadmorske visine), Polarnog geofizičkog instituta, Ruske akademije nauka. Ova stanica, neutronske monitorom "Standard 18-NM-64" od maja 1969. godine kontinualno beleži podatke o intenzitetu kosmičkog zračenja ( $\text{imp}\cdot\text{min}^{-1}$ ) na svakih sat vremena, a od jula 2000. i sa periodom od svega 1 minut [6].

### 3. Rezultati

Mesečne vrednosti ispitanih parametara, koncentracija aktivnosti  ${}^7\text{Be}$  u ukupnom depozitu sa jedne, i intenzitet kosmičkog zračenja sa druge strane, grupisane su i usrednjene po godinama i mesecima (godišnji i mesečni indeksi). Godišnji indeksi ( $X_g$ ) su izračunati po jednačini 1 i predstavljaju srednje godišnje vrednosti mesečnih uzoraka  $x_{g,m}$ . Mesečni indeksi predstavljaju srednje vrednosti mesečnih uzoraka  $x_{g,m}$  za pojedinačne mesece u godini,  $X_m$  (jednačina 2).

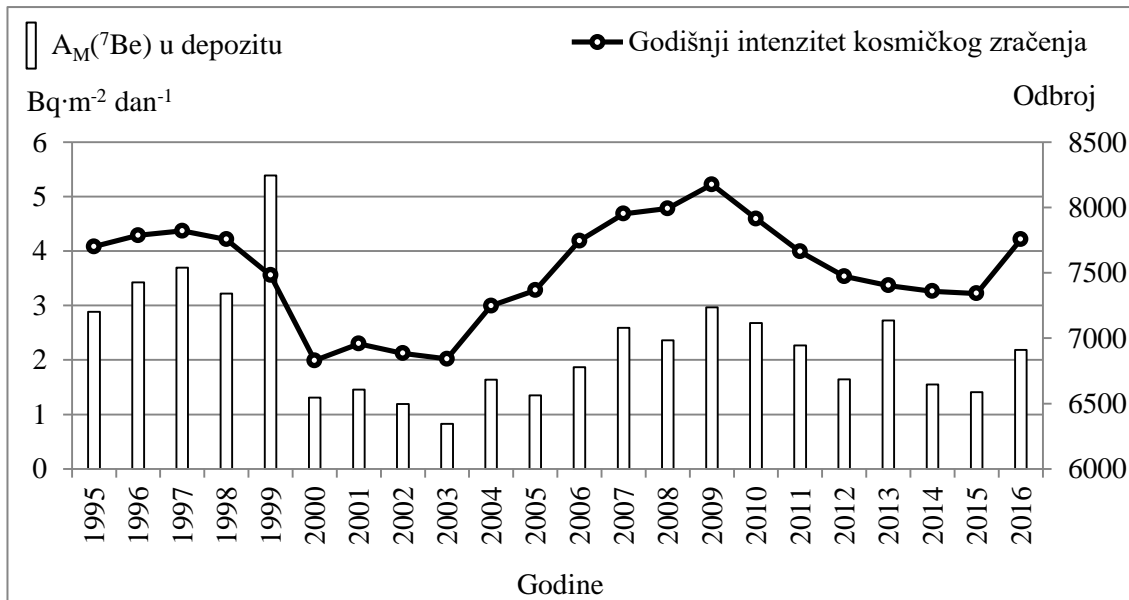
$$X_g = \frac{\sum_{m=1}^{12} x_{g,m}}{12} \quad (1)$$

$$X_m = \frac{\sum_{g=1995}^{2016} x_{g,m}}{11} \quad (2)$$

Nakon grupisanja podataka, određeni su njihovi međusobni koeficijenti linearne korelacije ( $r_g$  i  $r_m$ ). Nivo poverenja za koji su testirani Pirsonovi koeficijenti je bio 95% ( $p = 0,05$ ). Takođe, sa istim nivoom poverenja, određen je i koeficijent linearne koreliranosti negrupisanih mesečnih vrednosti ispitanih parametara ( $r_{g,m}$ ).

Pirsonov koeficijent korelacije između koncentracije  ${}^7\text{Be}$  u kompozitnim mesečnim uzorcima i srednjih mesečnih vrednosti intenziteta kosmičkog zračenja,  $r_{g,m}$ , u periodu od 1995-2016, daje relativno slabu koreliranost od  $r_{g,m} = 0,29$ . Koeficijent determinacije ( $r_{g,m}^2$ ) govori da se mesečnom promenom intenziteta kosmičkog zračenja može objasniti svega 8% varijacije mesečnih vrednosti koncentracija  ${}^7\text{Be}$ .

Primetno jača koreliranost od  $r_g = 0,56$  se dobija u razmatranju godišnjih indeksa (slika 3), koja ukazuje na to da se 33% varijacije godišnjih vrednosti koncentracije  ${}^7\text{Be}$  u depozitu može objasniti modulisanošću kosmičkog zračenja. Najslabija i statistički neznačajna koreliranost ( $p > 0,05$ ) se ispostavila između mesečnih indeksa,  $r_m$ .



Slika 3. Vremenske distribucije srednjih godišnjih vrednosti koncentracije aktivnosti  ${}^7\text{Be}$  u ukupnom depozitu i intenziteta kosmičkog zračenja.

### 4. Zaključak

Kako je povećanje solarnog dela kosmičkog zračenja tokom perioda povećane aktivnosti Sunca neznatno [2,3] i najveći uticaj na promenu intenziteta kosmičkog zračenja u Sunčevom sistemu ima opadanje intenziteta njegovog galaktičkog dela (usled pojačanog Sunčevog magnetnog polja) [2,4], zaključujemo da su promene u koncentracijama kosmogenih radionuklida na Zemlji na višegodišnjoj vremenskoj skali (opadanje u periodu povećane aktivnosti Sunca), u najvećoj meri posledica promene galaktičkog dela spektra kosmičkog zračenja.

Uzimanjem u obzir koeficijente determinacije linearne koreliranosti mesečnih vrednosti ispitanih parametara ( $r_{g,m}^2$ ), njihovih mesečnih ( $r_m^2$ ) i godišnjih ( $r_g^2$ ) indeksa, može se reći da fluktuacije intenziteta kosmičkog zračenja utiču samo na varijacije godišnjih indeksa koncentracije  $^7\text{Be}$  u ukupnom depozitu, dok na vrednosti mesečnih indeksa nemaju značajniji uticaj.

### 5. Zahvalnica

Ovaj rad je podržan od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja, pod Projektom III43009.

### 6. Literatura

- [1] G. Choppin, J.O. Liljenzin, J. Rydberg. Radiation and Elementary Particles, In: *Radiochemistry and Nuclear Chemistry*, Butterworth-Heinemann, 2002, 283–298.
- [2] J. Ziegler. Terrestrial cosmic rays. *IBM J. Res. Dev.* 40(1), 1996, 19–39.
- [3] J. B. Mercer, B. G. Wilson. Daily Variation of Cosmic Ray. *Nature* 208, 1965, 477–479.
- [4] S. E. Forbush. World-Wide Cosmic-Ray Variations, 1937-1952. *J. Geophys. Res.* 59(4), 1954, 525–542.
- [5] M. Yoshimori. Production and behavior of beryllium 7 radionuclide in the upper atmosphere. *Adv. Space Res.* 36, 2005, 922–926.
- [6] <http://cr0.izmiran.ru/apty-main.htm>, "Apatity" Neutron Monitor, 04.09.2018.

## THE EFFECT OF COSMIC RADIATION ON THE $^7\text{Be}$ CONCENTRATION IN THE TOTAL DEPOSIT

**Milica RAJAČIĆ, Dragana TODORVIĆ, Jelena KRNETA NIKOLIĆ,  
Nataša SARAP, Marija JANKOVIĆ, Gordana PANTELIĆ,  
Ivana VUKANAC and Mirjana RADENKOVIĆ**

*University of Belgrade, Vinča Institute of Nuclear Sciences, Department of Radiation and Environmental Protection, Belgrade, Serbia, [milica100@vinca.rs](mailto:milica100@vinca.rs), [beba@vinca.rs](mailto:beba@vinca.rs), [jnikolic@vinca.rs](mailto:jnikolic@vinca.rs), [natasas@vinca.rs](mailto:natasas@vinca.rs), [marijam@vinca.rs](mailto:marijam@vinca.rs), [pantelic@vinca.rs](mailto:pantelic@vinca.rs), [vukanac@vinca.rs](mailto:vukanac@vinca.rs), [mirar@vinca.rs](mailto:mirar@vinca.rs)*

### ABSTRACT

Beryllium-7 ( $^7\text{Be}$ ) is a radioactive beryllium isotope that is produced in the interaction of cosmic radiation with atmospheric atoms. Due to the heterogenous of the Earth's magnetic field, the intensity of cosmic radiation exhibits spatial distribution, while the time distribution is a consequence of the time-varying magnetic field of the Sun. The aim of this research is to analyze the influence of the intensity of cosmic radiation on the  $^7\text{Be}$  concentration in samples of the total (dry and wet) deposit. The deposit samples were collected at the Vinča Institute of Nuclear Sciences, and all  $^7\text{Be}$  concentration measurements were performed in the Department of Radiation and Environmental Protection. The results of the measurements were collected in the period from 1994 to 2016 and they were correlated with the monthly neutron monitor data of the "Apatity", the Polar Geophysical Institute, the Russian Academy of Sciences. This station has the neutron monitor "Standard 18-NM-64" located at the altitude of 181 m with geographical coordinates of N:  $67.57^\circ$  and E:  $33.39^\circ$ . Also, the results of the measurement of both observed parameters are grouped by years and months of the year, and then their annual and monthly indices were determined. After that, the annual as well as monthly indices of the observed parameters were correlated. The obtained results indicate that the fluctuations in the galactic part of cosmic radiation affect the variation of the annual  $^7\text{Be}$  concentration index in the deposit. The coefficient of determining the annual indices of the observed parameters shows that the modulation of cosmic radiation can explain 33% of the variation of the annual values of the concentration of  $^7\text{Be}$  in the deposit.

## SADRŽAJ RADIOAKTIVNOG IZOTOPA VODONIKA U PADAVINAMA SA REFERENTNIH METEOROLOŠKIH STANICA U SRBIJI

**Marija JANKOVIĆ, Nataša SARAP, Milica RAJAČIĆ,  
Jelena KRNETA NIKOLIĆ, Gordana PANTELIĆ, Dragana TODOROVIĆ,  
Ivana VUKANAC i Mirjana RADENKOVIĆ**

*Laboratorija za zaštitu od zračenja i zaštitu životne sredine, Institut za nuklearne nauke  
Vinča, Univerzitet u Beogradu, Mike Petrovića Alasa 12-14, 11001 Vinča, Beograd,  
Srbija, [marijam@vinca.rs](mailto:marijam@vinca.rs), [natasas@vinca.rs](mailto:natasas@vinca.rs), [milica100@vinca.rs](mailto:milica100@vinca.rs), [jnikolic@vinca.rs](mailto:jnikolic@vinca.rs),  
[pantelic@vinca.rs](mailto:pantelic@vinca.rs), [beba@vinca.rs](mailto:beba@vinca.rs), [vukanac@vinca.rs](mailto:vukanac@vinca.rs), [mirar@vinca.rs](mailto:mirar@vinca.rs)*

### SADRŽAJ

*Tricijum, radioaktivni izotop vodonika ima i prirodno i antropogeno poreklo. Pri svom raspadu emituje niskoenergetsko beta zračenje i pri tom da bi bio detektovan mora se uvesti u aktivnu zapreminu detektora. Za detekciju je korišćen tečni scintilacioni spektrometar Ultra Low Level Liquid Scintillation Spectrometer Quantulus 1220. U ovom radu prikazani su rezultati sadržaja tricijuma u padavinama sakupljenim na referentnim meteorološkim stanicama u Srbiji (Beograd, Subotica, Niš, Zlatibor, Zaječar i Vranje). Sadržaj tricijuma je određen u kompozitnim mesečnim uzorcima, a period ispitivanja pokriva 2018. godinu. Rezultati ispitivanja pokazuju da su dobijene vrednosti u padavinama ispod granica predviđenih zakonskom regulativom.*

### 1. Uvod

Vodonik se u prirodi javlja u vidu tri izotopa: protijum,  $^1\text{H}$ , deuterijum,  $^2\text{H}$  i tricijum  $^3\text{H}$ . Protijum i deuterijum su stabilni, a tricijum je radioaktivan sa vremenom poluraspada od 12,32 godine [1]. Tricijum se prevashodno formira u stratosferi i ulazi u troposferu uglavnom na srednjim geografskim širinama. U stratosferi dolazi do reakcije brzih neutrona, protona i deuterona iz kosmičkog zračenja sa molekulima u vazduhu, prvenstveno azota. Na taj način nastaju kosmogeni radionuklidi, među kojima i tricijum. U nižim slojevima troposfere meša se sa vodenom parom, a odatle sa padavinama dospeva na površinu Zemlje. Najznačajnije jedinjenje tritijuma je molekul HTO. Tritirana vodena para, HTO, formira se vrlo brzo po pojavi tricijuma u atmosferi. Tricijum koji dospeva u atmosferu veštačkim putem, kao posledica nuklearnih eksplozija, se skoro potpuno konvertuje u tritiranu vodu (HTO) po jednačini:



koja se zatim meša sa vodama iz životne sredine.

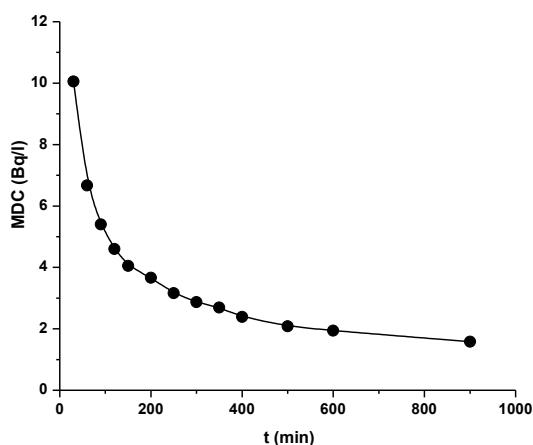
Cilj ovog rada je određivanje sadržaja tricijuma u uzorcima padavina na nekoliko lokacija u Srbiji.

## 2. Eksperimentalni deo

Određivanje sadržaja tricijuma u prirodnim vodama (padavine, površinske, izvorske, pijaće, podzemne vode) spada u kategoriju merenja niskih aktivnosti. Priprema uzoraka zasniva se na prečišćavanju uzoraka destilacijom, koncentrisanjem postupkom elektrolize i pripremom uzoraka za merenje aktivnosti. Ukoliko nema dovoljno uzorka za elektrolitičko obogaćenje, ili je potrebna brza analiza, primenjuje se direktna metoda koja podrazumeva samo preliminarnu destilaciju i merenje.

Kompozitni mesečni uzorci padavina, sakupljeni na meteorološkim stanicama Beograd (mesto uzorkovanja Karađorđev park), Subotica (Palić), Niš, Zlatibor, Zaječar i Vranje u toku 2018. godine, destilovani su u cilju prečišćavanja i oslobađanja prisutnih katjona i anjona. Nakon destilacije uzorci se mešaju sa scintilacionim koktelom Ultima Gold LLT u zapreminskom odnosu 8:12 ml u polietilenskim bočicama zapremine 20 ml.

Za određivanje sadržaja tricijuma u uzorcima koristi se tečni scintilacioni spektrometar Ultra Low Level Liquid Scintillation Spectrometer Quantulus 1220. Zajedno sa uzorcima meri se *background* - fon (*mrtva voda*) i standard tricijuma poznate aktivnosti (Czech Metrology Institute). Efikasnost merenja je 30,8%. Prozor za merenje tricijuma podešen je između 1 i 250 kanala. Vreme merenja uzoraka je 18000 s. Svi rezultati merenja predstavljaju se sa mernom nesigurnošću, koja je izražena kao proširena merna nesigurnost za faktor  $k = 2$ , koji za normalnu raspodelu odgovara nivou poverenja od 95%. Granica detekcije kada se koristi direktna metoda određivanja sadržaja tricijuma iznosi 2,9 Bq/l za vreme merenje od 18000 s (slika 1).



**Slika 1. Zavisnost MDC od vremena merenja kod direktne metode.**

Specifična aktivnost  $^3\text{H}$  određuje se pomoću jednačine (2), ukoliko se primenjuje direktna metoda [ASTM D 4107-08] [2]:

$$A = \frac{R_a - R_b}{\varepsilon \cdot F \cdot V \cdot e^{-\lambda t}} \quad (2)$$

gde je:  $R_a$  – odbroj za mereni uzorak (cps);  $R_b$  odbroj fona (cps);  $\varepsilon$  - efikasnost brojača;  $V$  -zapremina uzorka (ml);  $F$  - recovery factor koji definiše ponovljivost merenja i jednak je 1;  $\lambda$  - konstanta poluraspada za tricijum  $(\ln 2)/t_{1/2}$ ;  $t_{1/2}$  - vreme poluraspada tricijuma (4510 dana),  $t$  vreme proteklo od uzorkovanja do brojanja (dani);



### 3. Rezultati i diskusija

U tabeli 1 prikazani su rezultati merenja sadržaja tricijuma u uzorcima padavina na nekoliko lokacija u Srbiji.

**Tabela 1. Sadržaj tricijuma u uzorcima padavina po mesecima na različitim lokacijama u Srbiji u 2018. god.**

Lokacija	Beograd	Subotica	Niš	Zlatibor	Zaječar	Vranje
Mesec	Aktivnost $^3\text{H}$ (Bq/l)					
<b>I</b>	$4,9 \pm 1,7$	$3,7 \pm 1,7$	$< 2,9$	$4,1 \pm 1,7$	$4,9 \pm 1,7$	$4,5 \pm 1,7$
<b>II</b>	$3,7 \pm 1,6$	$4,9 \pm 1,6$	$5,7 \pm 1,7$	$3,3 \pm 1,6$	$4,5 \pm 1,6$	$4,5 \pm 1,6$
<b>III</b>	$4,9 \pm 1,6$	$3,3 \pm 1,7$	$< 2,9$	$3,7 \pm 1,7$	$4,9 \pm 1,6$	$3,7 \pm 1,7$
<b>IV</b>	$< 2,9$	$4,1 \pm 1,6$	$4,6 \pm 1,8$	$4,5 \pm 1,8$	$5,0 \pm 1,8$	$4,6 \pm 1,6$
<b>V</b>	$3,7 \pm 1,6$	$7,0 \pm 1,7$	$6,6 \pm 1,7$	$7,8 \pm 1,7$	$6,6 \pm 1,7$	$5,8 \pm 1,7$
<b>VI</b>	/	$< 2,9$	$6,5 \pm 1,8$	$6,9 \pm 1,8$	$6,1 \pm 1,8$	$4,1 \pm 1,7$
<b>VII</b>	$4,5 \pm 1,6$	$4,1 \pm 1,6$	$3,7 \pm 1,6$	$4,9 \pm 1,6$	$4,9 \pm 1,6$	$4,9 \pm 1,6$
<b>VIII</b>	$4,5 \pm 1,6$	$4,5 \pm 1,6$	$6,1 \pm 1,7$	$3,7 \pm 1,6$	$5,7 \pm 1,7$	$5,3 \pm 1,6$
<b>IX</b>	$3,7 \pm 1,7$	$5,3 \pm 1,7$	$4,5 \pm 1,7$	$3,7 \pm 1,7$	$4,9 \pm 1,7$	$4,1 \pm 1,7$
<b>X</b>	$5,7 \pm 1,7$	$3,3 \pm 1,6$	$5,3 \pm 1,7$	$4,5 \pm 1,7$	$< 2,9$	/
<b>XI</b>	$4,1 \pm 1,7$	$4,1 \pm 1,7$	$4,9 \pm 1,7$	$4,1 \pm 1,7$	$4,1 \pm 1,7$	$3,7 \pm 1,7$
<b>XII</b>	$< 2,9$	$3,7 \pm 1,7$	$3,7 \pm 1,7$	$< 2,9$	$5,3 \pm 1,8$	$< 2,9$

Vrednosti tricijuma u padavinama se kreću od minimalne detekcione koncentracije do 7,8 Bq/l koliko je zabeleženo na Zlatiboru u maju mesecu 2018. godine. Generalno, nema velikih varijacija u sadržaju tricijuma na različitim lokacijama. Može se primetiti nešto viša aktivnost u letnjim mesecima što ukazuje na normalne sezonske varijacije. Najveće vrednosti koje se dobijaju u rano proleće i leto, posledica su stratosferskog porekla ovog radionuklida [3,4].

### 4. Zaključak

Rezultati analize sadržaja tricijuma u mesečnim uzorcima padavina u 2018. godini na nekoliko lokacija u Srbiji pokazuju nisku aktivnost ovog radionuklida, što je posledica stratosferskog porekla.

Zakonska regulativa u Republici Srbiji propisuje granicu za sadržaj tricijuma u vodi za piće od 100 Bq/l [5]. Ipak, monitoring ovog izotopa vodonika je potrebno sprovoditi u vodama, jer povišeni nivoi tricijuma mogu biti pokazatelji prisustva drugih veštačkih radionuklida.

### 5. Zahvalnica

Ovaj rad je podržan od strane Ministarstva za prosvetu, nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije u okviru projekata broj III43009.



### 6. Literatura

- [1] L. L. Lucas, M. P. Unterweger, Comprehensive Review and Critical Evaluation of the Half-Life of Tritium. *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.* 105, 2000, 541-549.
- [2] ASTM D 4107-08 Standard Test Method for Tritium in Drinking Water, 2008.
- [3] P. Vreča, I. Krajcar Bronić, N. Horvatinčić, J. Barešić, Isotopic characteristics of precipitation in Slovenia and Croatia: Comparison of continental and maritime stations, *J. Hydrol.* 330, 2006, 457– 469.
- [4] I. Radwan, Z. Pietrzak-Flis, T. Wardaszko, Tritium in surface waters, tap water and in precipitation in Poland during the 1994-1999 period. *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, 247, 2001, 71-77.
- [5] Pravilnik o granicama sadržaja radionuklida u vodi za piće, životnim namirnicama, stočnoj hrani, lekovima, predmetima opšte upotrebe, građevinskom materijalu i drugoj robi koja se stavlja u promet. Sl. gl. RS 36/18, 2018.

### CONTENT OF RADIOACTIVE ISOTOPES OF HYDROGEN IN THE PRECIPITATION FROM DIFFERENT METEOROLOGICAL STATIONS IN SERBIA

**Marija JANKOVIĆ, Nataša SARAP, Milica RAJAČIĆ, Jelena KRNETA  
NIKOLIĆ, Gordana PANTELIĆ, Dragana TODOROVIĆ,  
Ivana VUKANAC and Mirjana RADENKOVIĆ**

*Radiation and Environmental Protection Department, Institute of Nuclear Sciences  
Vinča, University of Belgrade, Mike Petrovića Alasa 12-14, 11001 Belgrade, Serbia,  
[marijam@vinca.rs](mailto:marijam@vinca.rs), [natasas@vinca.rs](mailto:natasas@vinca.rs), [milica100@vinca.rs](mailto:milica100@vinca.rs), [jnikolic@vinca.rs](mailto:jnikolic@vinca.rs),  
[pantelic@vinca.rs](mailto:pantelic@vinca.rs), [beba@vinca.rs](mailto:beba@vinca.rs), [vukanac@vinca.rs](mailto:vukanac@vinca.rs), [mirar@vinca.rs](mailto:mirar@vinca.rs)*

#### ABSTRACT

Tritium, the radioactive isotope of hydrogen, has a natural and anthropogenic origin. It emits low-energy beta radiation and, in order to be detected, it must be introduced into the active volume of the detector. For detection, Ultra Low Level Liquid Scintillation Spectrometer Quantulus 1220 was used. This paper presents the results of the tritium content in precipitation collected at reference meteorological stations in Serbia (Belgrade, Subotica, Niš, Zlatibor, Zaječar and Vranje). The content of tritium is determined in composite monthly samples, and the test period covers 2018. The results show that the obtained values in precipitation at investigated locations are below the limits prescribed by the Serbian legislation.

## SPECIFIČNA AKTIVNOST RADIONUKLIDA $^{40}\text{K}$ , $^{137}\text{Cs}$ , $^{210}\text{Pb}$ I EFEKTIVNA DOZA INGESTIJE IZ ODABRANIH LEKOVITIH BILJAKA SA PODRUČJA MAJDANPEKA

Irina KANDIĆ<sup>1</sup>, Igor ČELIKOVIĆ<sup>1</sup>, Aleksandar KANDIĆ<sup>1</sup>,  
Milan GAVRILOVIĆ<sup>2</sup> i Peđa JANAČKOVIĆ<sup>2</sup>

- 1) Institut za nuklearne nauke "Vinča", Univerzitet u Beogradu, Srbija, [irina.kandic@vin.bg.ac.rs](mailto:irina.kandic@vin.bg.ac.rs), [icelikovic@vin.bg.ac.rs](mailto:icelikovic@vin.bg.ac.rs), [akandic@vin.bg.ac.rs](mailto:akandic@vin.bg.ac.rs)
- 2) Univerzitet u Beogradu, Biološki fakultet, Srbija, [mgavrilovic@bio.bg.ac.rs](mailto:mgavrilovic@bio.bg.ac.rs), [pjanackovic@bio.bg.ac.rs](mailto:pjanackovic@bio.bg.ac.rs)

### SADRŽAJ

Lekovite biljke imaju dugu istoriju upotrebe širom sveta u tradicionalnoj medicini. Međutim, njihova upotreba, kao i upotreba biljnih proizvoda mora se kontrolisati, kako bi se izbegla pojava neželjenih efekata na zdravlje ljudi. Specifične aktivnosti radionuklida  $^{40}\text{K}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  i  $^{210}\text{Pb}$  u uzorcima lekovitih biljaka izmerene su pomoću poluprovodničkog HPGe spektrometarskog sistema, na osnovu čega je određena prosečna godišnja efektivna doza ingestije za odrasle koji piju dnevno 200 ml čaja pripremljenog od lekovitih biljaka. U radu je prikazana radiološka analiza 7 odabranih lekovitih biljaka sa područja Majdanpeka. Dobijene vrednosti za efektivnu dozu ingestije slične su vrednostima objavljenim u drugim studijama i manje su od  $100\ \mu\text{Sv}$ , što upućuje na zaključak da svakodnevna upotreba čajeva od analiziranih lekovitih biljaka sa područja Majdanpeka ne predstavlja značajan radiološki rizik po zdravlje.

### 1. Uvod

Medicinska svojstva i efikasnost lekovitih biljaka zavise od uslova sredine, koji takođe imaju direktan uticaj na rast i razvoj biljaka na staništu, bilo da su divlje ili gajene. Mogućnost kontaminacije vazduha, vode i hrane elementima u tragovima, koji su nusproizvodi savremene poljoprivrede, industrije i povećane urbanizacije, može imati dugoročne toksične efekte na zdravlje. Zbog toga je neophodno imati informacije o životnoj sredini i obimu stvarne koncentracije štetnih elemenata u lekovitim biljakama radi poboljšanja uslova životne sredine i zdravlja ljudi [1].

Nedostatak regulative i slobodna distribucija (uključujući prodaju preko interneta) mogu dovesti do neželjenih posledica zbog lošeg kvaliteta biljnih proizvoda. Najčešći uzroci su tretiranje biljnih proizvoda nedeklarisanim farmaceutskim supstancama ili pogrešnim identifikovanjem otrovnih biljnih vrsta, nepravilnim doziranjem, interakcijama sa konvencionalnim lekovima i upotrebom proizvoda kontaminiranih potencijalno opasnim supstancama, kao što su npr. mikotoksini, radioaktivne čestice, teški metali i agrohemijske supstance. Mnogi zagađivači su prirodni i nastaju u zemljištu i atmosferi, kao što su radionuklidi i metali. Međutim, neki od njih nastaju i upotrebom sredstava koja zagađuju životnu sredinu, a kasnije ih biljke akumuliraju. Zbog toga, zagađivači iz životne sredine mogu biti prisutni čak i ako se biljka organski gaji [2]. Povećana koncentracija radioaktivnosti u lekovitim biljakama može dovesti do štetnog efekta na

Људски organizam, pri čemu je ingestija jedan od glavnih puteva unošenja radionuklida u organizam. Treba imati u vidu da se tokom primene biljnih preparata u lečenju preporučuje njihovo korišćenje u dužem vremenskom periodu, što može dovesti do akumulacije štetnih materija u organizmu [3]. Takođe, treba napomenuti da povećana koncentracija radioaktivnosti dovodi i do povećane efektivne doze, a samim tim i povećanog radiološkog rizika.

Cilj rada je analiza sadržaja radionuklida  $^{40}\text{K}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  i  $^{210}\text{Pb}$  i njihove specifične aktivnosti u odabranim vrstama lekovitih biljaka sa područja Majdanpeka, kao i utvrđivanje vrednosti za individualnu godišnju efektivnu dozu ingestije. Takođe, cilj je i procena individualnog radiološkog rizika koji može nastati dugoročnom upotrebom čajeva od ovih lekovitih biljaka koje se koriste u tradicionalnoj medicini.

Podaci iz literature o preporučenoj količini lekovitih biljaka za pripremanje čaja se razlikuju od izvora do izvora i u zavisnosti od vrste biljke. U tabeli 1. su dati narodni i latinski nazivi ispitivanih lekovitih biljaka, kao i vrednosti za njihove preporučene količine za pripremanje čaja [2, 4, 5, 6].

**Tabela 1. Preporučena količina lekovitih biljaka za pripremanje čaja.**

Narodni naziv	Latinski naziv	Familija	Deo biljke koji se koristi	Preporučena količina (g)
Hajdučka trava	<i>Achillea millefolium L.</i>	Asteraceae	list i cvet	2
Pelin	<i>Artemisia absinthium L.</i>	Asteraceae	list	2
Kantarion	<i>Hypericum perforatum L.</i>	Asteraceae	list i cvet	2
Nana	<i>Mentha piperita L.</i>	Lamiacea	list	2
Majčina dušica	<i>Thymus serpyllum L.</i>	Lamiacea	list i cvet	3
Glog	<i>Crataegus monogyna L.</i>	Rosaceae	list	2
Šipak	<i>Rosa canina L.</i>	Rosaceae	plod	2,5

## 2. Materijal i metode

Uzorci 7 vrsta osušenih lekovitih biljaka (koren, list, cvet ili plod), sa područja Majdanpeka nabavjeni su tokom leta 2018. g. Uzorci su samleveni u laboratorijskom blenderu do finog praha, a masa svakog pojedinačnog uzorka bila je oko 30 g. Svi pripremljeni uzorci smešteni su u odgovarajuće standardne cilindrične PVC posude zapremine 125 ml.

Merenja i gamaspektrometrijska analiza uzoraka obavljena su u Laboratoriji za nuklearnu i plazma fiziku Instituta za nuklearne nauke "Vinča", Beograd.

Za potrebe analize uzoraka lekovitih biljaka kao radni standard korišćen je odgovarajući matriks trave spajkovan radioaktivnim rastvorom nabavljenim od CMI (Czech Metrology Institute), a koji je u svom sastavu imao sledeće radionuklide ( $^{241}\text{Am}$ ,  $^{109}\text{Cd}$ ,  $^{139}\text{Ce}$ ,  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{203}\text{Hg}$ ,  $^{113}\text{Sn}$ ,  $^{85}\text{Sr}$ ,  $^{88}\text{Y}$  i  $^{210}\text{Pb}$ ) [7].

Uzorci lekovitih biljaka, analizirani u ovom radu, mereni su na poluprovodničkom HPGe spektrometerskom sistemu Canberra GX5019 ( $\epsilon_r = 55\%$ ,  $FWHM = 1,9$  keV na energiji  $^{60}\text{Co}$  od 1332,49 keV) sa pratećom elektronikom.

Spektri uzoraka lekovitih biljaka snimani su i analizirani pomoću programskog paketa Genie2000 (Canberra), a da bi se postigla prihvatljiva merna nesigurnost, merenja su

trajala i do 585000 s. Pri određivanju specifične aktivnosti izvršena je korekcija na fon, a korišćena je uobičajena formula:

$$A_s = N \varepsilon p t m \quad (1)$$

gde su:

- $A_s$  - specifična aktivnost merenog uzorka (Bq/kg),
- $N$  - površina ispod pika, korigovana na fon,
- $\varepsilon$  - efikasnost detekcije,
- $p$  - verovatnoća emisije fotona,
- $t$  - vreme merenja uzorka (s) i
- $m$  - masa uzorka (kg).

Specifične aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{40}\text{K}$  i  $^{210}\text{Pb}$  određene su pomoću površina ispod pikova na energijama 661,66 keV, 1460,82 keV i 46,54 keV, respektivno. Treba napomenuti da je površina ispod pika  $^{40}\text{K}$  korigovana za doprinos pika  $^{228}\text{Ac}$  na energiji 1459,13 keV (ta dva pika se ne mogu razdvojiti), koji je izračunat na osnovu aktivnosti  $^{228}\text{Ac}$  koja je određena pomoću površine ispod pika na energiji 911,20 keV.

Merne nesigurnosti određene su na osnovu opšteg zakona propagacije merne nesigurnosti, pri čemu najveći doprinos potiče od statističke nesigurnost površine ispod pikova (u nekim uzorcima i preko 50% za  $^{137}\text{Cs}$ ) i nesigurnosti određivanja krive efikasnosti (5%).

Prosečna godišnja efektivna doza za ingestiju za odrasle osobe koje dnevno piju 200 ml čaja pripremljenog od lekovitog bilja izračunata je na osnovu dobijenih vrednosti za specifične aktivnosti radionuklida  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{40}\text{K}$  i  $^{210}\text{Pb}$ , a prema sledećoj formuli [4, 8, 9]:

$$E_{ing} = A_s H C_d D F_{ing} \quad (2)$$

gde je:

- $E_{ing}$  - individualna godišnja efektivna doza za ingestiju (Sv),
- $A_s$  - specifična aktivnost uzorka (Bq/kg),
- $H$  - količina lekovite biljke koja se konzumira godišnje (kg),
- $C_d$  - koeficijent rastvorljivosti radionuklida pri pripremanju čaja,
- $D F_{ing}$  - koeficijent efektivne doze za ingestiju (Sv/Bq).

Vrednosti koeficijenata rastvorljivosti radionuklida pri pripremanju čaja iznose 0,6 za  $^{137}\text{Cs}$  [10], 0,9 za  $^{40}\text{K}$  [11] i 0,5 za  $^{210}\text{Pb}$  [12].

Koeficijent efektivne doze za ingestiju iznosi:  $1,3 \cdot 10^{-8}$  Sv/Bq za  $^{137}\text{Cs}$ ,  $6,2 \cdot 10^{-9}$  Sv/Bq za  $^{40}\text{K}$  i  $6,8 \cdot 10^{-7}$  Sv/Bq za  $^{210}\text{Pb}$  [13, 14].

Izračunate vrednosti individualne godišnje efektivne doze ingestije sa nesigurnostima, na nivou poverenja  $1\sigma$ , prikazane su u tabeli 3.

### 3. Rezultati i diskusija

Vrednosti specifičnih aktivnosti radionuklida  $^{137}\text{Cs}$  za sve vrste lekovitih biljaka sa područja Majdanpeka su manje od 1,24 Bq/kg. Intervali vrednosti specifičnih aktivnosti radionuklida  $^{40}\text{K}$  i  $^{210}\text{Pb}$  za sve vrste lekovitih biljaka su u opsegu (339 ÷ 627) Bq/kg i (4,04 ÷ 37,4) Bq/kg, respektivno.

Vrednosti individualne godišnje efektivne doze usled ingestije  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{40}\text{K}$  i  $^{210}\text{Pb}$  u čajevima pripremljenim od lekovitog bilja sakupljenim sa područja Majdanpeka su manje od 7,06 nSv za  $^{137}\text{Cs}$ , u opsegu (1,38 ÷ 2,55)  $\mu\text{Sv}$  za  $^{40}\text{K}$ , i u opsegu (1,25 ÷ 13,9)  $\mu\text{Sv}$  za  $^{210}\text{Pb}$  i niži su od 100  $\mu\text{Sv}$ , što predstavlja preporučenu granicu za pojedinačnu

godišnju efektivnu dozu ingestije [15]. Rezultati dobijeni za  $^{137}\text{Cs}$  i  $^{40}\text{K}$  su u skladu sa podacima datim u dostupnoj literaturi [3, 4, 5, 16]. S druge strane, u dostupnoj literaturi nema dovoljno podataka za  $^{210}\text{Pb}$ .

**Tabela 2. Specifične aktivnosti radionuklida  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{40}\text{K}$  i  $^{210}\text{Pb}$  sa mernim nesigurnostima, na nivou poverenja 1  $\sigma$ .**

Domaći naziv vrste	Specifična aktivnost		
	$^{137}\text{Cs}$	$^{40}\text{K}$	$^{210}\text{Pb}$
	(Bq/kg)	(Bq/kg)	(Bq/kg)
Hajdučka trava	$0,42 \pm 0,25$	$548 \pm 28$	$13,7 \pm 2,2$
Pelin	$1,24 \pm 0,28$	$541 \pm 28$	$17,8 \pm 1,9$
Kantarion	$0,97 \pm 0,32$	$339 \pm 18$	$7,03 \pm 1,51$
Nana	$0,48 \pm 0,32$	$627 \pm 32$	$15,1 \pm 2,2$
Majčina dušica	$< 0,3$	$395 \pm 21$	$37,4 \pm 5,4$
Glog	$0,33 \pm 0,24$	$441 \pm 23$	$12,3 \pm 2,0$
Šipak	$< 0,2$	$361 \pm 19$	$4,04 \pm 0,58$

**Tabela 3. Izračunate vrednosti pojedinačne godišnje efektivne doze usled ingestije specifičnih radionuklida iz čajeva sa mernim nesigurnostima, na nivou poverenja 1  $\sigma$ .**

Domaći naziv vrste	Godišnja efektivna doza		
	$^{137}\text{Cs}$	$^{40}\text{K}$	$^{210}\text{Pb}$
	(nSv)	( $\mu\text{Sv}$ )	( $\mu\text{Sv}$ )
Hajdučka trava	$2,39 \pm 1,42$	$2,23 \pm 0,11$	$3,40 \pm 0,55$
Pelin	$7,06 \pm 1,59$	$2,20 \pm 0,11$	$4,42 \pm 0,47$
Kantarion	$5,52 \pm 1,82$	$1,38 \pm 0,07$	$1,74 \pm 0,37$
Nana	$2,73 \pm 1,82$	$2,55 \pm 0,13$	$3,75 \pm 0,55$
Majčina dušica	$< 2,56$	$2,1 \pm 0,13$	$13,9 \pm 2,01$
Glog	$1,88 \pm 1,37$	$1,80 \pm 0,94$	$3,05 \pm 0,50$
Šipak	$< 1,42$	$1,84 \pm 0,97$	$1,25 \pm 0,18$

#### 4. Zaključak

Kako je granična vrednost efektivne doze za ingestiju za pojedinca iz stanovništva 100  $\mu\text{Sv}$  prema članu 6. Pravilnika o granicama sadržaja radionuklida u vodi za piće, životnim namirnicama, stočnoj hrani, lekovima, predmetima opšte upotrebe, građevinskom materijalu i drugoj robi koja se stavlja u promet [15], naši rezultati su pokazali da svakodnevna upotreba čajeva od istraživanih lekovitih biljaka sa područja Majdanpeka ne predstavlja značajan radiološki rizik.

### 5. Zahvalnica

Ovaj rad je urađen u okviru projekata 171018 i 173029 koje finansira Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

### 6. Literatura

- [1] S. M. Fahad, M. J. Abedin, M. M. Hasan, M. O. Rahman, S. A. Islam, M.M. Akramuzzaman, M. Russell, Study of elemental profile of some medicinal plants of Bangladesh. *J. Phys. G Nucl. Partic.* 4(1), 2014, 1-6.
- [2] I. Kosalec, J. Cvek, S. Tomić. Contaminants of medicinal herbs and herbal products. *Arhiv za higijenu rada i toksikologiju* 60(4), 2009, 485-500.
- [3] B. Mitrović, G. Vitorović, G. Pantelić, D. Vitorović, V. Andrić, S. Grdović, ). Aktivnost  $^{137}\text{Cs}$  i  $^{40}\text{K}$  u lekovitom bilju sa područja Zlatibora, *Zbornik XXVII Simpozijuma DZZ SCG, Vrnjačka Banja*, 02. - 04. oktobar 2013, 61 – 64.
- [4] M. Jevremović, N. Lazarević, S. Pavlović, M. Orlić. Radionuclide concentrations in samples of medicinal herbs and effective dose from ingestion of  $^{137}\text{Cs}$  and natural radionuclides in herbal tea products from Serbian market. *Isot. Environ. Health Stud.* 47(1), 2011, 87-92.
- [5] B. Mitrović, J. Ajtić, M. Lazić, N. Krstić, B. Vranješ, M. Vićentijević. Natural and anthropogenic radioactivity in the environment of Kopaonik mountain, Serbia. *Environ. Pollut.* 215, 2016, 273-279.
- [6] Institut za proučavanje lekovitog bilja “Dr Josif Pančić” (<https://www.mocbilja.rs/>).
- [7] CMI, (2012). Radioactive Standard, ER X, Cert. No 9031-OI-427/12. Czech Metrology Institute, Prague.
- [8] Ö. Kiliç, M. Belivermiş, S. Topcuoğlu, Y. Çotuk.  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  radioactivity concentrations and  $^{137}\text{Cs}$  dose rate in Turkish market tea. *Radiat. Eff. Defects S.* 164(2), 2009, 138–143.
- [9] B. M. Mitrović, S. N. Grdović, G. S. Vitorović, D. P. Vitorović, G. K. Pantelić, G. A. Grubić.  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{40}\text{K}$  in some traditional herbal teas collected in the mountain regions of Serbia. *Isot. Environ. Health Stud.* 50(4), 2014, 538-545.
- [10] M. Balonov, C. L. Barnett, M. Belli, et al. Handbook of parameter values for the prediction of radionuclide transfer in terrestrial and freshwater environment, IAEA, Vienna, 2010, ISBN: 9789201130099.
- [11] W. Samolińska, B. Kiczorowska, M. Kwiecień, E. Rusinek-Prystupa. Determination of Minerals in Herbal Infusions Promoting Weight Loss. *Biol. Trace. Elem. Res.* 175(2), 2017, 495-502.
- [12] K. Kametani, H. Ikebuchi, T. Matsumura, H. Kawakami. Ra-226 and Pb-210 concentrations in foodstuffs. *Radioisotopes* 30(12), 1981, 681-683.
- [13] United Nations. Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR).. Sources and effects of ionizing radiation: sources (Vol. 1). United Nations Publications, New York, 2000, ISBN 92-1-142238-8.



- [14] K. Eckerman, J. Harrison, H. G. Menzel, C. H. Clement, ICRP publication 119: compendium of dose coefficients based on ICRP publication 60. *Annals of the ICRP*, 41(1), 2012.
- [15] Pravilnik o granicama sadržaja radionuklida u vodi za piće, životnim namirnicama, stočnoj hrani, lekovima, predmetima opšte upotrebe, građevinskom materijalu i drugoj robi koja se stavlja u promet. Sl. Glasnik br. 36/2018-54; 2018.
- [16] L. A. Najam, N. F. Tafiq, F. H. Kitah. Estimation of Natural Radioactivity of Some Medicinal or Herbal Plants Used in Iraq. *Detection* 3(01), 2015, 1-7.

**THE ACTIVITY CONCENTRATIONS  $^{40}\text{K}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  AND EFFECTIVE DOSE OF INGESTION OF THE RADIONUCLIDES IN SELECTED MEDICINAL HERBS FROM THE REGION OF MAJDANPEK**

**Irina KANDIĆ<sup>1</sup>, Igor ČELIKOVIĆ<sup>1</sup>, Aleksandar KANDIĆ<sup>1</sup>,  
Milan GAVRILOVIĆ<sup>2</sup> and Peđa JANAČKOVIĆ<sup>2</sup>**

- 1) *Institute of Nuclear Sciences "Vinča", University of Belgrade, POB 522, 11000 Belgrade, Serbia, [irina.kandic@vin.bg.ac.rs](mailto:irina.kandic@vin.bg.ac.rs), [icelikovic@vin.bg.ac.rs](mailto:icelikovic@vin.bg.ac.rs), [akandic@vin.bg.ac.rs](mailto:akandic@vin.bg.ac.rs)*
- 2) *University of Belgrade- Faculty of Biology, Chair of Morphology and Systematics of Plants, Studentski trg 16, Belgrade 11000, Serbia, [mgavrilovic@bio.bg.ac.rs](mailto:mgavrilovic@bio.bg.ac.rs), [pjanackovic@bio.bg.ac.rs](mailto:pjanackovic@bio.bg.ac.rs)*

**ABSTRACT**

Medicinal plants have a long history in traditional medicine worldwide. However, their use, as well as the use of plant products, must be controlled in order to avoid the occurrence of undesirable effects on human health. Specific activities of radionuclides  $^{40}\text{K}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{210}\text{Pb}$  in samples of medicinal plants were measured using a semiconductor HPGe spectrometer system. The average annual effective dose for adults due to daily ingestion of 200 ml herbal infusion prepared from medicinal plants is determined. In this paper a radiological analysis of 7 selected medicinal plants from the area of Majdanpek is presented. The values obtained for an effective dose of ingestion are similar to the values published in other studies and are less than 100  $\mu\text{Sv}$ , suggesting that the daily use of herbal infusions from analyzed medicinal plants from the Majdanpek area does not represent a significant radiological health risk.

## GAMASPEKTROMETRIJSKO ISPITIVANJE ČAJEVA IZ UVOZA U PERIODU OD 2015. DO 2018. GODINE

Dubravka VUKOVIĆ<sup>1</sup>, Mihajlo VIĆENTIJEVIĆ<sup>1</sup> i Gordana PANTELIĆ<sup>2</sup>

1) Naučni Institut za veterinarstvo Srbije, Beograd, Srbija, [dubakaiva@gmail.com](mailto:dubakaiva@gmail.com),  
[vicamihajlo@yahoo.com](mailto:vicamihajlo@yahoo.com)

2) Univerzitet u Beogradu, Institut za nuklearne nauke "Vinča", Beograd, Srbija,  
[pantelic@vinca.rs](mailto:pantelic@vinca.rs)

### SADRŽAJ

*U radu su prikazani rezultati gamaspektrometrijskog ispitivanja različitih čajeva poreklom iz uvoza. Ispitana su 162 uzorka u periodu od 2015. godine do 2018. godine. Maksimalna vrednost za <sup>137</sup>Cs je iznosila 5,04 Bq/kg suvog uzorka, što ukazuje da su svi čajevi bili bezbedni za ljudsku upotrebu.*

### 1. Uvod

Sa početkom primene nuklearne energije 1945. godine pa do danas došlo je do ispuštanja određene količine dugoživećih radionuklida u životnu sredinu, uglavnom severnu hemisferu uz dva akcidenta širih razmera (Černobilj 1986. godine i Fukušima 2011. godine). Najznačajniji i najopasniji radionuklidi izbačeni u atomsferu bili su <sup>131</sup>I, <sup>134</sup>Cs i <sup>137</sup>Cs. Prva dva su su kraćeg perioda poluraspada (8,02 dana i 2,07 godina), a <sup>137</sup>Cs je dugoživeći proizvedeni radionuklid (period poluraspada je 30,07 godina).

Nakon akcidenta, ljudi su najviše izloženi radioaktivim materijama koje potiču iz vazduha i padavina, ili od kontaminirane hrane, a manje preko korenovog sistema biljaka. Zbog svog dugog perioda poluraspada <sup>137</sup>Cs ostaje u životnoj sredini, naročito u zemljištu, više decenija, i tada se preko korena prenosi u biljke, odnosno u lanac ishrane životinja i ljudi, pa predstavlja značajan faktor rizika. Merenja u Srbiji su pokazala da je aktivnost <sup>137</sup>Cs u zemljištu značajna i posle 30 godina od akcidenta [1, 2].

Pored redovnog monitoringa radioaktivnosti [2], vrši se stalna kontrola uvoznih uzoraka. Kontrolišu se različiti uzorci hrane značajne za ishranu stanovništva.

Čaj je posle vode drugi napitak po količini koji se konzumira u svetu. Najviše se proizvodi crni i zeleni čaj u mnogim zemljama kao što su Kina, Indija, Turska, Japan, Vijetnam, Argentina i Iran. Procenjuje se da se svake godine proizvede tri miliona tona čaja, a za to su potrebne velike površine. Zbog velike količine lišća na ovim površinama, ispitivanje aktivnosti radionuklida u čaju ekvivalentno je monitoringu radioaktivnih padavina.

Černobilj je doveo do neravnomerne kontaminacije u Evropi, pa i u Turskoj, koja je veliki proizvođač čaja. Plantaže na obali Crnog mora su imale aktivnost <sup>137</sup>Cs i do 30000 Bq/kg suve mase. Te vrednosti su se smanjivale sa svakom žetvom, tako da sada ne prelaze 70 Bq/kg [3].

Akcident u Fukušimi je bio manjih razmera od onog u Černobilju. Merenjima u Evropi nađena je kontaminacija u tragovima [4]. Međutim, Japan je pretrpeo veliku štetu, pa velike količine čaja nisu bile za upotrebu zato što su vrednosti prelazile dozvoljenih 500



Bq/kg. Dozvoljena aktivnost  $^{137}\text{Cs}$  je smanjena posle akcidenta na 100 Bq/kg što je manje nego u svim drugim zemljama.

## 2. Materijal i metod

U periodu od 2015. godine do 2018. godine ispitano je 162 uzorka čaja. Analizirani su čajevi iz uvoza i to crni, zeleni, različite biljne mešavine kao i hibiskus, kamilica, menta, čubar i drugo. Da bi se izvršila homogenizacija, uzorci su mleveni i pakovani u Marinelli posude od 1 litar. Aktivnost radionuklida je određivana gamaspektrometrijskom metodom merenjem na HPGe poluprovodničkom detektoru firme ORTEC, relativne efikasnosti 30% i rezolucije 1,8 keV na energiji od 1332,5 keV. Energetska kalibracija i efikasnost je određena pomoću standarda od 1 litar Češkog metrološkog instituta. Kvalitet merenja je potvrđen učešćem u međulaboratorijskim poređenjima. Vreme merenja je iznosilo 3600 s, a po potrebi su vršena i duža merenja. Osnovno zračenje je mereno 60000 s.

## 3. Rezultati i diskusija

U najvećem broju izmerenih uzoraka čajeva iz uvoza aktivnost  $^{137}\text{Cs}$  je bila ispod granice detekcije. U tabeli 1 su prikazane maksimalne izmerene vrednosti za aktivnost  $^{137}\text{Cs}$  u čajevima po godinama. Maksimalne vrednosti su se kretale od 1,97 Bq/kg suve mase do 5,04 Bq/kg suve mase, bez nekog većeg odstupanja po godinama.

U poređenju sa rezultatima merenja biljnih čajeva sa naših planina Maljen, Zlatibor i Tara vrednosti su slične: 0,9 - 45 Bq/kg, sa izuzetkom borovnice do 120 Bq/kg. Mada treba istaći da to nisu plantažno gajene biljke pa su neke vrednosti veće [5].

Tabela 1. Aktivnost  $^{137}\text{Cs}$  (Bq/kg) u čajevima iz uvoza.

Godina uvoza	Broj uzoraka	Maksimalna izmerena aktivnost $^{137}\text{Cs}$ (Bq/kg)
2015	46	5,04
2016	16	1,97
2017	26	2,37
2018	74	4,50

## 4. Zaključak

Na osnovu prikazanih rezultata merenja radioaktivnosti u čajevima iz uvoza za dati period, može se zaključiti da se u ispitivanim uzorcima može detektovati  $^{137}\text{Cs}$ , ali u veoma malim količinama (manje od 10 Bq/kg) koje ne predstavljaju problem za ljudsku konzumaciju.

### 5. Literatura

- [1] G. Pantelić, M. Eremić-Savković, V. Vuletić. Ispitivanje zemljišta u okviru programa monitoringa radioaktivnosti životne sredine u Srbiji. *Kontaminacija zemljišta Srbije radionukleidima i mogućnost njihove remedijacije, monografija*, urednik/editor dr Mirjana Stojanović, ITNMS, Beograd, 2006, 141-164.
- [2] G. K. Pantelić, M.M. Janković, J. D. Krneta Nikolić, D. J. Todorović, M. M. Rajačić, N. B. Sarap. Akcidenti i monitoring radioaktivnosti, *Černobilj 30 godina posle -monografija*, Beograd, 2016, 19-42.
- [3] M. Zehniger, F. Kammerer, M. Wagmann. Radionuclides in tea and their behaviour in the brewing proces. *J. Environ. Radioac.* 192, 2018, 75-80.
- [4] D. Vuković, M. Vićentijević, G. Pantelić. Gamaspektrometrijska kontrola hrane za ljude i životinje nakon akcidenta u Černobilju. *Černobilj 30 godina posle-monografija*, Beograd, 2016, 136-144.
- [5] B. Mitrović, J. Ajtić, S. Grdović, V. Andrić, M. Lazić, B. Vranješ. Radiocezijum u životnoj sredini planinskih regiona na teritoriji republike Srbije. *Černobilj 30 godina posle-monografija*, Beograd, 2016, 127-135.

### **GAMMA SPECTROMETRY TESTING OF IMPORTED TEA IN PERIOD FROM 2015 TO 2018**

**Dubravka VUKOVIĆ<sup>1</sup>, Mihajlo VIĆENTIJEVIĆ<sup>1</sup> and Gordana PANTELIC<sup>2</sup>**

1) *Institute for veterinary medicine of Serbia, Belgrade, Serbia, [dubakaiva@gmail.com](mailto:dubakaiva@gmail.com), [vicamihajlo@yahoo.com](mailto:vicamihajlo@yahoo.com)*

2) *University of Belgrade, Vinča Institute of Nuclear Sciences, Belgrade, Serbia, [pantelic@vinca.rs](mailto:pantelic@vinca.rs)*

#### APSTRACT

The paper presents the results of gamma spectrometry testing of different imported tea. 162 samples were tested during the period from 2015 to 2018. The maximum value for <sup>137</sup>Cs was 5.04 Bq/kg of dry sample, indicating that the all tea samples were safe for human use.

## SADRŽAJ RADIONUKLIDA U MAHOVINAMA NA PODRUČJU PRIGRADSKIH OPŠTINA GRADA BEOGRADA

**Branislava M. MITROVIĆ, Jelena AJTIĆ, Svetlana GRDOVIĆ  
i Borjana VRANJEŠ**

*Univerzitet u Beogradu, Fakultet veterinarske medicine, Beograd, Srbija,  
radijacija@vet.bg.ac.rs, jelena.ajtic@vet.bg.ac.rs, ceca@vet.bg.ac.rs,  
vranjesb@vet.bg.ac.rs*

### SADRŽAJ

*Mahovine spadaju u grupu bioindikatorskih organizama, jer apsorbuju radionuklide iz padavina i suve depozicije. Kao dobri pokazatelji radioaktivnog zagađenja, u ovom radu mahovine su iskorišćene da se odredi sadržaj prirodnih radionuklida  $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ , i  $^{232}\text{Th}$ , kao i proizvedenog  $^{137}\text{Cs}$ , na području četiri prigradske opštine grada Beograda: Palilula, Zemun, Rakovica i Lazarevac. Uzorci mahovina sa drveća sakupljeni su tokom proleća i jeseni 2010. godine. Posle sušenja i usitnjavanja, uzorci su mereni na niskofonskom High Purity Germanium detektoru relativne efikasnosti 30,3%. Izmerene specifične aktivnosti radionuklida su: 155-270 Bq/kg za  $^{40}\text{K}$ , MDA-38 Bq/kg za  $^{238}\text{U}$ , 5,8-41 Bq/kg za  $^{226}\text{Ra}$ , 5,4-25 Bq/kg za  $^{232}\text{Th}$  i 18-166 Bq/kg za  $^{137}\text{Cs}$ . Između ispitivanih lokacija postoje razlike u sadržaju radionuklida u mahovinama. Na primer, najveći sadržaj prirodnih radionuklida  $^{238}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  i  $^{232}\text{Th}$  detektovan je u mahovinama na lokalitetu Zemun, a najmanji na području Palilule, dok je najveći sadržaj antropogenog radionuklida  $^{137}\text{Cs}$  detektovan na području opštine Lazarevac (160 Bq/kg), a najniži na teritoriji opštine Palilula (21 Bq/kg).*

### 1. Uvod

Mahovine i lišajevi predstavljaju dobre pokazatelje zagađenja životne sredine radionuklidima [1, 2], teškim metalima [1, 3] i pesticidima [1]. Mahovine apsorbuju radionuklide iz padavina i suve depozicije, ne poseduju pravi koren i vaskularni sistem, dugoživeće su i široko rasprostranjene kako u prirodnim staništima, tako i u gradskim i industrijskim zonama. Za potrebe određivanja prisustva polutanata u životnoj sredini najčešće se pristupa tzv. „pasivnom biomonitoringu“ gde se na određenim lokalitetima prikupljaju i analiziraju autohtone vrste mahovina [1].

Prirodni radionuklidi (na primer,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ) prisutni u životnoj sredini mogu migracijom kroz lanac ishrane dospeti i do čoveka kao krajnjeg potrošača i time povećati radijaciono opterećenje stanovništva na određenim lokacijama. Na dodatno povećanje sadržaja prirodnih radionuklida u životnoj sredini mogu uticati ljudske aktivnosti kao što su eksploatacija ruda, naftna i gasna industrija, sagorevanje uglja, metalna i fosfatna industrija [4]. Prirodni radionuklidi koji se na ovaj način unesu u životnu sredinu započinju svoju migraciju kroz lanac ishrane. Kako ne poseduju koren, mahovine apsorbuju polutante iz padavina i suve depozicije. Stoga je sadržaj polutanata u mahovinama dobar pokazatelj prisustva zagađivača u vazduhu i životnoj sredini [5].

Nuklearne probe i akcidenti u nuklearnim elektranama prouzrokovali su kontaminaciju životne sredine fisionim radionuklidima. Jedan od najznačajnijih nuklearnih akcidenata koji se desio krajem prošlog veka, akcident u Černobilju, u Ukrajini 1986. godine, doveo je do oslobađanja  $2 \cdot 10^{18}$  Bq radioaktivnog materijala i kontaminacije širokih razmera. Procenjeno je da je u toku 1986. godine na teritoriji bivše Socijalističke Federativne Republike Jugoslavije deponovano oko 2,4% od ukupno ispuštenih radionuklida (bez inertnih gasova) emitovanih iz oštećenih reaktora, odnosno 5%  $^{131}\text{I}$  i oko 10%  $^{137}\text{Cs}$ . Zbog dugog perioda poluraspada od oko 30 godina, černobiljski  $^{137}\text{Cs}$  je i dalje prisutan u životnoj sredini Republike Srbije, a najviše u brdsko-planinskim regionima [6, 7].

Cilj ovog istraživanja je bio da se u životnoj sredini na području prigradskih opština grada Beograda: opštine Palilula, Zemun, Rakovica i Lazarevac, gamaspektrometrijskom metodom odredi sadržaj prirodnih radionuklida ( $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ) i proizvedenog radionuklida  $^{137}\text{Cs}$  u mahovinama.

## 2. Materijal i metode rada

Gamaspektrometrijskom metodom na HPGe detektorima firme EG&G „ORTEC” određen je sadržaj prirodnih radionuklida ( $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ) i proizvedenog radionuklida  $^{137}\text{Cs}$ , u mahovinama sakupljenim u proleće (april-maj) i jesen (septembar-oktobar) 2010. godine na području opština Palilula (Ovča i Besni Fok), Zemun (Batajnica), Rakovica (Straževica) i Lazarevac (Šopići) (slika 1).



Slika 1. Lokaliteti prigradskih opština Beograda, opštine Palilula, Zemun, Rakovica i Lazarevac, gde su sakupljeni uzorci mahovina.

Uzorci različitih vrsta autohtonih mahovina sa drveća su po dopremanju u laboratoriju čišćeni od nečistoća, sušeni na  $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ , mleveni i pakovani u plastične posude zapremine 200 ml. Svi uzorci su hermetički zatvarani i čuvani najmanje 40 dana radi uspostavljanja radioaktivne ravnoteže između  $^{226}\text{Ra}$  i potomaka radioaktivnog raspada.

Za kalibraciju efikasnosti detektora korišćeni su referentni materijali: IAEA-330 (spanać) i Moha Barna. Vreme merenja uzoraka i fona je bilo 60000 s i 240000 s. Sadržaj  $^{238}\text{U}$  je određivan na osnovu gama linija za  $^{234}\text{Th}$  (63,2 keV i 92,8 keV) i  $^{234\text{m}}\text{Pa}$  (1001 keV);  $^{226}\text{Ra}$  na osnovu gama linija za  $^{226}\text{Ra}$  (186,1 keV),  $^{214}\text{Bi}$  (609,3 keV, 1120,3 keV i 1764,5 keV) i  $^{214}\text{Pb}$  (295,2 keV i 351,9 keV);  $^{232}\text{Th}$  na osnovu gama linija za  $^{228}\text{Ac}$  (338 keV, 911,2 keV i 969 keV);  $^{40}\text{K}$  na osnovu 1460,8 keV linije; i  $^{137}\text{Cs}$  pomoću 661,66 keV gama linije.

### 3. Rezultati i diskusija

Rezultati gamaspektrometrijskog određivanja sadržaja radionuklida  $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  i  $^{137}\text{Cs}$  u uzrocima mahovina sa drveća prikazani su u tabeli 1.

**Tabela 1. Specifična aktivnost  $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  i  $^{137}\text{Cs}$  u uzorcima mahovina sa drveća u prigradskim opštinama grada Beograda (Bq/kg suve mase).**

Lokalitet/ godišnje doba	$^{40}\text{K}$	$^{238}\text{U}$	$^{226}\text{Ra}$	$^{232}\text{Th}$	$^{137}\text{Cs}$
<b>Palilula</b>					
proleće	180 ± 15	<MDA*	5,8 ± 1,2	5,4 ± 1,4	18 ± 1
jesen	270 ± 22	11,1 ± 1,7	8,1 ± 1,5	6,1 ± 1,9	24 ± 1
<b>Zemun</b>					
proleće	226 ± 20	38 ± 6	41 ± 4	25 ± 2	114 ± 5
jesen	253 ± 21	34 ± 5	38 ± 4	21 ± 2	109 ± 5
<b>Rakovica</b>					
proleće	178 ± 15	10,6 ± 2,4	6,9 ± 1,2	6,9 ± 1,0	61 ± 3
jesen	189 ± 15	<MDA*	8,3 ± 1,3	7,8 ± 1,1	57 ± 3
<b>Lazarevac</b>					
proleće	155 ± 14	19,4 ± 3,9	15,3 ± 2,6	8,6 ± 2,6	154 ± 7
jesen	183 ± 15	14,3 ± 3,3	17,6 ± 3,1	10,9 ± 1,1	166 ± 7

\*MDA – minimalna detektibilna aktivnost.

Dobijeni rezultati su potvrdili da je u mahovinama prirodni  $^{40}\text{K}$  dominantni radionuklid [8, 9]. Prosečna specifična aktivnost  $^{40}\text{K}$  u mahovinama na posmatrane četiri lokacije je 204 Bq/kg. Najmanja srednja vrednost za obe sezone zabeležena je na lokalitetu Lazarevac (169 Bq/kg), a najveća na području Zemuna (240 Bq/kg). Najveći sadržaj prirodnih radionuklida  $^{238}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  i  $^{232}\text{Th}$  detektovan je u mahovinama na lokalitetu Zemun, a najmanji na području Palilule. Srednji nivo aktivnosti  $^{238}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  i  $^{232}\text{Th}$  na području prigradskih opština grada Beograda je 21 Bq/kg, 18 Bq/kg i 11 Bq/kg, što je u opsegu merenja drugih autora [2, 10]. Na lokalitetima Zemun i Lazarevac sadržaj  $^{232}\text{Th}$  je bio niži u odnosu na  $^{226}\text{Ra}$ , što je utvrđeno i u istraživanjima koje su sproveli Krmar i saradnici [2]. Sezonske varijacije u sadržaju ispitivanih radionuklida tokom 2010. godine nisu detektovane.

Radioaktivni izotop  $^{137}\text{Cs}$  detektovan je na svim ispitivanim lokacijama, a varijacije u njegovom sadržaju su najverovatnije posledica različitih količina padavina tokom 1986.

godine. Prosečan sadržaj  $^{137}\text{Cs}$  za sva mesta uzorkovanja je 88 Bq/kg. Na lokalitetu Palilula detektovan je najmanji sadržaj (21 Bq/kg), a najveći na području Lazarevca (160 Bq/kg). Istraživanja koja su sprovedi Čučulović i saradnici [10] na području Nacionalnog parka Đerdap pokazala su da se specifična aktivnost  $^{137}\text{Cs}$  kretala u opsegu 9,2-512 Bq/kg, prosečno 111 Bq/kg, što je nešto više u odnosu na naše rezultate kao posledica razlika u kontaminaciji životne sredine.

#### 4. Zaključak

Rezultati merenja sadržaja radionuklida  $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  i  $^{137}\text{Cs}$  u mahovinama sa područja prigradskih opština grada Beograda potvrdili su da su mahovine dobri bioindikatori prisustva radionuklida u životnoj sredini. Sadržaj ispitivanih radionuklida je bio u okviru vrednosti za Republiku Srbiju. Dobijeni rezultati ukazuju na potrebu stalnog praćenja sadržaja radionuklida u mahovinama u cilju procene njihovog sadržaja u životnoj sredini, kao i radijacionog opterećenja kome je stanovništvo izloženo.

#### 5. Zahvalnica

Ovaj rad je finansiran sredstvima Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije (projekti TR31003, TR34013 i III43007).

#### 6. Literatura

- [1] L. Barandovski, M. V. Frontasyeva, T. Stafilov, R. Šajn, T. M. Ostrovnaya. Multi-element atmospheric deposition in Macedonia studied by the moss biomonitoring technique. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 22, 2015, 16077–16097.
- [2] M. Krmar, K. Wattanavatee, D. Radnović, J. Slivka, T. Bhongsuwan, M. V. Frontasyeva, S. S. Pavlov. Airborne radionuclides in mosses collected at different latitudes. *J. Environ. Radioact.* 117, 2013, 45–48.
- [3] S. Chakraborty, G. T. Paratkar. Biomonitoring of trace element air pollution using mosses. *Aerosol Air Qual. Res.* 6, 2006, 247–258.
- [4] Extent of environmental contamination by naturally occurring radioactive material (NORM) and technological options for mitigation, IAEA, Vienna, 2003.
- [5] Air Pollution and Vegetation. ICP Vegetation Annual Report 2015/2016, UK, NERC/Centre for Ecology & Hydrology, 2016.
- [6] B. Mitrović, J. Ajtić, M. Lazić, V. Andrić, N. Krstić, B. Vranješ, M. Vićentijević. Natural and anthropogenic radioactivity in the environment of Kopaonik mountain, Serbia. *Environ. Pollut.* 215, 2016, 273–279.
- [7] S. Dragović, O. Nedić, S. Stanković, G. Bacić. Radiocesium accumulation in mosses from highlands of Serbia and Montenegro: chemical and physiological aspects. *J. Environ. Radioact.* 77, 2004, 381–388.
- [8] A. Čučulović, M. Sabovljević, R. Čučulović, D. Veselinović. Natural radionuclide uptake by mosses in eastern Serbia in 2008-2013. *Arch. Ind. Hyg. Toxicol.* 67, 2016, 31–37.
- [9] S. Dragović, N. Mihailović, B. Gajić. Quantification of transfer of  $^{238}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,

$^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  and  $^{137}\text{Cs}$  in mosses of a semi-natural ecosystem. *J. Environ. Radioact.* 101, 2010, 159–164.

- [10] A. Čučulović, R. Čučulović, S. Nestorović, D. Veselinović. Radioaktivnost u mahovinama i lišajevima sakupljenim 2015. godine u NP Đerdap. *Zbornik radova XXIX Simpozijuma Društva za zaštitu od zračenja Srbije i Crne Gore*, 27-29. septembar, 2017, Srebrno jezero, 99–107.

### CONTENT OF RADIONUCLIDES IN MOSSES IN THE SUBURBAN AREAS OF BELGRADE CITY

**Branislava M. MITROVIĆ, Jelena AJTIĆ, Svetlana GRDOVIĆ  
and Borjana VRANJEŠ**

*University of Belgrade, Faculty of Veterinary Medicine, Belgrade, Serbia,  
[radijacija@vet.bg.ac.rs](mailto:radijacija@vet.bg.ac.rs), [jelena.ajtic@vet.bg.ac.rs](mailto:jelena.ajtic@vet.bg.ac.rs), [ceca@vet.bg.ac.rs](mailto:ceca@vet.bg.ac.rs),  
[vranjesb@vet.bg.ac.rs](mailto:vranjesb@vet.bg.ac.rs)*

#### ABSTRACT

Mosses are biondicators of environmental pollution because they absorb radionuclides from precipitation and dry deposition. In this paper, the ability of mosses to absorb and accumulate radionuclides is used to determine the content of naturally occurring  $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  and  $^{232}\text{Th}$ , and an artificial  $^{137}\text{Cs}$ , in the suburban areas of Belgrade city: the municipalities of Palilula, Zemun, Rakovica and Lazarevac. Samples of moss were collected from trees during the spring and autumn 2010. After drying and milling, the samples were measured at a low-level HPGe detector, relative efficiency of 30.3%. The measured specific activities are: 155-270 Bq/kg for  $^{40}\text{K}$ , MDA-38 Bq/kg for  $^{238}\text{U}$ , 5.8-41 Bq/kg for  $^{226}\text{Ra}$ , 5.4-25 Bq/kg for  $^{232}\text{Th}$  and 18-166 Bq/kg for  $^{137}\text{Cs}$ . The obtained results show differences in the content of radionuclides in mosses across the investigated sites. For example, the highest content of naturally occurring  $^{238}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  and  $^{232}\text{Th}$  is detected in mosses in Zemun, and the lowest in Palilula, while the highest content of the anthropogenic  $^{137}\text{Cs}$  is detected in the municipality of Lazarevac (160 Bq/kg), and the lowest in the municipality of Palilula (21 Bq/kg).



## RADIOAKTIVNOST U MAHOVINAMA I ZEMLJIŠTU SAKUPLJENOM 2018. GODINE U NP ĐERDAP

Ana ČUČULović<sup>1</sup>, Jelena STANOJKOVIĆ<sup>1</sup>, Rodoljub ČUČULović<sup>2</sup>,  
Saša NESTORović<sup>3</sup>, Nenad RADAKOVIĆ<sup>3</sup> i Dragan VESELINOVIĆ<sup>4</sup>

- 1) Univerzitet u Beogradu, Institut za primenu nuklearne energije - INEP, Zemun, Srbija, [anas@inep.co.rs](mailto:anas@inep.co.rs), [jelenas@inep.co.rs](mailto:jelenas@inep.co.rs)
- 2) Univerzitet Union Nikola Tesla, Poslovni i pravni fakultet, Beograd, Srbija
- 3) Javno preduzeće NP Đerdap, Donji Milanovac, Srbija, [office@npdjerdap.org](mailto:office@npdjerdap.org)
- 4) Univerzitet u Beogradu, Fakultet za fizičku hemiju, Beograd, Srbija

### SADRŽAJ

Uzorci mahovina (*Hypnum cupressiforme* Hedw.) (11) i podloga (11) sakupljeni su u junu 2018. godine na teritoriji NP Đerdap sa 10 gazdinskih jedinica (GJ) iz dva reona: Dobra i Đerdap. Specifične aktivnosti (Bq/kg) u podlogama (mahovinama) su: <sup>137</sup>Cs 7,7-502 (17,4-128), <sup>40</sup>K 202-818 (192-436), <sup>226</sup>Ra 14,8-52,7 (4,5-31,6), <sup>232</sup>Th 13,1-60,6 (2,3-41,8) i <sup>238</sup>U 13,9-60,2 (4,8-33,3). Vrednosti transfer faktora (TF) podloga-mahovina su: <sup>137</sup>Cs 0,227-2,260; <sup>40</sup>K 0,332-1,021; <sup>226</sup>Ra 0,114-1,490; <sup>232</sup>Th 0,053-0,916 i <sup>238</sup>U 0,080-1,237. Izračunate srednje vrednosti TF rastu redosledom <sup>238</sup>U < <sup>232</sup>Th < <sup>40</sup>K < <sup>226</sup>Ra < <sup>137</sup>Cs.

### 1. Uvod

Organizmi su stalno izloženi zračenjima, koja se prema mestu nastanka dele na zračenja zemaljskog i kosmičkog porekla. Izvori jonizujućih zračenja prema svojoj genezi i pojavljivanju u životnoj sredini se dele na: prirodne, antropogene i radioaktivni otpad. Prirodni zemaljski radionuklidi (<sup>40</sup>K, <sup>232</sup>Th, <sup>226</sup>Ra, <sup>238</sup>U...) su najčešći i najznačajniji izvori jonizujućeg zračenja. Najveći broj ovih radionuklida formiran je u procesu nukleosinteze, pre nekoliko milijardi godina, imaju dugo fizičko vreme poluraspada i razlikuju se po fizičkim, geohemijskim osobinama, vrstama radioaktivnog raspada, intenzitetima zračenja, izotopskoj obilnosti, načinu pojavljivanja, migraciji i geohemijskim ciklusima [1].

Prirodna radioaktivnost zemljišta zavisi od vrste zračenja i geološke strukture posmatranog prostora. Zemljište je kompleksan polidisperzni heterogeni sistem sačinjen od mineralne komponente, koja se sastoji od čestica nastalih erozivnim dejstvom prirodnih faktora na stene i od organske komponente, koja nastaje uglavnom razlaganjem biljnog materijala. Stene sadrže prirodne radionuklide u različitim koncentracijama, a samim tim i zemljište koje je nastalo njihovim raspadanjem. Nivoi aktivnosti radionuklida u zemljištu zavise od više faktora: mineralnog sastava i fizičko-hemijskih karakteristika zemljišta, meteoroloških uslova i moguće translokacije i migracije radionuklida [2].

Do povećanja koncentracije prirodnih radionuklida u zemljištu može doći usled promena u geološko-geohemijskom sistemu ili antropogenim delovanjem. Prosečne



specifične aktivnosti u zemljištu sveta su:  $^{238}\text{U}$  35 Bq/kg (16-110 Bq/kg),  $^{226}\text{Ra}$  35 Bq/kg (17-60 Bq/kg),  $^{232}\text{Th}$  30 Bq/kg (11-64 Bq/kg),  $^{40}\text{K}$  400 Bq/kg (140-850 Bq/kg) [3].

Osim prirodnih radioizotopa, u životnoj sredini se mogu naći i radionuklidi koji su nastali ljudskim aktivnostima. Najveći broj veštački proizvedenih radioizotopa su fisioni produkti nastali cepanjem teških jezgara (najčešće urana i torijuma), imaju veoma kratko vreme poluraspada i predstavljaju realnu opasnost po ljudsku populaciju. Manji broj radionuklida ima velik period poluraspada ( $^{137}\text{Cs}$  i  $^{90}\text{Sr}$ ) i putem vazдушnih i vodenih strujanja transportuju se na velika rastojanja i deponuju najčešće u zemljištu, vodotokovima i sedimentima.

Radiocezijum-137 može da nastane kao fisioni produkt, da bude proizveden u procesu proizvodnje i testiranja nuklearnog oružja i u nuklearnim reaktorima. Havarijom nuklearne elektrane u Černobilu (1986. god.) ispušteno je  $3,8 \times 10^{16}$  Bq  $^{137}\text{Cs}$ , od čega je 10% dospelo na teritoriju SFRJ [4]. Fizičko vreme poluraspada  $^{137}\text{Cs}$  je 30,2 godine, aktivno se uključuje u lanac ishrane ljudi i životinja preko biljaka i metabolički zamenjuje kalijum.

Za praćenje stanja u životnoj sredini i promena koje se dešavaju tokom vremena, a u cilju preduzimanja odgovarajućih mera predupređenja, zaštite ili poboljšanja njenog kvaliteta koriste se biomonitori. Mahovine su dobri bioindikatori i biomonitori zagađenja životne sredine radionuklidima. Prema literaturnim podacima pretpostavlja se da na Zemlji živi 22000-27000 vrsta mahovina, a u Srbiji raste 661 vrsta mahovine, od čega na teritoriji NP Đerdap 229 vrsta mahovine [5].

## 2. Materijal i metode

Uzorci mahovine *Hypnum cupressiforme* Hedw. (M) (11 uzoraka) i podloge (zemljište na kojem mahovina raste) (P) (11 uzoraka) sakupljeni su u NP Đerdap, iz dva reona: Dobra i Đerdap, sa 10 gazdinskih jedinica, u junu 2018. godine. Nakon dopremanja uzoraka u laboratoriju, uzorci su očišćeni od vidljivih nečistoća, osušeni, homogenizovani i upakovani u Marinelli posude zapremine 0,5L. Posude su, zatim, zatopljene parafinom i ostavljene da odstoje najmanje 40 dana, kako bi se uspostavila radioaktivna ravnoteža između  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{222}\text{Rn}$  i njihovih kratkoživećih potomaka. Masa uzoraka mahovina je bila do 100g, a zemljišta do 600g. Za određivanje specifične aktivnosti radionuklida korišćen je poluprovodnički germanijumski detektor visoke čistoće n tipa, proizvođača ORTEC - AMETEK, USA, sa 8192 kanala, rezolucije 1,65 keV i relativne efikasnosti od 34% na 1,33 MeV za  $^{60}\text{Co}$ . Kalibracija detektora urađena je referentnim radioaktivnim materijalom, matriksa silikonske smole, Czech Metrological Institute Praha (ČMI Praha), 1035-SE-40517-17, tipa MBSS 2, ukupne aktivnosti 59,4 kBq na dan 1.9.2017. god ( $^{241}\text{Am}$ ,  $^{109}\text{Cd}$ ,  $^{139}\text{Ce}$ ,  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{113}\text{Sn}$ ,  $^{85}\text{Sr}$ ,  $^{88}\text{Y}$ ,  $^{51}\text{Cr}$ ), kao i ČMI Praha 1035-SE-40661/14, ukupne aktivnosti 41,9 kBq na dan 1.10.2014. Vreme merenja uzoraka je 60000s. Obrada spektra je vršena pomoću softverskog paketa Gamma Vision 32. Rezultati merenja dati su sa mernom nesigurnošću koja je izražena kao proširena merna nesigurnost za faktor  $k=2$  koji za normalnu raspodelu odgovara nivou poverenja od 95%.

## 3. Резултати и дискусија

У табели 1 приказана је специфична активност  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и  $^{238}\text{U}$  у маховинама врсте *H. cupressiforme* и подлогаму сакупљеном на територији реона Добра и Ђердап и трансфер фактори.

**Табела 1. Специфичне активности  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и  $^{238}\text{U}$  (Bq/kg) у маховинама (M) и подлогаму (P) сакупљеним 2018. године у НП Ђердап, газдинска јединица (GJ), оделjenje и трансфер фактори (TF).**

Br. uz.	GJ, odeljenje	Vrsta uzorka, TF	$^{137}\text{Cs}$	$^{40}\text{K}$	$^{226}\text{Ra}$	$^{232}\text{Th}$	$^{238}\text{U}$
			(Bq/kg)				
<b>Reon Dobra</b>							
1	Čezava, 40a	M	17,4	221	4,9	3,0	4,8
		P	7,7	596	36,0	38,8	59,9
		TF	2,26	0,37	0,14	0,08	0,08
2	Čezava, 36a	M	25,2	203	4,5	2,3	4,9
		P	14,1	612	39,4	43,1	60,2
		TF	1,79	0,33	0,11	0,05	0,08
3	Boljetinka, 66	M	116	436	26,0	14,5	21,7
		P	59,6	427	17,5	16,0	21,8
		TF	1,95	1,02	1,49	0,91	1,00
4	Pecka bara, 33a	M	126	336	18,5	17,9	12,3
		P	273	720	28,1	31,4	26,2
		TF	0,46	0,47	0,66	0,57	0,47
5	Pecka bara, 40a	M	114	419	31,6	41,8	33,3
		P	502	818	52,7	60,6	55,2
		TF	0,23	0,51	0,60	0,69	0,60
6	Leva reka, 30	M	128	360	10,9	21,3	23,6
		P	201	473	22,7	30,2	31,4
		TF	0,64	0,76	0,48	0,71	0,75
<b>Reon Đerdap</b>							
7	Tekija, 78	M	36,5	269	18,9	17,7	7,8
		P	131	592	32,3	37,0	42,3
		TF	0,28	0,45	0,59	0,48	0,18
8	Tekija, 78	M	48,0	296	27,9	22,2	22,7
		P	56,5	724	33,9	33,5	43,9
		TF	0,85	0,41	0,82	0,66	0,52
9	Tekija, Dafin	M	120	334	26,5	23,3	25,1
		P	263	494	32,9	35,7	36,0
		TF	0,46	0,68	0,81	0,65	0,70
10	Manastirički gaj, 8a	M	78,8	192	14,1	12,0	17,2
		P	198	202	14,8	13,1	13,9
		TF	0,40	0,95	0,95	0,92	1,24
11	Crni vrh, 17	M	102	269	31,4	18,5	23,6
		P	310	593	36,6	44,2	49,5
		TF	0,33	0,45	0,86	0,42	0,48

Средње вредности специфичне активности (Bq/kg) у маховинама сакупљеним у реону Добра (Ђердап) су:  $^{137}\text{Cs}$  87,8 (77,1);  $^{40}\text{K}$  329 (272);  $^{226}\text{Ra}$  16,1 (23,8);  $^{232}\text{Th}$  16,8

(18,8) i  $^{238}\text{U}$  16,8 (19,3). Iz rezultata sledi da je srednja vrednost specifične aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  i  $^{40}\text{K}$  u mahovinama sakupljenim u reonu Dobra viša u odnosu na reon Đerdap, dok je za  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  i  $^{238}\text{U}$  viša u mahovinama reona Đerdap.

Srednje vrednosti specifične aktivnosti (Bq/kg) u mahovinama sakupljenim na teritoriji NP Đerdap su za:  $^{137}\text{Cs}$  82,9;  $^{40}\text{K}$  303;  $^{226}\text{Ra}$  19,6;  $^{232}\text{Th}$  17,7 i  $^{238}\text{U}$  17,9. Upoređujući dobijene rezultate iz 2018. godine, sa rezultatima merenja iz prethodnih godina, zaključuje se da je srednja vrednost specifične aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  niža u odnosu na prethodne godine;  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  i  $^{232}\text{Th}$  nešto viša, a  $^{238}\text{U}$  u opsegu prethodnih merenja [6, 7].

Srednja vrednost specifične aktivnosti (Bq/kg) u podlogama sakupljenim u reonu Dobra (Đerdap) je:  $^{137}\text{Cs}$  176 (192);  $^{40}\text{K}$  608 (521);  $^{226}\text{Ra}$  32,7 (30,1);  $^{232}\text{Th}$  36,7 (32,7) i  $^{238}\text{U}$  42,5 (37,1). Iz prikazanih rezultata sledi da je srednja vrednost specifične aktivnosti za  $^{40}\text{K}$  viša u podlogama reona Dobra u odnosu na reon Đerdap, za  $^{226}\text{Ra}$  je približno ista, za  $^{232}\text{Th}$  i  $^{238}\text{U}$  je nešto više u reonu Dobra, a za  $^{137}\text{Cs}$  je viša u reonu Đerdap.

Srednje vrednosti specifične aktivnosti (Bq/kg) u podlogama NP Đerdap su: 183 za  $^{137}\text{Cs}$ ; 568 za  $^{40}\text{K}$ ; 31,5 za  $^{226}\text{Ra}$ ; 34,9 za  $^{232}\text{Th}$  i 40,0 za  $^{238}\text{U}$ . Rezultati ukazuju da je srednja vrednost specifične aktivnosti  $^{40}\text{K}$ ,  $^{232}\text{Th}$  i  $^{238}\text{U}$  viša od prosečnih vrednosti specifične aktivnosti u zemljištu sveta, ali u opsegu minimalnih i maksimalnih svetskih vrednosti [3]. Srednja vrednost specifične aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$ , u podlogama NP Đerdap je niža u odnosu na merenja prethodnih godina. Srednja vrednost specifične aktivnosti svih prirodnih radionuklida u podlogama NP Đerdap je viša u odnosu na merenja prethodnih godina [6, 7], što je posledica uzorkovanja sa teritorija gazdinskih jedinica u NP Đerdap koje do sada nisu bile obuhvaćene istraživanjima.

Transfer faktor (TF) se definiše kao odnos sadržaja datog radionuklida u mahovini (Bq/kg) i sadržaja datog radionuklida u podlozi (Bq/kg) za sušene uzorke [8]. Prenos radionuklida iz podloge u mahovinu zavisi od fizičkih, hemijskih i bioloških faktora, koje određuju osobine radionuklida, tip mahovine i karakteristike zemljišta. Izračunate srednje vrednosti TF rastu redosledom  $^{238}\text{U} < ^{232}\text{Th} < ^{40}\text{K} < ^{226}\text{Ra} < ^{137}\text{Cs}$  ( $0,554 < 0,557 < 0,582 < 0,682 < 0,875$ ).

Znajući, da mahovine ne prave razliku u procesu preuzimanja  $^{40}\text{K}$  i  $^{137}\text{Cs}$  iz biosfere, izračunavanjem diskriminacionog faktora (DF), koji se definiše kao odnos  $\text{TF}(^{137}\text{Cs})$  i  $\text{TF}(^{40}\text{K})$  može se zaključiti koji se radionuklid lakše usvaja. Vrednosti DF u uzorcima su od 0,419 do 6,094. Na osnovu dobijenih vrednosti DF zaključuje se da se  $^{137}\text{Cs}$  efikasnije apsorbovao od  $^{40}\text{K}$  u uzorcima mahovina 1, 2, 8 i 3.

U tabeli 2 prikazani su Pirsonovi koeficijenti korelacije u mahovinama/podlogama sakupljenim 2018. godine na teritoriji NP Đerdap. Tamnije brojke u tabeli 2 govore o jačoj povezanosti među parovima radionuklida.

**Tabela 2. Pirsonov koeficijent korelacije u mahovinama/podlogama sakupljenim 2018. godine na teritoriji NP Đerdap.**

	$^{137}\text{Cs}$	$^{40}\text{K}$	$^{226}\text{Ra}$	$^{232}\text{Th}$	$^{238}\text{U}$
$^{137}\text{Cs}$	1				
$^{40}\text{K}$	0,728/0,267	1			
$^{226}\text{Ra}$	0,517/0,379	0,587/0,817	1		
$^{232}\text{Th}$	0,596/0,461	0,690/0,796	0,754/0,977	1	
$^{238}\text{U}$	0,723/-0,056	0,681/0,658	0,779/0,866	0,846/0,844	1

### 4. Zaključak

Srednja vrednost specifične aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  u mahovinama i podlozi je niža u odnosu na prethodne godine, što govori da novih kontaminacija ovim radionuklidom na teritoriji celog NP Đerdap nije bilo. Srednje vrednosti specifične aktivnosti  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  u mahovinama su nešto više u odnosu na merenja prethodnih godina, a  $^{238}\text{U}$  u opsegu prethodnih merenja. Srednje vrednosti specifične aktivnosti svih prirodnih radionuklida u podlogama mahovina sakupljenim u NP Đerdap su viši u odnosu na merenja prethodnih godina. Visoke vrednosti Pirsonovih koeficijenata među radionuklidima uranijumskog i torijumskog niza u zemljištu ukazuju na njihovo zajedničko poreklo, dok niske između  $^{137}\text{Cs}$  i  $^{40}\text{K}$  ukazuju da ne postoji značajna korelacija između ova dva radionuklida.

### 5. Zahvalnica

Ovaj rad finansiralo je Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije (Projekat broj: III 43009).

### 6. Literatura

- [1] A. Dangić. Geohemijski procesi u prirodi i radionuklidi, *Jonizujuća zračenje iz prirode, Jugoslovensko društvo za zaštitu od zračenja*, Institut za nuklearne nauke Vinča. Jugoslovensko društvo za zaštitu od zračenja, Beograd, 1995, 41-56.
- [2] M. Knežević, R. Milošević, O. Košanin. Production potential of the soil and the basic elements of productivity of the most widely spread sessil types in the U.N.P. Djerdap, *Glasnik šumarskog fakulteta*, 102, 2010, 57-68.
- [3] UNSCEAR (2000), United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. *Sources and Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes*, New York, 2000.
- [4] Savezni komitet za rad, zdravstvo i socijalnu zaštitu, Nivo radioaktivne kontaminacije čovekove sredine i ozračenost stanovništva Jugoslavije 1986. godine usled havarije nuklearne elektrane u Černobilju, Beograd 1987.
- [5] Master plan Turističke destinacije Donje Podunavlje, Vlada Republike Srbije, Ministarstvo ekonomije i regionalnog razvoja, Beograd, 2007.
- [6] A. Čučulović, R. Čučulović, S. Nestorović, N. Radaković, D. Veselinović. Radioactivity in soil and mosses from NP Djerdap in 2017. *PHYSICAL CHEMISTRY 2018, 14th International Conference on Fundamental and Applied Aspects of Physical Chemistry*, Proceedings, 24-28. Septembar 2018, Beograd, 821-824.
- [7] A. Čučulović, R. Čučulović, S. Nestorović, N. Radaković, D. Veselinović, Sadržaj  $^{137}\text{Cs}$  i  $^{40}\text{K}$  u mahovinama i njihovim podlogama sakupljenim 2016. godine u NP Đerdap, *Ecologica*, 26 (93), 2019, 10-13.
- [8] International Atomic Energy Agency, Quantification of Radionuclide Transfers in Terrestrial and Freshwater Environments for Radiological Assessments, IAEA-TECDOC-1616, IAEA, Vienna, 2009.

**RADIOACTIVITY IN SOIL AND MOSSES FROM FROM NP  
ĐERDAP IN 2018**

**Ana ČUČULović<sup>1</sup>, Jelena STANOJKović<sup>1</sup>, Rodoljub ČUČULović<sup>2</sup>,  
Saša NESTORović<sup>3</sup>, Nenad RADAKOVIĆ<sup>3</sup> and Dragan VESELINOVIĆ<sup>4</sup>**

1) *University of Belgrade, INEP, Zemun, Serbia, [anas@inep.co.rs](mailto:anas@inep.co.rs), [jelenas@inep.co.rs](mailto:jelenas@inep.co.rs)*

2) *University of Union Nikola Tesla, Faculty of Business and Law, Belgrade, Serbia*

3) *Public Company Djerdap Nationalni Park, Donji Milanovac, Serbia,  
[office@npdjerdap.org](mailto:office@npdjerdap.org)*

4) *University of Belgrade, Faculty of Physical Chemistry, Belgrade, Serbia*

**ABSTRACT**

Soil samples (11) and moss samples (*Hypnum cupressiforme* Hedw.) (11) were collected in June 2018, on the territory of NP Djerdap from 10 management units (MU), from two regions: Dobra and Đerdap. The specific activity (Bq/kg) in soil (moss) was: <sup>137</sup>Cs 7.7-502 (17.4-128), <sup>40</sup>K 202-818 (192-436), <sup>226</sup>Ra 14.8-52.7 (4.5-31.6), <sup>232</sup>Th 13.1-60.6 (2.3-41.8) and <sup>238</sup>U 13.9-60.2 (4.8-33.3). Values of the soil-moss transfer factor (TF) were: <sup>137</sup>Cs 0.227-2.260; <sup>40</sup>K 0.332-1.021; <sup>226</sup>Ra 0.114-1.490; <sup>232</sup>Th 0.053-0.916 and <sup>238</sup>U 0.080-1.237. The calculated average TF values increase as <sup>238</sup>U < <sup>232</sup>Th < <sup>40</sup>K < <sup>226</sup>Ra < <sup>137</sup>Cs.

## KONCENTRACIJE AKTIVNOSTI RADIONUKLIDA U DISKRIMINANTNOJ ANALIZI I U HIJERARHIJSKOM GRUPISANJU JUŽNOJADRANSKIH MUGILIDA

Nevenka M. ANTOVIĆ<sup>1</sup>, Nikola SVRKOTA<sup>2</sup> i Ivanka ANTOVIĆ

1) Univerzitet Crne Gore, Prirodno-matematički fakultet, Podgorica, Crna Gora,  
[antovicn@yahoo.com](mailto:antovicn@yahoo.com)

2) Centar za ekotoksikološka ispitivanja, Podgorica, Crna Gora,  
[nikola.svrkota@ceti.co.me](mailto:nikola.svrkota@ceti.co.me), [Ivanka\\_Antovic@yahoo.com](mailto:Ivanka_Antovic@yahoo.com)

### SADRŽAJ

*Predmet analize su koncentracije aktivnosti prirodnih radionuklida u svježim uzorcima južnojadranskih mugilida: Chelon labrosus, Mugil cephalus, Liza ramada, Liza saliens i Liza aurata, koje su prethodno izmjerene višedetektorskim spektrometrom PRIPJAT-2M i/ili HPGe spektrometrom. Klasifikacija zasnovana na koncentracijama aktivnosti <sup>40</sup>K i <sup>226</sup>Ra u cijelim jedinkama C. labrosus, M. cephalus, L. ramada i L. saliens urađena je diskriminantnom analizom. Sumarni rezultati klasifikacije pokazali su da je 47% originalno grupisanih slučajeva korektno klasifikovano. U aglomerativnu hijerarhijsku klaster analizu (UPGMA, kvadratne Euklidove distance) uključeni su podaci o koncentracijama aktivnosti <sup>40</sup>K, <sup>226</sup>Ra i potomaka <sup>232</sup>Th u cijelim jedinkama, kao i u pojedinim organima: gastrointestinalnom sistemu, mišićima, skeletu, perajima. U ovu analizu je, uz C. labrosus, M. cephalus, L. ramada i L. saliens, uključena i vrsta L. aurata. Dendrogram, proistekao iz aglomerativnog rasporeda, kao i matrica kvadratnih Euklidovih distanci, pokazali su najveću distancu između jednog mišića C. labrosus i jednog skeleta L. ramada.*

### 1. Uvod

U prethodnim radioekološkim analizama marinske sredine južnog Jadrana (obala Crna Gora) ispitivani su i cipoli (porodica Mugilidae) Evro-mediteranskog rasprostranjenja [1-4]. Mjerenja uzoraka vršena su u Podgorici, višedetektorskim spektrometrom PRIPJAT-2M [5] na Prirodno-matematičkom fakultetu, i koaksijalnim HPGe spektrometrima ORTEC GEM-40190 (relativne efikasnosti 40%) i GEM-30185-S (relativne efikasnosti 35%) u Centru za ekotoksikološka ispitivanja, u okviru projekata Ministarstva nauke Crne Gore.

Imajući u vidu da različite karakteristike unutar jedne grupe ili između različitih grupa mogu poslužiti da se odredi važnost pojedinačnih karaktera u smislu razlikovanja (sličnosti i/ili razlike), recimo PC (*principal components*) analizom, uključujući i koncentracije teških metala u biotskim uzorcima [6], ili <sup>137</sup>Cs u slojevima različitih tipova zemljišta [7], ili prirodnih radionuklida i <sup>137</sup>Cs u zemljištu sa različitih lokacija diskriminantnom analizom [8], ovdje su dati početni rezultati testiranja važnosti koncentracija radionuklida u tom smislu kad su u pitanju svježi uzorci različitih vrsta riba. Odnosno, na osnovu ranije dobijenih podataka o koncentracijama aktivnosti radio-



nuklida testirane su (koristeći SPSS [9]) sličnosti/razlike između pet od ukupno šest vrsta cipola prisutnih u južnom Jadranu.

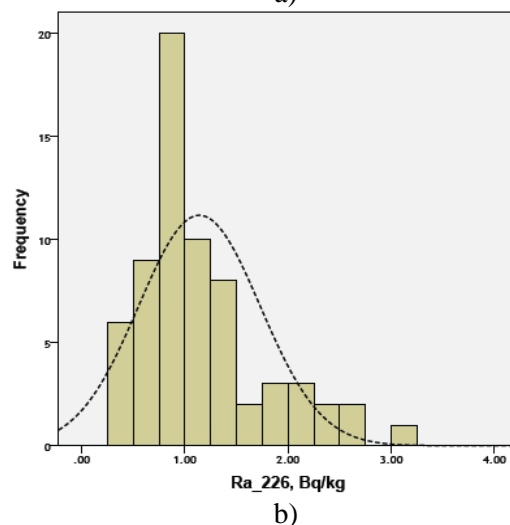
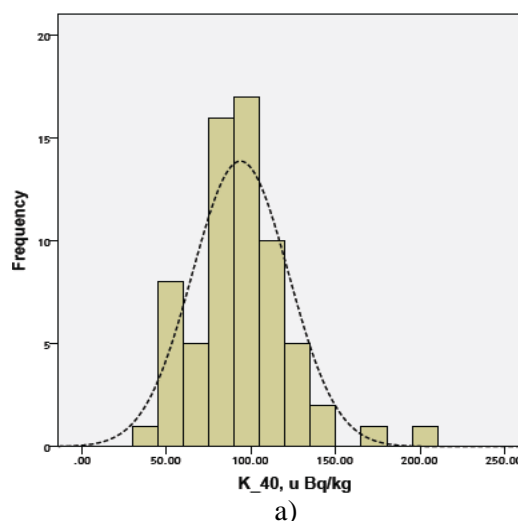
U analize su uključeni: *Chelon labrosus* (Risso, 1826; narodni naziv – putnik), *Mugil cephalus* (Linnaeus, 1758; narodni naziv – glavaš), *Liza ramada* (Risso, 1826; narodni naziv – balavac), *Liza saliens* (Risso, 1810; narodni naziv – dugaš), *Liza aurata* (Risso, 1810; narodni naziv – zlatac).

## 2. Koncentracije aktivnosti <sup>40</sup>K i <sup>226</sup>Ra u cijelim jedinkama

U analize je uključeno: 20 jedinki vrste *C. labrosus*, ukupne dužine između 26,5 cm i 38,3 cm, i ukupne mase između 0,145 kg i 0,543 kg; 14 jedinki vrste *M. cephalus*, ukupne dužine između 25,5 cm i 37,9 cm, i ukupne mase između 0,152 kg i 0,53 kg; 18 jedinki vrste *L. ramada*, ukupne dužine između 25,3 cm i 46,4 cm, i ukupne mase između 0,106 kg i 0,669 kg; 14 jedinki vrste *L. saliens*, ukupne dužine između 25 cm i 33,7 cm, i ukupne mase između 0,0199 kg i 0,318 kg. U tabeli 1 data je deskriptivna statistika za koncentracije aktivnosti <sup>40</sup>K i <sup>226</sup>Ra u pojedinačnim vrstama; dok su na slici 1 predstavljene frekvencije u ukupnom uzorku. Na histogramima je kriva normalne raspodjele.

**Tabela 1. Koncentracije aktivnosti <sup>40</sup>K i <sup>226</sup>Ra u cijelim jedinkama.**

	<sup>40</sup> K (Bq/kg)	<sup>226</sup> Ra (Bq/kg)
<i>C. labrosus</i> (N = 20)		
Srednja vrijednost	90,1	1,09
Standardna greška	5,08	0,11
Medijana	93,4	0,99
Stand. dev.	22,7	0,48
Min–Max	42,5–124	0,43–2,28
<i>M. cephalus</i> (N = 14)		
Srednja vrijednost	103	1,58
Standardna greška	9,14	0,19
Medijana	95,1	1,34
Stand. dev.	34,2	0,71
Min–Max	55–205	0,59–3,09
<i>L. ramada</i> (N = 18)		
Srednja vrijednost	79,8	1,16
Standardna greška	4,60	0,14
Medijana	80,3	0,97
Stand. dev.	19,5	0,60
Min–Max	49,6–121	0,44–2,53
<i>L. saliens</i> (N = 14)		
Srednja vrijednost	107	0,74
Standardna greška	8,65	0,06
Medijana	110	0,72
Stand. dev.	32,4	0,22
Min–Max	53,8–173	0,49–1,25
Ukupno (N = 66)		
Srednja vrijednost	93,6	1,14
Standardna greška	3,50	0,72
Medijana	91,6	0,98
Stand. dev.	28,4	0,59



**Slika 1. Koncentracije aktivnosti <sup>40</sup>K (a) i <sup>226</sup>Ra (b) u jedinkama 4 vrste cipola.**

### 3. Diskriminantna analiza

Poznato je da diskriminantna analiza (DA), kao tehnika klasifikacije, predstavlja multivarijantno testiranje razlika među određenim grupama, i uz opis daje i predikciju. Na osnovu zadatih karakteristika (u našem slučaju koncentracija radionuklida, dok su druge karakteristike, poput mase ili dužine, u ovom primjeru zanemarene) jedinke se klasifikuju u grupe, a moguće je odrediti koja promjenljiva doprinosi klasifikaciji i u kojoj mjeri. Diskriminantna funkcija, zasnovna na linearnoj kombinaciji promjenljivih – prediktora, koje najbolje diskriminišu grupe, daje *model* za grupisanje jedinki. Pritom, grupe se razdvajaju maksimalno moguće, i odbacuju se promjenljive koje malo utiču na razdvajanje. Analiza cijelih jedinki 4 vrste cipola zasnovana na aktivnostima  $^{40}\text{K}$  i  $^{226}\text{Ra}$  pokazala je sljedeće.

Testiranje jednakosti srednjih vrijednosti za grupe, rezultat univarijantnog ANOVA testa, prikazano je u tabeli 2. Manja vrijednost *Wilks's lambda* ukazuje na veću važnost promjenljive za diskriminantnu funkciju.

U tabeli 2 date su i *eigenvalues*, kao vrijednosti koje ukazuju na dio varijanse koja je objašnjena. Veće vrijednosti znače i „jaču” funkciju, tj. veći dio varijanse u zavisnoj promjenljivoj koji ta funkcija može da objasni. Prva funkcija ovdje ima veću moć diferenciranja.

**Tabela 2. Testovi jednakosti srednjih vrijednosti za grupe i *eigenvalues*.**

		<i>Wilks' lambda</i>	<i>Sig. vrijednost</i>		
$^{40}\text{K}$ (Bq/kg)		0,858	0,023		
$^{226}\text{Ra}$ (Bq/kg)		0,781	0,001		
<i>Eigenvalues</i>					
Funkcija	Eigenvalue	% varijanse	Kumulativno (%)	Kanonijska korelacija	
1	0,298	65,8	65,8	0,479	
2	0,155	34,2	100	0,366	

Kanonijska korelacija (u *idealnom* slučaju jednaka 1), kao korelacija između diskriminantnih skorova i nivoa zavisne promjenljive, svojom vrijednošću ukazuje koliko dobro data funkcija vrši diskriminaciju. U našem slučaju koeficijenti nijesu veliki.

Nadalje, testiranje funkcija pokazalo je relativno velike vrijednosti *Wilks' lambda*, 0,667 za funkciju 1 ( $\chi^2 = 25,1$ ), uz *Sig.* vrijednost 0,000, tj.  $<0,05$ , što znači da se srednje vrijednosti grupa razlikuju; i 0,866 za funkciju 2 ( $\chi^2 = 8,93$ ), sa *Sig.* vrijednošću 0,012.

Standardizovani koeficijenti kanonijske diskriminantne funkcije ( $^{40}\text{K}$  – funkcija 1:  $-0,355$ , funkcija 2:  $0,940$ ;  $^{226}\text{Ra}$  – funkcija 1:  $0,969$ , funkcija 2:  $0,265$ ) govore o relativnoj važnosti tzv. nezavisnih promjenljivih (aktivnosti  $^{40}\text{K}$  i  $^{226}\text{Ra}$ ) za predviđanje zavisne promjenljive (vrsta jedinke), a čije velike apsolutne vrijednosti ukazuju na promjenljive sa većom sposobnošću diskriminacije (ovdje:  $^{226}\text{Ra}$  za funkciju 1 i  $^{40}\text{K}$  za funkciju 2, kako to slijedi i iz strukturne matrice, tj. korelacije svake promjenljive i svake funkcije ( $^{226}\text{Ra}$  – funkcija 1:  $0,935$ , funkcija 2:  $0,354$ ;  $^{40}\text{K}$  – funkcija 1:  $-0,263$ , funkcija 2:  $0,965$ )).

Nestandardizovani koeficijenti kanonijske diskriminantne funkcije, tj. nestandardizovani skorovi koji se odnose na nezavisne promjenljive, za  $^{40}\text{K}$  su – funkcija 1:  $-0,013$ , funkcija 2:  $0,035$ ;



za  $^{226}\text{Ra}$  – funkcija 1: 1,819, funkcija 2: 0,497.

Funkcije na centroidama (srednji diskriminantni skorovi za jedinke u grupama), za *C. labrosus* su – funkcija 1: –0,040, funkcija 2: –0,147; za *M. cephalus* – funkcija 1: 0,666, funkcija 2: 0,549; *L. ramada* – funkcija 1: 0,226, funkcija 2: –0,470; *L. saliens* – funkcija 1: –0,899, funkcija 2: 0,265.

Vjerovatnoće (*prior*) korišćene u klasifikaciji računane su iz veličine grupa, kao i koeficijenti klasifikacione (Fišerove linearne diskriminantne) funkcije koji su za

*C. labrosus* –  $^{40}\text{K}$ : 0,118,  $^{226}\text{Ra}$ : 3,289;

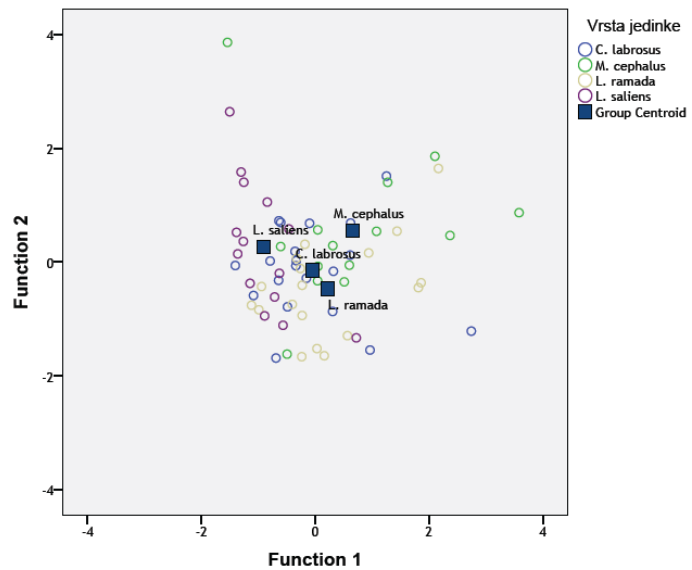
*M. cephalus* –  $^{40}\text{K}$ : 0,133,  $^{226}\text{Ra}$ : 4,919;

*L. ramada* –  $^{40}\text{K}$ : 0,103,  $^{226}\text{Ra}$ : 3,611;

*L. saliens* –  $^{40}\text{K}$ : 0,143,  $^{226}\text{Ra}$ : 1,931.

Konačno, projekcije vrsta cipola u „prostoru” formiranom diskriminantnim funkcijama nakon analize, prikazane su na slici 2. Za centroide koje su bliže, u datom slučaju *C. labrosus* i *L. ramada*, veće su greške klasifikovanja.

Najzad, sumarni rezultati klasifikacije pokazali su da je svega 47% originalno grupisanih slučajeva korektno klasifikovano. Iz ovoga slijedi da je potrebno uraditi dodatne analize, i uključiti i druge vrijednosti – na primjer koncentracije aktivnosti istih radionuklida u pojedinim organima.

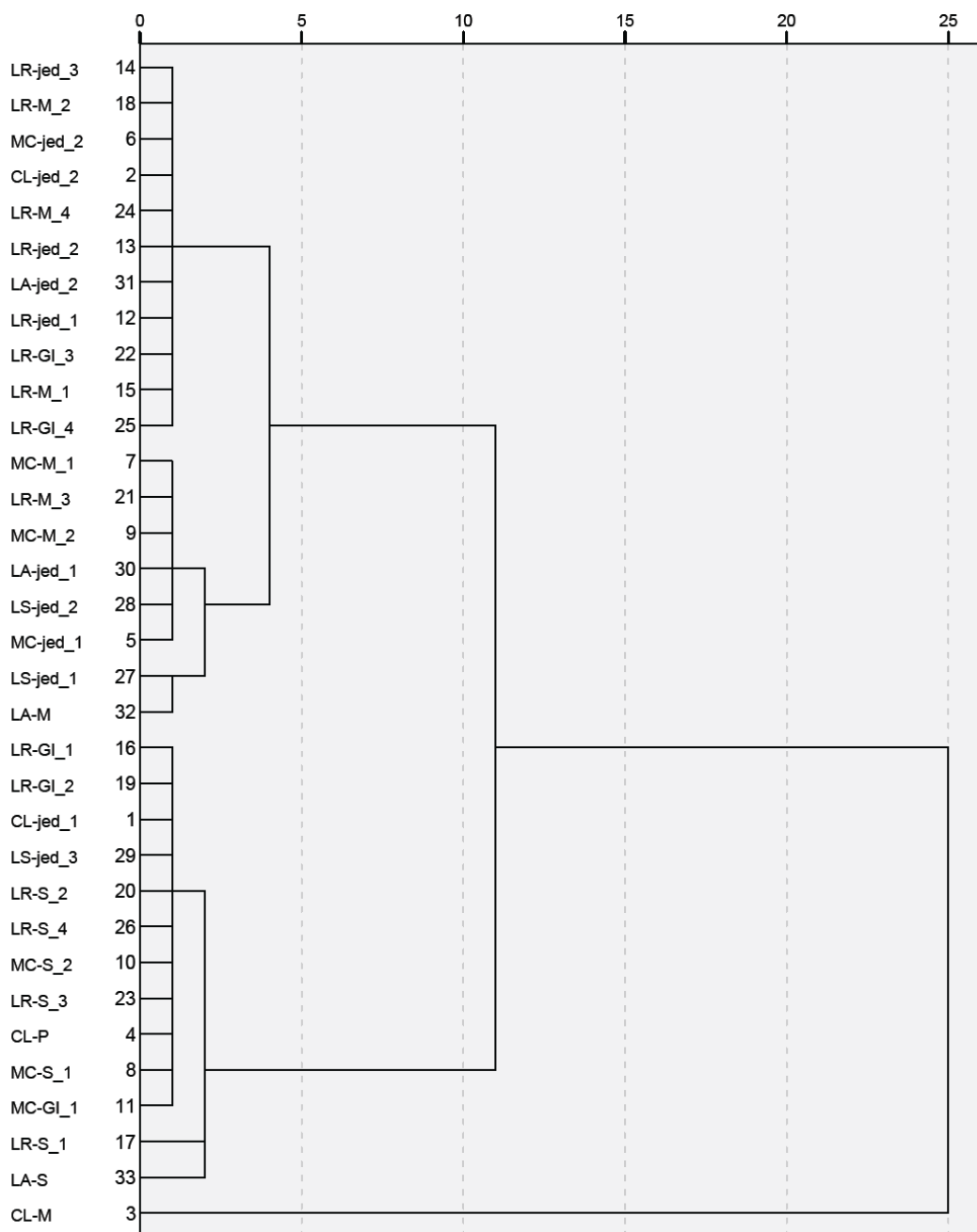


Slika 2. DA četiri vrste cipola na osnovu koncentracija aktivnosti  $^{40}\text{K}$  i  $^{226}\text{Ra}$  u cijelim jedinkama.

#### 4. Hijerarhijska klaster analiza

Aglomerativno hijerarhijsko grupisanje urađeno je sa koncentracijama aktivnosti  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  i  $^{232}\text{Th}$  (njegovih potomaka) u 12 cijelih jedinki (sve prethodno navedene vrste, i dodatno *Liza aurata* (Risso, 1810; narodni naziv – *zlatac*)) i u gastrointestinalnom sistemu (5 uzoraka), mišićima (8 uzoraka), skeletu (7 uzoraka), slobodnom dijelu peraja (1 uzorak). Primijenjena je UPGMA (*unweighted pair-group method using arithmetic averages*), tj. (*average-linkage*-)between-groups metoda, sa kvadratnim Euklidovim distancama kao intervalima. Rezultati u vidu dendrograma prikazani su na slici 3 (skraćene su izvedene iz imena vrste i dodatno ukazuju na tip uzorka). Primijenjeni metod definiše distance između dva klastera – kao srednje distance između svih parova slučajeva (po jedan iz svakog klastera), a dendrogram pokazuje ono što se zaključuje iz aglomerativnog rasporeda. Na dendrogramima su reskalirane distance i prva vertikalna linija označava najmanju distancu, sljedeća označava iste distance za više grupa, itd.

Matrica kvadratnih Euklidovih distanci u datom slučaju pokazuje najveću razliku/distancu između CL-M (mišić *C. labrosus*) i LR-S\_1 (skelet *L. ramada*).



**Slika 3. Dendrogram – prirodni radionuklidi u cijelim jedinkama i organima cipola.**

## 5. Zahvalnica

Statističke analize urađene u ovom radu zasnovane su na rezultatima mjerenja koji su dobijeni u okviru projekata podržanih od strane Ministarstva nauke Crne Gore: 05-1/3-3354 i 01-571.

### 6. Literatura

- [1] I. Antovic, N. M. Antovic. Determination of concentration factors for Cs-137 and Ra-226 in the mullet species *Chelon labrosus* (Mugilidae) from the South Adriatic Sea. *J. Environ. Radioact.* 102, 2011, 713–717.
- [2] I. Antovic, N.M. Antovic. Concentration factors for  $^{226}\text{Ra}$  in the mullet (Mugilidae) species *Mugil cephalus* from the South Adriatic Sea. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 290/1, 2011, 31–37.
- [3] I. Antović, N.M. Antović. Exposure analysis for the mullet species *Liza ramada* (Risso, 1826) from the South Adriatic Sea. In: *Proc. First Intern. Conf. RAD2012*, Niš, Serbia, 2012, 263–266.
- [4] I. Antović, N. Svrkota, N. M. Antović. Radioekološka ispitivanja marinske sredine južnog Jadrana:  $^{137}\text{Cs}$ . *Monografija „Černobilj, 30 godina posle”*, Institut za nuklearne nauke „Vinča” i Društvo za zaštitu od zračenja Srbije i Crne Gore, urednik: dr Gordana Pantelić, Beograd, Srbija, 2016, 155–172.
- [5] С. К. Андрухович, А. В. Берестов, В. И. Гутко, А. М. Хильманович. Высококчувствительные многодетекторные гамма спектрометры ПРИПЯТЬ. Препринт Института физики АН БССР, Минск, 1995.
- [6] Yan-Fei Huang, Lian-Xin Peng, Yuan Liu, Zhi-Feng Zhang, Lu-Yang LV, Gang Zhao. Evaluation of essential and toxic elements concentrations in different parts of buckwheat. *Czech J. Food Sci.* 31/3, 2013, 249–255.
- [7] Z. Ziembik. A new approach to analysis of relationships between  $^{137}\text{Cs}$  activity concentrations in forest soil horizons. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 299/1, 2014, 599–609.
- [8] S. Dragovic, A. Onjia. Classification of soil samples according to geographic origin using gamma-ray spectrometry and pattern recognition methods. *Appl. Radiat. Isot.* 65/2, 2007, 218–224.
- [9] IBM SPSS Statistics (Version 20, 2011), IBM 1989, 2011.

**RADIONUCLIDE ACTIVITY CONCENTRATIONS IN  
DISCRIMINANT ANALYSIS AND HIERARCHICAL  
CLUSTERING OF SOUTH-ADRIATIC MUGILIDAE**

**Nevenka M. ANTOVIĆ<sup>1</sup>, Nikola SVRKOTA<sup>2</sup> and Ivanka ANTOVIĆ**

1) *University of Montenegro, Faculty of Natural Sciences and Mathematics, Podgorica, Montenegro, [antovicn@yahoo.com](mailto:antovicn@yahoo.com)*

2) *Centre for Ecotoxicological Research, Podgorica, Montenegro, [nikola.svrkota@ceti.co.me](mailto:nikola.svrkota@ceti.co.me), [Ivanka\\_Antovic@yahoo.com](mailto:Ivanka_Antovic@yahoo.com)*

**ABSTRACT**

The subject of the analysis are natural radionuclides activity concentrations in fresh samples of the South-Adriatic Mugilidae: *Chelon labrosus*, *Mugil cephalus*, *Liza ramada*, *Liza saliens* and *Liza aurata*, which had been previously measured by the multidetector spectrometer PRIPYAT-2M and/or HPGe spectrometer. A classification based on the <sup>40</sup>K i <sup>226</sup>Ra activity concentrations in whole individuals of *C. labrosus*, *M. cephalus*, *L. ramada* and *L. saliens* was performed by the discriminant analysis. Sum classification results showed 47% original grouped cases as correctly classified. An agglomerative *hierarchical clustering* (average linkage between groups; squared Euclidean distances) has been done with activity concentrations of <sup>40</sup>K, <sup>226</sup>Ra and daughters of <sup>232</sup>Th in whole individuals, as well as in some organs: gastrointestinal system, muscles, skeleton, fins. This analysis included *C. labrosus*, *M. cephalus*, *L. ramada*, *L. saliens*, but also *L. aurata*. Dendrogram, coming from the agglomeration schedule, as well as proximity matrix of the squared Euclidean distances, showed the highest distance between one muscle of *C. labrosus* and one skeleton of *L. ramada*.

## PROCENA RADIOEKOLOŠKIH PARAMETARA ZA RADIOIZOTOP $^{90}\text{Sr}$ U AGROEKOSISTEMU

Nataša B. SARAP, Marija M. JANKOVIĆ, Milica M. RAJAČIĆ,  
Jelena D. KRNETA NIKOLIĆ, Gordana K. PANTELIĆ,  
Dragana J. TODOROVIĆ, Ivana S. VUKANAC i Mirjana B. RADENKOVIĆ  
Univerzitet u Beogradu, Institut za nuklearne nauke "Vinča", Laboratorija za zaštitu od  
zračenja i zaštitu životne sredine, Beograd, Srbija, [natasas@vinca.rs](mailto:natasas@vinca.rs),  
[marijam@vinca.rs](mailto:marijam@vinca.rs), [milica100@vinca.rs](mailto:milica100@vinca.rs), [jnikolic@vinca.rs](mailto:jnikolic@vinca.rs), [pantelic@vinca.rs](mailto:pantelic@vinca.rs),  
[beba@vinca.rs](mailto:beba@vinca.rs), [vukanac@vinca.rs](mailto:vukanac@vinca.rs), [mirar@vinca.rs](mailto:mirar@vinca.rs)

### SADRŽAJ

*Translokacije stabilnih i radioaktivnih izotopa iz jedne u drugu kariku ekološkog sistema, kvantitativno i kvalitativno se opisuju preko određenih ekoloških parametara. Procena radioekološke situacije je sprovedena određivanjem različitih parametara koji predstavljaju objektivne pokazatelje radijacione sigurnosti za ciklus obrade zemljišta i biljne proizvodnje, čime je utvrđena translokacija radionuklida  $^{90}\text{Sr}$  u agroekosistemu ispitivanog područja. U sprovedenoj studiji su prikazani sledeći radioekološki parametri: transfer faktor zemljište - usev, broj stroncijumovih jedinica, koeficijent diskriminacije, koeficijent zaštite i K-parametar. Ovi parametri su izračunati na osnovu specifične aktivnosti radioizotopa  $^{90}\text{Sr}$  i koncentracije ukupnog kalcijuma u zemljištu i usevima. Rezultati izračunavanja radioekoloških parametara su ukazali na sledeće činjenice: najveći deo radioizotopa  $^{90}\text{Sr}$  akumulira se u korenu useva, što potvrđuje da je glavni mehanizam njegove akumulacije resuspenzija iz zemljišta; brzina akumulacije  $^{90}\text{Sr}$  u odnosu na ukupni Ca iz zemljišta zavisi od vrste zemljišta i useva, kao i od koncentracije ukupnog Ca u zemljištu.*

### 1. Uvod

Pojava antropogene radioaktivnosti utiče na izmenu prirodnih ekoloških karakteristika biosfere. U eri napretka nuklearne tehnologije i tehnološkog razvoja, neophodna je kontrola izlaganja stanovništva jonizujućem zračenju, kao i zaštita životne sredine. Radijaciona sigurnost je uslovljena poznavanjem radioekoloških karakteristika biosfere, koje zavise od prisustva radionuklida. Osnovni parametar radijacione sigurnosti stanovništva je permanentna kontrola radioaktivnih supstancija u biosferi. Uvid o kumulativnoj depoziciji i disperziji radioaktivnih supstancija u različitim ekosistemima se dobija određivanjem porekla radioaktivne kontaminacije životne sredine i prostorne raspodele svih potencijalnih izvora radioaktivnog zagađivanja [1,2]. Istraživanja zakonomernosti migracije radioaktivnih fisionih produkata u agroekosistemu, a samim tim i u lancu ishrane, daje mogućnost da se sa određenom tačnošću proceni radijaciona situacija na prostoru izloženom radioaktivnoj kontaminaciji.

Jedan od najznačajnijih radioaktivnih zagađivača životne sredine je antropogeni radioizotop  $^{90}\text{Sr}$ , koji nastaje kao proizvod nuklearne fisije  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$  ili  $^{239}\text{Pu}$  u nuklearnim reaktorima, pri nuklearnim eksplozijama i upotrebi nuklearnog oružja.

Učestvujući u mineralnom metabolizmu živih organizama, ovaj izotop predstavlja bitan radioekološki faktor i glavni je predmet radioekoloških istraživanja i monitoringa životne sredine [3]. Radionuklid  $^{90}\text{Sr}$  je čist beta emiter sa vremenom poluraspada od 28,8 godina i energijom emitovane beta čestice od 0,546 MeV, čijim raspadom nastaje radionuklid  $^{90}\text{Y}$ , takođe čist beta emiter, sa vremenom poluraspada 64,1 h i energijom emitovane beta čestice 2,283 MeV. Između ova dva radionuklida se može uspostaviti stabilna radioaktivna ravnoteža. Emisijom beta čestice,  $^{90}\text{Y}$  prelazi u stabilan izotop cirkonijuma,  $^{90}\text{Zr}$ . Zbog svojih karakteristika: dugog vremena poluraspada i biološkog vremena poluživota, fizičko-hemijske i metaboličke sličnosti sa kalcijumom, visokog stepena apsorpcije iz gastrointestinalnog trakta, kao i spore eliminacije iz koštanog tkiva,  $^{90}\text{Sr}$  pripada grupi ekstremno toksičnih radionuklida [4,5].

Cilj sprovedene studije je da se na osnovu određenih radioekoloških parametara proceni translokacija radioaktivnog izotopa  $^{90}\text{Sr}$  iz jedne u drugu kariku agroekosistema ispitivanog područja. Da bi se omogućila procena ovih parametara, neophodno je bilo analizirati specifične aktivnosti radioizotopa  $^{90}\text{Sr}$  i koncentracije ukupnog kalcijuma u zemljištu i usevima. Izračunavanjem parametara: transfer faktor zemljište-usev, broj stroncijumovih jedinica, koeficijent diskriminacije, koeficijent zaštite i K-parametar, dobijen je objektivni pokazatelj radijacione sigurnosti za ciklus obrade zemljišta i biljne proizvodnje u ispitanom području.

## 2. Eksperimentalni deo

Istraživani prostor je ogledno polje koje se nalazi na Radmilovcu (N: 44° 45', E: 20° 34') u blizini Instituta za nuklearne nauke „Vinča“ i pripada teritoriji grada Beograda. Poljoprivredno zemljište je uzorkovano dva puta godišnje, u kasno proleće i jesen, dok su usevi koji se gaje na tom zemljištu sakupljani jednom godišnje, u sezoni proleće ili leto, zavisno od vrste useva, u periodu 2013-2015. Uzorci zemljišta (oko 2,5 kg) uzorkovani su na dve dubine 0-15 cm i 15-30 cm, pomoću ašova i sonde od nerđajućeg čelika prečnika 10 cm, dok su uzorci useva uzorkovani tako što je uzeta biljka u celini mase oko 2 kg. Uzorkovanje je obavljeno u skladu sa preporukama [6].

Uzorci zemljišta su sušeni u sušnici do konstantne mase na 105 °C, mehanički usitnjeni u mlinu za mlevenje uzoraka i dodatno ručno u avanu sa tučkom, a zatim prosejani kroz sito od nerđajućeg čelika (veličine pora 250 μm), čime su homogenizovani do praha. Dalja priprema za analizu  $^{90}\text{Sr}$  je obuhvatala odmeravanje 120 g ovako pripremljenih suvih uzoraka i mineralizaciju na 500 °C u peći za žarenje. Biljni materijal je sušen na vazduhu i sobnoj temperaturi, minimalno tri nedelje. Osušeni uzorci su zatim usitnjeni i mineralizovani na temperaturi od 450 °C tokom 24 h, u peći za žarenje, metodom suvog spaljivanja. Za potrebe analize  $^{90}\text{Sr}$  koristi se 20 g mineralizovanog biljnog materijala. Za određivanje koncentracije ukupnog kalcijuma homogenizovani prah uzoraka zemljišta i biljnog materijala je rastvoren prema sledećem postupku: 0,5 g uzorka je odmereno u teflonsku kivetu i preliveno sa 7 mL 65%  $\text{HNO}_3$  i 2 mL 35%  $\text{H}_2\text{O}_2$ . Nakon toga je vršeno rastvaranje uzoraka u mikrotalasnom digestionom sistemu (MDS-2100, USA) oko 30 minuta. Rastvoreni ekstrahovani uzorci su filtrirani kroz kvantitativni filter papir „plava traka“ (№ 9.045 851, LLG Labware, Lab Logistics Group GmbH, Francuska) u normalne sudove zapremine 25 mL, koji su potom dopunjeni do merne oznake dejonizovanom vodom.

Analiza specifične aktivnosti  $^{90}\text{Sr}$  u ispitanim uzorcima je izvršena radiohemijskom analitičkom metodom. Primenjena metoda je nestandardna i modifikovana metoda, pa je

u skladu sa tim validovana [7]. Za merenje aktivnosti  $^{90}\text{Sr}$  u uzorcima zemljišta i agrokultura, korišćen je niskofonski  $\alpha/\beta$  gasni proporcionalni brojač Thermo Eberline FHT 770 T (ESM Eberline Instruments GmbH, Erlangen, Germany). Za određivanje koncentracije ukupnog kalcijuma u uzorcima zemljišta i biljnog materijala, primenjena je analitička tehnika, optička emisija spektrometrija sa induktivno spregnutom plazmom (ICP-OES) i uzorci su mereni na ICP-optičkom emisijom spektrometru *iCAP6500 duo* (Thermo Scientific, Cambridge, United Kingdom).

Detaljan prikaz radioekoloških parametara i njihovog izračunavanja je dat u [8]. Transfer faktor zemljište - biljka (*TF*) predstavlja odnos specifične aktivnosti radionuklida u biljnoj kulturi i specifične aktivnosti u odgovarajućem zemljištu. U karikama ekološkog ciklusa postoji diskriminacija radionuklida  $^{90}\text{Sr}$  u odnosu na njegov metabolički analog Ca, tako da se nivo aktivnosti  $^{90}\text{Sr}$  može izraziti i kao odnos aktivnosti  $^{90}\text{Sr}$  i koncentracije Ca, koji se naziva stroncijumova jedinica (*SJ*). Da bi se odredio stepen transfera  $^{90}\text{Sr}$  i Ca iz zemljišta u biljku, izračunava se koeficijent diskriminacije (*KD*), koji predstavlja odnos broja stroncijumovih jedinica u biljci i zemljištu. Koeficijent zaštite (*KZ*) se definiše za  $^{90}\text{Sr}$  i Ca, kao odnos broja stroncijumovih jedinica u zemljištu i biljci, dakle on je recipročna vrednost koeficijenta diskriminacije. U cilju određivanja efekta depozicije radionuklida  $^{90}\text{Sr}$  na ispitivanom lokalitetu, izračunava se K-parametar, koji predstavlja odnos specifičnih aktivnosti  $^{90}\text{Sr}$  u dva ispitivana sloja zemljišta.

### 3. Rezultati i diskusija

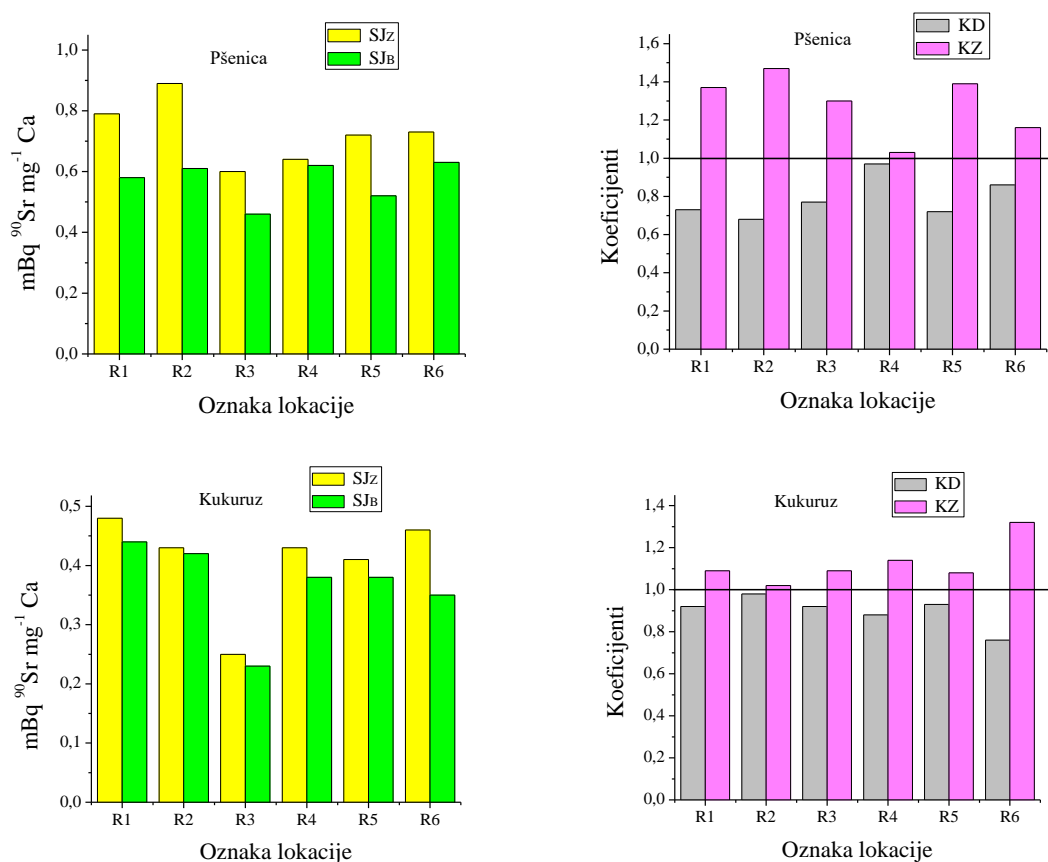
Za potrebe računanja vrednosti transfer faktora, korišćene su specifične aktivnosti  $^{90}\text{Sr}$  za sloj zemljišta 0-15 cm, tj. zemljište oko korena biljke, uzorkovanog u sezoni kada se istovremeno uzorkuje i biljni materijal. Rezultati izračunavanja transfer faktora zemljište - usev (*TF*) za radioizotop  $^{90}\text{Sr}$ , prikazani su u tabeli 1. Prikazani rezultati transfer faktora zemljište - usev za radionuklid  $^{90}\text{Sr}$  ukazuju na to da se najveći deo aktivnosti akumulira u korenu useva, a manji deo translocira u ostale biljne organe, što je u skladu sa literaturnim podacima. Ovo potvrđuje činjenicu da je glavni mehanizam akumulacije dugoživećih radionuklida u usevima, resuspenzija iz zemljišta.

Tabela 1. Transfer faktor (TF) zemljište - usev za  $^{90}\text{Sr}$ .

Deo biljke	TF					
	Oznaka lokacije					
	R1	R2	R3	R4	R5	R6
<b>Pšenica</b>	<b>2013.</b>					
Koren	0,577	0,560	0,550	0,428	0,289	0,322
Ostatak	0,171	0,172	0,181	0,142	0,127	0,140
<b>Kukuruz</b>	<b>2014.</b>					
Koren	0,437	0,494	0,341	0,673	0,439	0,538
Stablo	0,114	0,109	0,099	0,177	0,108	0,138
List	0,215	0,240	0,212	0,322	0,172	0,218
Plod	0,095	0,101	0,092	0,141	0,092	0,113
<b>Pšenica</b>	<b>2015.</b>					
Koren	0,757	0,566	0,579	0,766	0,326	0,378
Ostatak	0,182	0,142	0,142	0,188	0,110	0,134

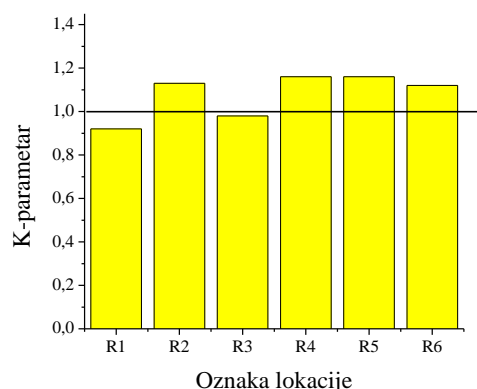


Srednje vrednosti ostalih izračunatih radioekoloških parametara za tri godine praćenja distribucije  $^{90}\text{Sr}$  i Ca u zemljištu i usevima, prikazane su na slici 1, pri čemu su oznake parametara sledeće:  $SJ_Z$  - broj stroncijumovih jedinica za zemljište,  $SJ_B$  - broj stroncijumovih jedinica za biljke,  $KD$  - koeficijent diskriminacije i  $KZ$  - koeficijent zaštite. Srednja vrednost broja stroncijumovih jedinica za zemljište je  $0,60 \text{ mBq } ^{90}\text{Sr mg}^{-1} \text{ Ca}$ , dok su srednje vrednosti broja stroncijumovih jedinica za pšenicu  $0,57 \text{ mBq } ^{90}\text{Sr mg}^{-1} \text{ Ca}$  i  $0,37 \text{ mBq } ^{90}\text{Sr mg}^{-1} \text{ Ca}$  za kukuruz. Sa slike 1 se vidi da su vrednosti koeficijenta diskriminacije manje od jedinice, dok su shodno tome vrednosti koeficijenta zaštite veće od jedinice za oba useva. Može se zaključiti da nema značajnih varijacija u pogledu vrednosti ovih parametara za pšenicu, niti za kukuruz. Vrednosti diskriminacionih koeficijenata dobijene u ovoj studiji su u skladu sa literaturnim vrednostima koje su u intervalu od 0,7 do 1,3 [9].



**Slika 1. Bar-dijagram srednjih vrednosti parametara  $SJ_Z$ ,  $SJ_B$ ,  $KD$  i  $KZ$ .**

Osim navedenih radioekoloških parametara, na osnovu vrednosti specifičnih aktivnosti  $^{90}\text{Sr}$  u dva sloja poljoprivrednog zemljišta (0-15 i 15-30 cm), izračunat je K-parametar, čije su srednje vrednosti prikazane na slici 2. Izračunavanje K-parametra je u cilju određivanja efekta depozicije radionuklida  $^{90}\text{Sr}$  na ispitivanom lokalitetu. Sa slike 2 se može videti da su srednje vrednosti ovog parametra na većini lokacija veće od 1, što dovodi do zaključka da na tim lokacijama postoji opadajući gradijent  $^{90}\text{Sr}$  u ispitivanom profilu zemljišta.



Slika 2. Bar-dijagram srednjih vrednosti K-parametra.

## 4. Zaključak

Izračunate vrednosti transfer faktora zemljište - usev za radionuklid  $^{90}\text{Sr}$  su potvrdile da je resuspenzija iz zemljišta glavni mehanizam akumulacije ovog radionuklida u usevima. Broj stroncijumovih jedinica ukazuje da brzina akumulacije  $^{90}\text{Sr}$  u odnosu na Ca iz zemljišta, zavisi od vrste useva. Vrednosti koeficijenta diskriminacije i zaštite ukazuju takođe na postojanje zavisnosti od vrste useva. Osim toga, ovi parametri zavise od vrste zemljišta, kao i od sadržaja Ca u zemljištu i usevima. Efekat depozicije radionuklida  $^{90}\text{Sr}$  je pokazao negativan gradijent  $^{90}\text{Sr}$  u ispitivanom profilu zemljišta.

## 5. Zahvalnica

Ovaj rad je finansijski podržan od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije, u okviru projekta broj III 43009.

## 6. Literatura

- [1] G. Shaw, Radioactivity in the Environment, Introduction, Vol. 10, Elsevier, 2007.
- [2] S. Dragović, N. Mihailović, B. Gajić. Quantification of transfer of  $^{238}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  and  $^{137}\text{Cs}$  in mosses of a semi-natural ecosystem. *J. Environ. Radioactiv.* 101, 2010, 159-164.
- [3] Programmes and Systems for Source and Environmental Radiation Monitoring, Safety Report Series No. 64, IAEA, Vienna, 2005.
- [4] P. Froidevaux, K. Friedrich-Benet, J.F. Valley. Simple determination of  $^{90}\text{Sr}$  in water in environmental radioactivity survey. *J. Radioanal. Nucl. Ch.* 261, 2004, 295-299.
- [5] R. Jakopič, Lj. Benedik. Tracer Studies on Sr Resin and Determination of  $^{90}\text{Sr}$  in Environmental Samples. *Acta Chim. Slov.* 52, 2005, 297-302.
- [6] Measurements of Radionuclides in Food and the Environment, A guide book, *Technical Report Series No. 295*, IAEA, Vienna, 1989.
- [7] N.B. Sarap, M.M. Janković, G.K. Pantelić. Validation of radiochemical method

for the determination of  $^{90}\text{Sr}$  in environmental samples. *Water Air Soil Pollut.* 225, 2014, 2003-2013.

- [8] N. B. Sarap, Praćenje distribucije radionuklida  $^{90}\text{Sr}$  u poljoprivrednom zemljištu i biljnim kulturama metodom spektrometrije beta zračenja, Doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Fakultet za fizičku hemiju, Beograd, 2017.
- [9] R. Brnović, Stroncijum 90 u životnoj sredini čoveka. Magistarski rad, Farmaceutsko-biokemijski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Beograd, 1972.

## ASSESSMENT OF RADIOECOLOGICAL PARAMETERS FOR RADIOISOTOPE $^{90}\text{Sr}$ IN AGROECOSYSTEM

**Nataša B. SARAP, Marija M. JANKOVIĆ, Milica M. RAJAČIĆ,  
Jelena D. KRNETA NIKOLIĆ, Gordana K. PANTELIĆ,  
Dragana J. TODOROVIĆ, Ivana S. VUKANAC  
and Mirjana B. RADENKOVIĆ**

*University of Belgrade, Vinča Institute of Nuclear Sciences, Radiation and Environmental Protection Department, Belgrade, Serbia, [natasas@vinca.rs](mailto:natasas@vinca.rs), [marijam@vinca.rs](mailto:marijam@vinca.rs), [milica100@vinca.rs](mailto:milica100@vinca.rs), [jnikolic@vinca.rs](mailto:jnikolic@vinca.rs), [pantelic@vinca.rs](mailto:pantelic@vinca.rs), [beba@vinca.rs](mailto:beba@vinca.rs), [vukanac@vinca.rs](mailto:vukanac@vinca.rs), [mirar@vinca.rs](mailto:mirar@vinca.rs)*

### ABSTRACT

Translocation of stable and radioactive isotopes from one to the other chain in the ecosystem is quantitatively and qualitatively described using the certain ecological parameters. The assesment of the radioecological situation is performed by determination of different parameters that represent the objective indicators of radiation safety for processing of soil and plant production. In this way, translocation of  $^{90}\text{Sr}$  in the agro-ecosystem of the investigated areas is determined. The following radiological parameters are presented in this study: soil-crop transfer factor, nuber of strontium units, discrimination coefficient and K-parameter. These parameters are calculated based on the specific activity of  $^{90}\text{Sr}$  and total Ca concentration in soil and crop. The results of the parameter calculation indicated that for the most part,  $^{90}\text{Sr}$  is acumulated in the root of the crop, which confirms that the main path of the acumulation is the resuspension from soil;  $^{90}\text{Sr}$  acumulation rate, in comparison to total Ca in soil, depends on the soil and crop type as well as the total Ca concentration in soil.

## ODREĐIVANJE AKTIVNOSTI RADIONUKLIDA I DOZE OD Ra-226 U BRAZILSKOM ORAHU

**Dorđe LAZAREVIĆ i Ivana MAKSIMOVIĆ**

Javno preduzeće „Nuklearni objekti Srbije“, Beograd, Srbija,  
[djordje.lazarevic@nuklearniobjekti.rs](mailto:djordje.lazarevic@nuklearniobjekti.rs), [ivana.maksimovic@nuklearniobjekti.rs](mailto:ivana.maksimovic@nuklearniobjekti.rs)

### SADRŽAJ

Poznato je da brazilski orah, pored selena koji je koristan u sprečavanju nastajanja ćelija raka u ljudskom telu, sadrži i značajnu koncentraciju radionuklida, kao što su radijum i kalijum. U ovom radu je prikazano određivanje aktivnosti radionuklida K-40, i iz lanca raspada Ra-226 i Th-232 u brazilskom orahu na primeru koji je u prometu na srpskom tržištu. Za određivanje aktivnosti radionuklida u uzorku brazilskog oraha u pakovanju cilindrične geometrije korišćen je poluprovodnički Ge detektor tipa GX5020. Efikasnost detektora za ovu geometriju je određena pomoću softverskog paketa LabSOCS, a korekcionni faktori COI za uključenje efekata sumiranja i oduzimanja broja impulsa pri kaskadnoj emisiji gama zračenja koje je prisutno kod Bi-214 i Tl-208 dobijeni su pomoću programa EFFTRAN. Korišćenjem poznatih konverzionih faktora za izračunavanje efektivne doze za unetu količinu aktivnosti radionuklida Ra-226 ingestijom prema međunarodnim standardima izračunata je godišnja doza od unošenja jednog brazilskog oraha dnevno.

### 1. Uvod

Poslednjih godina zdravstveni radnici preporučuju uzimanje brazilskog oraha zbog visokog sadržaja selena za koji je poznato da je deo antioksidantnih enzima korisnih u sprečavanju nastajanja ćelija raka u ljudskom organizmu [1]. Međutim, pored korisnog selena, brazilski orah sadrži i prirodne radionuklide u značajnoj koncentraciji [2]. Prema klasifikaciji Međunarodne agencije za istraživanje kancera, radionuklidi radijuma ( $^{224}\text{Ra}$ ,  $^{226}\text{R}$  i  $^{228}\text{Ra}$ ) sa svojim potomcima kao i još neki prirodni radionuklidi nalaze se u prvoj grupi kancerogenih agenasa [3]. Zbog toga je nadzor nad ovakvom vrstom hrane preko potreban u zaštiti zdravlja ljudi.

Za potrebe informisanja javnosti, u ovoj studiji je urađeno određivanje koncentracije aktivnosti prisutnih prirodnih radionuklida sa potomcima u uzorku brazilskog oraha koji je u prometu na srpskom tržištu.

### 2. Metodologija

Uzorak brazilskog oraha je stavljen u kartonsku ambalažu određene debljine kartona od celuloze. Formirana je pravilna cilindrična geometrija.

Za merenje aktivnosti radionuklida prisutnih u uzorku brazilskog oraha korišćen je Ge detektor tipa GX5020 [4].

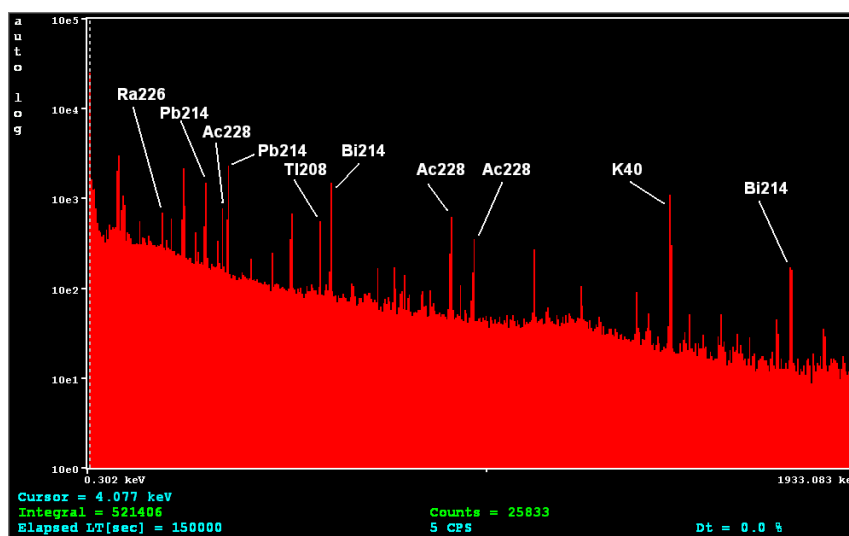
Detektor GX5020 se koristi sa softverom Genie2K [5]. Za određivanje efikasnosti ( $\varepsilon$ ) Ge detektora koristi se softverski paket za numeričku kalibraciju LabSOCS [6], a za određivanje površine pikova radionuklida koristi se numerički algoritam ANGES [7]. Usled pojavljivanja različitih vrednosti aktivnosti za radionuklide  $^{214}\text{Bi}$  i za  $^{208}\text{Tl}$ , uveden je korekcionni faktor COI koji uključuju efekte umanjnja ili uvećanja broja impulsa u korišćenom Ge detektoru usled istovremenog stvaranja parova elektron-šupljina pri kaskadno emitovanim gama linijama. COI faktori dobijeni su pomoću programa EFFTRAN. Prema proceduri za određivanje korekcionnih faktora COI, zasnovanoj na radu Koletova [8], korekcionni faktori COI za zapreminske uzorke određuju se na osnovu COI faktora izmerenih za „tačkaste“ izvore poznate aktivnosti  $A$  u funkciji od rastojanja između izvora i detektora. Za „tačkasti“ izvor i izabrano rastojanje između izvora i detektora, COI faktor se određuje kao odnos izmerene površine pika  $C$  (za izabranu energiju radionuklida sa prinosom  $y$ ) i stvarne površine  $C_{true}$  koja bi se merila u odsustvu umanjnja ili uvećanja broja impulsa:

$$COI = \frac{C}{C_{true}} = \frac{C}{A \cdot \varepsilon \cdot y} \quad (1)$$

gde je  $\varepsilon$  numerički određena efikasnost Ge detektora [9].

### 3. Rezultati i diskusija

Uzorak očišćenog brazilskog oraha od 143,05 g (42 zrna od po 3,4 g) spakovan je u kartonsku ambalažu pravilne cilindrične geometrije, visine 5,3 cm i prečnika 7,4 cm. Na osnovu vrednosti za masu i zapreminu uzorka dobijena je vrednost za gustinu uzorka od  $0,627 \text{ g/cm}^3$ , što odgovara vrednosti za gustinu očišćenog brazilskog oraha objavljenog u radu Nogueira et al. [10]. Brazilski orah čini 17,3% proteina (hemijska formula  $\text{CHON}$ ) i 72,5% ulja (hemijska formula  $\text{H}_3\text{C}$ ) [10]. Korišćenjem hemijskih formula kompozitnih materijala, vrednosti za gustinu brazilskog oraha i vrednosti atomskih masa elemenata C, H, O i N, određene su težinske frakcije navedenih elemenata u brazilskom orahu, koje iznose 0,1668915345; 0,6987512284; 0,06271729786 i 0,07163993913, respektivno.



Slika 1. Spektar odziva Ge detektora GX5020.

Dobijene vrednosti upotrebljene su za izradu modela za numerički proračun efikasnosti Ge detektora za energetske linije radionuklida prisutnih u uzorku brazilskog oraha. Snimljeni energetski spektar radionuklida u uzorku brazilskog oraha korišćenjem Ge detektora tipa GX5020 je dat na slici 1.

Na prikazanom spektru, uočeni su pikovi koji odgovaraju linijama prirodnih radionuklida, kao što su  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  i njegovi potomci  $^{214}\text{Pb}$  i  $^{214}\text{Bi}$ , i radionuklidima iz lanca raspada  $^{232}\text{Th}$  kao što su  $^{228}\text{Ac}$  i  $^{208}\text{Tl}$ .

Za vreme merenja  $t_m = 150000$  s i masu uzorka od 143,05 g, određene su vrednosti za *COI* faktor prema relaciji (1), a za sadržaj aktivnosti radionuklida i njihovu neodređenost u uzorku brazilskog oraha prema relacijama (2) i (3):

$$A = \frac{C}{t_m \cdot y \cdot \varepsilon \cdot COI \cdot m} \quad (2)$$

$$u_{tot} = \sqrt{u_{\varepsilon}^2 + u_{geo}^2 + u_{COI}^2 + u_{pa}^2} \quad (3)$$

kao i minimalna detektibilna aktivnost (*MDA*) na osnovu izmerenog fona (*B*), određena je iz relacije:

$$MDA = \frac{2.71 + 4.65 \cdot \sqrt{B}}{\varepsilon \cdot y \cdot t_m \cdot m} \quad (4)$$

Izračunate vrednosti *COI* faktora, sadržaja aktivnosti i njihova neodređenost, i *MDA* za različite energetske linije prisutnih radionuklida u uzorku od brazilskog oraha date su u tabeli 1.

**Tabela 1. Vrednosti *COI* faktora, aktivnosti i *MDA* prisutnih radionuklida u brazilskom orahu.**

Radionuklid (linija u keV)	<i>COI</i>	$A \pm u_{tot}$ (Bq/g)	<i>MDA</i> (Bq/g)
$^{40}\text{K}$ (1460,8 keV)	1	$0,188 \pm 0,008$	0,0023
$^{226}\text{Ra}$ (186,2 keV)	1	$0,024 \pm 0,002$	0,0029
$^{214}\text{Pb}$ (295,2 keV)	1	$0,022 \pm 0,001$	0,0005
$^{214}\text{Pb}$ (351,9 keV)	1	$0,022 \pm 0,001$	0,0005
$^{214}\text{Bi}$ (609,3 keV)	0,900	$0,022 \pm 0,001$	0,0004
$^{228}\text{Ac}$ (338,3 keV)	0,972	$0,023 \pm 0,001$	0,0007
$^{228}\text{Ac}$ (911,2 keV)	0,974	$0,026 \pm 0,001$	0,0007
$^{228}\text{Ac}$ (968,9 keV)	0,975	$0,026 \pm 0,001$	0,0007
$^{208}\text{Tl}$ (583,2keV)	0,883	$0,0051 \pm 0,0003$	0,0002

Razlika u sadržaju aktivnosti za  $^{226}\text{Ra}$  i njegove potomke  $^{214}\text{Pb}$  i  $^{214}\text{Bi}$  je na nivou neodređenosti, što pokazuje da su ovi nuklidi u ravnoteži.

Prema relaciji i parametrima za opisane scenarije u dokumentu Evropske komisije [11] za proračun efektivne doze od ingestije hrane koja sadrži  $^{226}\text{Ra}$ , 20 g za odraslu osobu i 100 g za dete za godinu dana, dobija se vrednost za godišnju dozu od 23  $\mu\text{Sv}$  za odraslu osobu i 1200  $\mu\text{Sv}$  za dete. Odatle sledi da bi unosom jednog zrna brazilskog oraha (3,4 g) dnevno odrasla osoba za godinu dana primila dozu od oko 35  $\mu\text{Sv}$ , a dete iz starosne grupe 1-2 godine dozu od oko 360  $\mu\text{Sv}$ .

#### 4. Zaključak

U radu je pokazano da se sa aspekta zaštite od zračenja koncentracija prirodnog radionuklida  $^{226}\text{Ra}$  prisutna u brazilskom orahu može smatrati značajnom i shodno tome redovnim konzumiranjem brazilskog oraha dobijamo doprinos dozi koji nije zanemarljiv. Ova činjenica je posebno značajna u slučajevima kada iz zdravstvenih razloga lekari preporučuju redovno uzimanje brazilskog oraha zbog visokog sadržaja selena. Imajući u vidu prisustvo  $^{226}\text{Ra}$  i njegov doprinos dozi, potrebno je da to uzimanje bude kontrolisano.

#### 5. Literatura

- [1] M. S. Dundar, H. Altundag. Selenium content of Turkish hazelnut varieties: Kara Findik, Tombul and Delisava. *J. Food Compos. Anal.* 17, 2004, 707–712.
- [2] P. P. Parekh, A. R. Khan, M. A. Torres, M. E. Kitto. Concentrations of selenium, barium, and radium in Brazil nuts. *J. Food Compos. Anal.* 21, 2008, 332–335.
- [3] M. J. A. Armelin, V. A. Maihara, S. M. F. Cozzolino, P. S. C. Silva and M. Saiki. Activity levels of gamma-emitters in Brazil nuts. *Braz. J. Rad. Sci.* 4(1), 2016, 1–9.
- [4] IARC – International Agency for Research on Cancer, Available in: <https://monographs.iarc.fr/agents-classified-by-the-iarc/>, Last update: 25 March 2019.
- [5] Germanium Detector, User's Manual, Canberra Industries, Inc. 2001.
- [6] Genie 2000, Ver. 3.0, Customization Tools Manual, Canberra Industries, Inc. 2004.
- [7] Model S574 LabSOCS V4.1 Calibration Software, *User's Manual*, Canberra Industries, Inc. 2002 (US Patent 6228664 B1, Compliant with 2009 NRC Regulatory Guide 1.21).
- [8] P. Mishev, B. Vidolov, ANGES, Ver. 1.0, A Specialized Software Utilities for Gamma Ray Spectrometry, *User's Manual*, IAEA, 1991.
- [9] V. P. Koletov, V. V. Atrashkevich, S. J. Gelsema. Estimation of True Coincidence Corrections for Voluminous Sources. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 210, 1996, 183–196.
- [10] I. Đorđević, M. Milošević. Numerička kalibracija Ge detektora za određivanje aktivnosti radionuklida sa izraženim efektima kaskadnog sumiranja i oduzimanja broja impulsa. *Zbornik 56. konferencije za elektroniku, telekomunikacije,*



*računarstvo, automatiku i nuklearnu tehniku ETRAN 2012*, Zlatibor 11-14. jun 2012, NT1.5:1–4.

- [11] Nogueira, R. M., Álvares, V. de S., Ruffato, S., Lopes, R. P., & Silva, J. de S. E. Physical properties of Brazil nuts. *Eng. Agríc.* 34(5), 2014, 963–971.
- [12] Practical Use of the Concepts of Clearance and Exemption, Part I, Guidance on General Clearance Levels for Practices, Radiation Protection 122, European Commission, 2000.

### **MEASUREMENT OF RADIONUCLIDES ACTIVITY AND CALCULATION OF Ra-226 EFFECTIVE DOSE IN BRAZIL NUTS**

**Đorđe LAZAREVIĆ and Ivana MAKSIMOVIĆ**

*Public Company Nuclear Facilities of Serbia, Belgrade, Serbia,*

*[djordje.lazarevic@nuklearniobjekti.rs](mailto:djordje.lazarevic@nuklearniobjekti.rs), [ivana.maksimovic@nuklearniobjekti.rs](mailto:ivana.maksimovic@nuklearniobjekti.rs)*

#### **ABSTRACT**

It is known that Brazil nut, besides selenium which is useful in prevention against cancer cells creation, contains also significant concentration of radionuclides, such as radium and potassium. This paper shows determination of activities of radionuclides K-40, and the Ra-226 and Th-232 decay series in Brazil nuts, using samples from Serbian market. In order to determine radionuclides activity in Brazilian nuts sample in cylinder geometry package, we used semi-conductor Ge detector GX5020. The efficiency of detector for cylinder geometry was determined by software application LabSOCS, while coincidence factors COI which include the effects of decreasing or increasing the number of pulses due to simultaneous creation of electron-hole pairs in the cascade emitted gamma lines for Bi-214 and Tl-208 were calculated by EFFTRAN software. Using the known dose coefficients for calculation of effective dose to the ingested quantity of Ra-226 radioactivity, annual dose from consumption of one Brazil nut per day was calculated according to international standards.

## ODREĐIVANJE AKTIVNOSTI RADIONUKLIDA U PLODU BANANE

**Dorđe LAZAREVIĆ i Miodrag MILENOVIĆ**

Javno preduzeće „Nuklearni objekti Srbije“, Beograd, Srbija,  
[djordje.lazarevic@nuklearniobjekti.rs](mailto:djordje.lazarevic@nuklearniobjekti.rs), [miodrag.milenovic@nuklearniobjekti.rs](mailto:miodrag.milenovic@nuklearniobjekti.rs)

### SADRŽAJ

*U radu je prikazana analiza sadržaja aktivnosti radionuklida K-40 u plodu banane (bez korena) pomoću softverskog paketa za numeričku kalibraciju LabSOCS u Marinelli geometriji. Namera da se upotrebi softver LabSOCS, koji koristi uprošćenu geometriju za Marinelli posudu, je bila osnov da se prethodno uradi verifikacija, tj. poređenje rezultata efikasnosti dobijenih pomoću Monte Karlo programa MCNP-5 za uprošćeni i realni geometrijski model ove posude. Poređenje je urađeno korišćenjem detaljnog i uprošćenog geometrijskog modela, razvijenih u Sektoru za razvoj i primenu nuklearnih tehnologija JP Nuklearni objekti Srbije za Monte Karlo program MCNP-5. Pokazano je da je razlika efikasnosti prema uprošćenom i realnom geometrijskom modelu Marinelli posude manja od neodređenosti kalibracionih izvora ( $\pm 3\%$ ) korišćenih za eksperimentalnu validaciju realnog modela Marinelli posude. Posle ove verifikacije, softver LabSOCS je primenjen za određivanje efikasnosti za Marinelli posudu sa jestivim delom banane zapremine  $1750 \text{ cm}^3$ . Na kraju rada prikazani su rezultati za aktivnost K-40 u plodu banane prosečne mase od 150g.*

### 1. Uvod

Radioaktivnost u uzorcima u životnoj sredini potiče od prisustva prirodnih i veštačkih radionuklida. Radionuklidi koji se nalaze u zemlji i vodi preko biljnih kultura i lanca ishrane dospevaju u ljudski organizam.

Namirnice kao što su banane, čiji je unos široko rasprostranjen, sadrže u značajnoj koncentraciji najzastupljeniji prirodni radionuklid u namirnicama kalijum  $^{40}\text{K}$  [1]. Određivanje sadržaja radionuklida u namirnicama i na osnovu toga preduzimanje mera o korišćenju tih namirnica, značajno je pre svega zbog zaštite ljudskog zdravlja od unutrašnjeg izlaganja zračenju. Ovakva određivanja zahtevaju brze, pouzdane i praktične tehnike analize za različite radionuklide.

Rezultati pouzdanog određivanja aktivnosti radionuklida  $^{40}\text{K}$  u banani uz pomoć brzih softverskih paketa kao što je LabSOCS [6] mogu da predstavljaju polaznu osnovu za utvrđivanje doprinosa dozi od ingestije odnosno od konzumiranja ove namirnice.

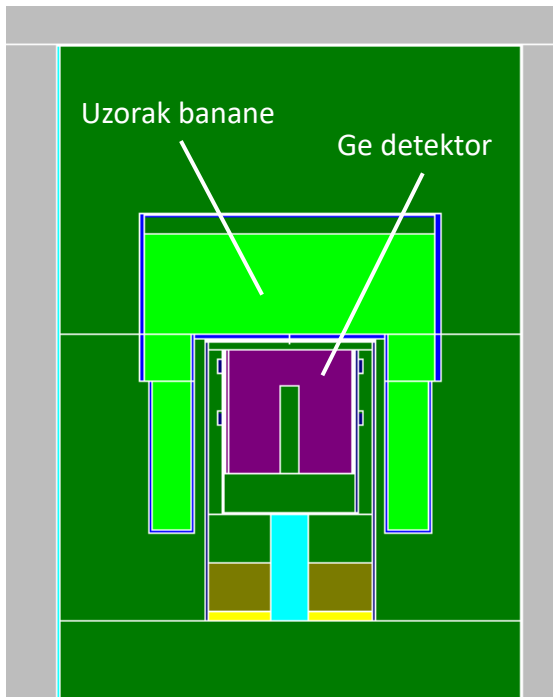
### 2. Metodologija

Uzorak od ploda banane pripremljen je u Marinelli posudi poznate zapremine i mase (dobijena kao razlika sa i bez posude), a na osnovu ovih vrednosti određena je gustina uzorka. Za model uzorka ploda banane uzeta je kombinacija šećera, fruktoze i glukoze, prema formuli  $\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$  [2],[3].

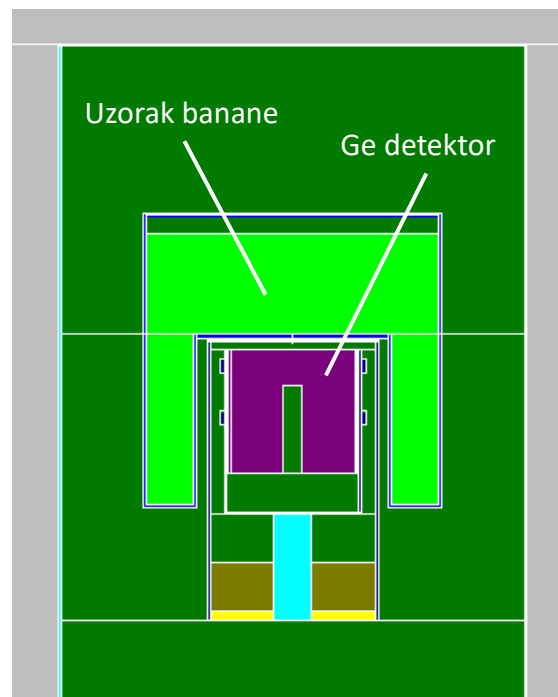
Za merenje aktivnosti radionuklida  $^{40}\text{K}$  u uzorku banane korišćen je Ge detektor tipa GX5020. [4] Određivanje efikasnosti Ge detektora vršeno je korišćenjem numeričkih simulacija i zasnovano je na geometrijskom modelu ovog detektora [9], [2], koji je razvijen u Sektoru za razvoj i primenu nuklearnih tehnologija JP Nuklearni objekti Srbije za Monte Karlo program MCNP-5 [1]. Razlika između efikasnosti dobijenih eksperimentalno i numerički pomoću ovog modela za sertifikovane izvore različitih geometrija („tačkaste“ izvore, izvore u obliku cilindra i izvore Marinelli tipa), u opsegu energija od 30 keV do 2000 keV manja je od eksperimentalne neodređenosti kalibracionih izvora  $\pm 3\%$  [2].

Ideja da se koristi softverski paket za numeričku kalibraciju LabSOCS za analizu sadržaja radionuklida u plodu banane, znači oslanjanje na njegove mogućnosti, vezane za raspoložive geometrijske modele uzoraka. U slučaju uzorka banane u Marinelli geometriji, u softverskom paketu LabSOCS je moguće korišćenje samo uprošćenog geometrijskog modela. Radi provere opravdanosti korišćenja uprošćenog geometrijskog modela u odnosu na realnu geometriju Marinelli-ja sa plodom banane zapremine  $1750\text{ cm}^3$ , u Sektoru za razvoj i primenu nuklearnih tehnologija su razvijena dva geometrijska modela za program MCNP-5.

S obzirom na poznate dimenzije Marinelli posude i na poznat sastav uzorka banane, razvijeni su realan geometrijski model (slika 1) i uprošćeni geometrijski model (slika 2) za Monte Karlo program MCNP-5, kao i uprošćeni geometrijski model za program LabSOCS (slika 3).

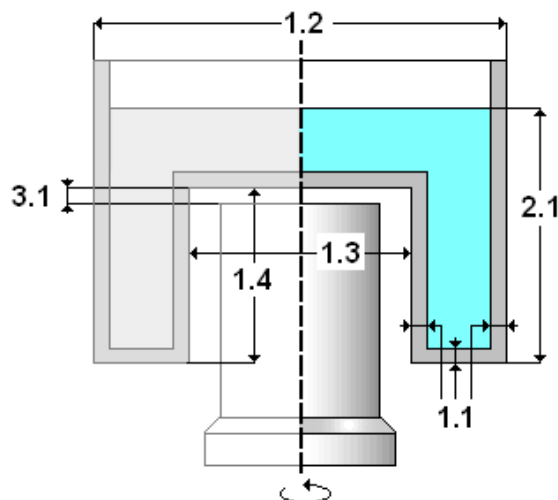


**Slika 1. Vertikalni presek realnog geometrijskog modela Marinelli posude sa uzorkom banane i Ge detektora GX5020 za MCNP-5.**



**Slika 2. Vertikalni presek uprošćenog geometrijskog modela Marinelli posude sa uzorkom banane i Ge detektora GX5020 za MCNP-5.**

## Simplified Marinelli Beaker



Slika 3. Vertikalni presek uprošćenog geometrijskog modela Marinelli posude sa uzorkom banane i Ge detektora GX5020 za LabSOCS.

Detektor GX5020 se koristi sa softverom Genie2K [5], s tim da se za određivanje površine pikova radionuklida koristi numerički algoritam ANGES [7].

Uvođenje korekcionog faktora COI koji uključuju efekte umanjenja ili uvećanja broja impulsa u korišćenom Ge detektoru usled istovremenog stvaranja parova elektron-šupljina pri kaskadno emitovanim gama linijama ovde nije bilo neophodno, s obzirom na to da se ovaj efekat ne javlja za radionuklid  $^{40}\text{K}$  i iznosi  $COI = 1$ .

### 3. Rezultati i diskusija

Korišćenjem menzure izmerena je zapremina uzorka u Marinelli posudi i dobijena je vrednost od  $1750 \text{ cm}^3$ . Na osnovu razlike izmerene mase uzorka u posudi (2042,82 g) i mase prazne posude (197,02 g) dobijena je masa uzorka od 1845,8 g. Izračunata gustina iz odnosa izmerene mase i izmerene zapremine je  $1,055 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ . Ove vrednosti i realne dimenzije Marinelli posude upotrebljene su u realnom geometrijskom modelu za Monte Karlo program MCNP-5, dok je kod uprošćenog geometrijskog modela uz očuvanje gustine i zapremine izvršeno prilagođavanje dimenzija kako bi se postigla što manja razlika u odnosu na rezultate dobijene realnim geometrijskim modelom.

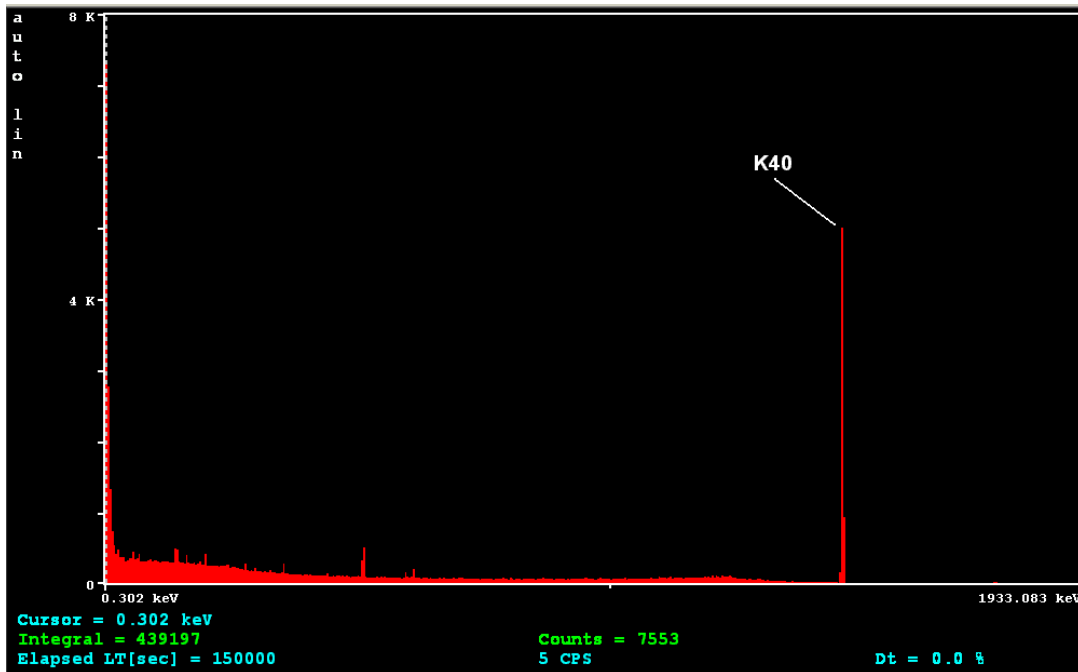
Poređenje rezultata efikasnosti za realnu i za uprošćenu geometriju Marinelli posude za liniju  $^{40}\text{K}$  od 1460,8 keV date su u tabeli 1.

Postignuta mala razlika između efikasnosti dobijenih programom MCNP-5 za realni i uprošćeni geometrijski model Marinelli-ja sa plodom banane je potvrda odnosno verifikacija uprošćenog geometrijskog modela, a razlika od 0,5% predstavlja neodređenost geometrije Marinelli izvora ( $u_{geo}$ ). Dobijena razlika efikasnosti za uprošćenu geometriju u programu LabSOCS i za realnu geometriju u programu MCNP-5 od 3,7% je manja od neodređenosti kalibracije efikasnosti ( $u_c$ ) za liniju od 1460,8 keV radionuklida  $^{40}\text{K}$  u programu LabSOCS (koja iznosi 4% prema uputstvu za ovaj softverski paket).

**Tabela 1. Vrednosti efikasnosti i razlika efikasnosti za realni i uprošćeni model.**

Softverski paket (geometrija Marinelli posude)	Efikasnost, $\epsilon$	Razlika efikasnosti uprošćene i realne geometrije (%)
MCNP-5 (realna geometrija)	$7,806712 \cdot 10^{-3}$	/
MCNP-5 (uprošćena geometrija)	$7,845484 \cdot 10^{-3}$	0,5
LabSOCS (uprošćna geometrija)	$8,09785 \cdot 10^{-3}$	3,7

Snimljeni energetski spektar radionuklida u uzroku ploda banane korišćenjem Ge detektora tipa GX5020 je dat na slici 4. Na prikazanom spektru, pikovi na nižim energijama potiču od aktivacije detektora neutronima, a primećuju se i energetski pikovi koji pripadaju linijama potomaka raspada prisutnog  $^{222}\text{Rn}$  u vazduhu, tj. radionuklidima  $^{214}\text{Pb}$  i  $^{214}\text{Bi}$ . Izraženi pik na energiji 1460,8 keV odgovara liniji  $^{40}\text{K}$  čija je analiza predmet ovog rada pa je i obeležen na slici 4.



**Slika 4. Spektar odziva Ge detektora GX5020.**

Za vreme merenja  $t_m = 150000$  s izmerena površina pika ( $C \pm dC$ ) na liniji 1460,8 keV je iznosila  $26061 \pm 172$  odnosno neodređenost pika je imala vrednost od  $u_{pa} (= 100 \cdot dC/C) = 0,66\%$ . Za prinos  $^{40}\text{K}$  od 10,66%, prema standardnoj relaciji:

$$A = \frac{C}{t_m \cdot y \cdot \epsilon \cdot COI \cdot m} \quad (1)$$

za sadržaj aktivnosti radionuklida  $^{40}\text{K}$  u uzorku banane dobija se  $0,109 \text{ Bq} \cdot \text{g}^{-1}$ .

Ukupna neodređenaost je određena prema relaciji:

$$u_{tot} = \sqrt{u_{\varepsilon}^2 + u_{geo}^2 + u_{COI}^2 + u_{pa}^2} \quad (2)$$

i iznosi 0,004 Bq·g<sup>-1</sup>.

A minimalna detektibilna aktivnost (MDA) prema izmerenom fonu  $B$  iz relacije:

$$MDA = \frac{2.71 + 4.65 \cdot \sqrt{B}}{\varepsilon \cdot y \cdot t_m \cdot m} \quad (3)$$

iznosi 0,0003 Bq·g<sup>-1</sup>.

U celom uzorku mase 1845,8 g množenjem sa sadržajem aktivnosti od (0,109 ± 0,004) Bq·g<sup>-1</sup> dobija se ukupna aktivnost <sup>40</sup>K u uzorku od (201 ± 7) Bq. Prema tome, prosečni plod jedne banane mase 150g sadrži aktivnost od oko 16 Bq radionuklida <sup>40</sup>K. Kako je prema domaćem Pravilniku [10] i međunarodnim standardima [11], konverzioni faktor za očekivanu efektivnu dozu po jediničnom unosu radionuklida <sup>40</sup>K ingestijom 6,2·10<sup>-9</sup> Sv·Bq<sup>-1</sup> sledi da unosom jedne banane čovek primi dozu od (16 Bq · 6,2·10<sup>-9</sup> Sv·Bq<sup>-1</sup>), odnosno približno 0,1 μSv. Dobijeni rezultat odgovara vrednosti neoficijalne veličine tzv. BED (banana equivalent dose) = 10<sup>-7</sup> Sv.

#### 4. Zaključak

U radu je pokazano da softverski paket za numeričku kalibraciju LabSOCS koji koristi uprošćeni geometrijski model za Marinelli posudu sa ispitivanim sadržajem, omogućava određivanje aktivnosti radionuklida <sup>40</sup>K sa neodređenošću koja je jednaka mernoj nesigurnosti standardnih laboratorijskih izvora u Marinelli geometriji (±3%).

#### 5. Zahvalnica

Autori se zahvaljuju kolegi Miodragu Miloševiću za pomoć tokom korišćenja Monte Karlo programa MCNP-5.

#### 6. Literatura

- [1] Sources and Effects of Ionizing Radiation, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, *UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly*, with Scientific Annexes, United Nations, New York (2000).
- [2] Model S574 LabSOCS V4.1 Calibration Software, *User's Manual*, Canberra Industries, Inc. 2002 (US Patent 6228664 B1, Compliant with 2009 NRC Regulatory Guide 1.21).
- [3] Pingyi Zhang, Roy L. Whistler, James N. BeMiller, Bruce R. Hamaker, Banana starch: production, physicochemical properties, and digestibility—a review. *Carbohydr. Polymer*. 59 (4), 2005, 443–458.
- [4] Sucrose. In Wikipedia: The Free Encyclopedia. Wikimedia Foundation Inc. Encyclopedia on-line. Available from <https://en.wikipedia.org/wiki/Sucrose>. Internet. Retrieved 23 June 2019.
- [5] Germanium Detector, *User's Manual*, Canberra Industries, Inc. 2001.
- [6] I. Đorđević, M. Milošević, Numerička kalibracija Ge detektora za određivanje

aktivnosti radionuklida sa izraženim efektima kaskadnog sumiranja i oduzimanja broja impulsa, *Zbornik 56. konferencije za elektroniku, telekomunikacije, računarstvo, automatiku i nuklearnu tehniku ETRAN 2012*, Zlatibor 11-14. juna 2012. godine, str. NT1.5:1-4.

- [7] Miodrag Milošević, Ivana Maksimović, Dragana Čekerevac-Mirković, Merenje aktivnosti uranijuma, *Zbornik 58. konferencije za elektroniku, telekomunikacije, računarstvo, automatiku i nuklearnu tehniku ETRAN 2014*, Vrnjačka Banja, 2 – 5. juna 2014. godine, ISBN 978-86-80509-69-3, str. NT1.3:1-6.
- [8] X-5 Monte Carlo Team, „MCNP — A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5,“ Los Alamos National Laboratory, April 2003 (Revised, October 2005).
- [9] Genie 2000, Ver. 3.0, Customization Tools Manual, Canberra Industries, Inc. 2004.
- [10] P. Misliev, B. Vidolov, ANGES, Ver. 1.0, A Specialized Software Utilities for Gamma Ray Spectrometry, *User's Manual*, IAEA, 1991.
- [11] Pravilnik o granicama radioaktivne kontaminacije lica, radne i životne sredine i načinu sprovođenja dekontaminacije, Službeni glasnik RS br. 38, 2011.
- [12] International Basic Safety Standards for Radiation Protection and Safety of Radiation Sources, Safety Standards Series No. GSR Part 3, International Atomic Energy Agency (IAEA), Vienna, 2014.



## ACTIVITY MEASUREMENT OF RADIONUCLIDE IN BANANA FRUIT

**Đorđe LAZAREVIĆ and Miodrag MILENOVIĆ**

*Public Company Nuclear Facilities of Serbia, Belgrade, Serbia,*

*[djordje.lazarevic@nuklearniobjekti.rs](mailto:djordje.lazarevic@nuklearniobjekti.rs), [miodrag.milenovic@nuklearniobjekti.rs](mailto:miodrag.milenovic@nuklearniobjekti.rs)*

### ABSTRACT

The paper analyzes the content of the activity of the radionuclide K-40 in the fruit of the banana (without banana peels) in the Marinelli beaker using the software package LabSOCS for the numerical calibration. The intention to use the LabSOCS software, which uses the simplified geometry for the Marinelli beakers, was the basis for a prior verification, i.e. comparison of efficiency results obtained with the Monte Carlo MCNP-5 program for the simplified and realistic geometry for the Marinelli beakers. A comparison was made using a detailed and simplified geometric model developed in the Department for Development and Application of Nuclear Technologies of the Public Company Nuclear Facilities of Serbia for the Monte Carlo program MCNP-5. It has been shown that the difference in efficiency according to the simplified and real geometric model of the Marinelli beakers is lower than the uncertainty of the calibration sources ( $\pm 3\%$ ) used for the experimental validation of the realistic geometry model. After this verification, the LabSOCS software was used to determine the efficiency of the Marinelli beaker with the sample of a banana fruits of  $1750 \text{ cm}^3$ . At the end of the paper, the results for the activity of K-40 in the fruit of a banana of average weight of 150g were shown.

## KONCENTRACIJA PRIRODNIH RADIONUKLIDA I $^{137}\text{Cs}$ DUŽ REKE LEPENICE

Jelena M. STAJIĆ, Biljana MILENKOVIĆ i Dragoslav NIKEZIĆ  
Univerzitet u Kragujevcu, Prirodno-matematički fakultet, Kragujevac, Srbija,  
[stajicjelena11052012@gmail.com](mailto:stajicjelena11052012@gmail.com), [bmilenkovic@kg.ac.rs](mailto:bmilenkovic@kg.ac.rs), [nikezic@kg.ac.rs](mailto:nikezic@kg.ac.rs)

### SADRŽAJ

*U radu su predstavljene rezultati gamaspektrometrijske analize uzoraka zemlje prikupljene sa dve dubine (0–15 i 15–30 cm) na 30 lokacija duž reke Lepenice, na teritoriji grada Kragujevca. Određene su specifične aktivnosne koncentracije  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  i  $^{137}\text{Cs}$  čije srednje vrednosti  $\pm$  standardne devijacije iznose:  $24,8 \pm 4,2$ ;  $34,8 \pm 7,1$ ;  $432 \pm 87$  i  $30,8 \pm 24,9$  Bq kg $^{-1}$ , respektivno. Ovi rezultati su u opsegu tipičnom za Srbiju i dobro se slažu sa prosečnim svetskim vrednostima. Koncentracije  $^{226}\text{Ra}$  i  $^{40}\text{K}$  prate normalnu raspodelu. Procenjena je jačina apsorbovane doze u vazduhu, godišnja efektivna doza, eksterni hazard indeks i rizik pojave kancera. Prikazan je koeficijent varijacije između dva sloja. Wilcoxon test je pokazao da nema statistički značajne razlike u koncentracijama merenih radionuklida između slojeva.*

### 1. Uvod

Izlaganje stanovništva prirodnim zračenju najvećim delom potiče od gama zračenja  $^{40}\text{K}$  i terestrijalnih radionuklida koji se javljaju u nizovima  $^{238}\text{U}$  i  $^{232}\text{Th}$ . Koncentracije prirodnih radionuklida u zemljištu zavise od geoloških i geografskih karakteristika ispitivanih područja. Antropogeni radionuklidi koji potiču od nuklearnih proba i akcidenata doprinose manje od 0.5% ukupnoj godišnjoj dozi [1]. Najvažniji antropogeni radionuklid  $^{137}\text{Cs}$  ( $T_{1/2} = 30,1$  godina), koji se još uvek može naći kao perzistentni zagađivač u većini evropskih zemalja, potiče od nuklearnog akcidenta u Černobilju i atmosferskih nuklearnih proba koje su obavljane do 1969. godine od strane „velikih nuklearnih sila“.

Cilj rada je da se predstave rezultati merenja radioaktivnosti u uzorcima zemlje sakupljenim u Kragujevcu, duž reke Lepenice. Reka protiče kroz industrijsku zonu smeštenu u gusto naseljenom delu grada i prikuplja otpadne vode iz domaćinstava i industrijskih pogona. Na desnoj obali reke smešten je kompleks Fiat-ove fabrike automobila i Zastave oružja, koje su bile mete NATO-bombardovanja 1999. Nakon bombardovanja, UNEP je proglasio Kragujevac za jedan od četiri ekološki nepodobnih gradova za život (tzv. „hot-spot“) [2]. U ovom radu su izmerene specifične aktivnosti prirodnih radionuklida i  $^{137}\text{Cs}$  u zemljištu, procenjena je jačina apsorbovane doze u vazduhu, godišnja efektivna doza, eksterni hazard indeks i rizik za pojavu kancera.

### 2. Metod

Uzorci neobrađivane zemlje sakupljeni su na 30 lokacija duž obala reke Lepenice, u neposrednoj blizini industrijskih pogona smeštenih u naseljenom delu grada (slika 1).

Osim Fiat-ove fabrike automobila i Zastave oružja, na obalama Lepenice se nalaze i manja industrijska postrojenja za proizvodnju asfaltne baze, nameštaja, tehničkih lanaca i boja i lakova. Uzorkovanje je vršeno u jesen, 2017. godine. Ukupno 60 uzoraka je prikupljeno sa dve dubine (0–15 and 15–30 cm), korišćenjem IAEA metode uzorkovanja [3]. Nakon uklanjanja kamenja i korenja, uzorci su sušeni do konstantne mase, usitnjeni i zapakovani u Marineli posude zapremine 450 ml. Posude su zaptivene silikonom i ostavljene do uspostavljanja ravnoteže između  $^{226}\text{Ra}$  i njegovih potomaka.



Slika 1. Mapa Kragujevca sa obeleženim lokacijama.

Specifične aktivnosti  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  i  $^{137}\text{Cs}$  su merene gama-spektrometrijski, korišćenjem koaksijalnog HPGe detektora (GEM30-70 ORTEC) čija je relativna efikasnost 30%, a FWHM 1,65 keV za  $^{60}\text{Co}$  na energiji 1,33 MeV. Detektor je smešten u olovnu zaštitu debljine 10 cm. Sistem je kalibrisan sa stadardnom mešavinom izotopa (MBSS 2).

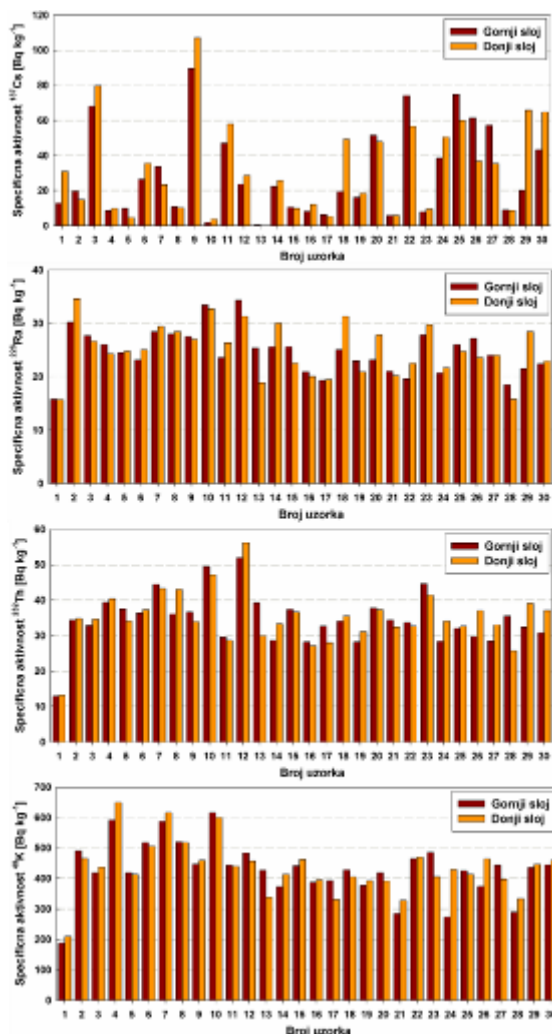
Gama-spektrometrijsko merenje uzoraka je trajalo 6 h. Specifična aktivnost  $^{226}\text{Ra}$  je dobijena na osnovu tri gama-linije njegovih potomaka  $^{214}\text{Pb}$  (351,9 keV) i  $^{214}\text{Bi}$  (609,3 keV i 1764,5 keV). Specifična aktivnost  $^{232}\text{Th}$  je procenjena iz gama-linija  $^{228}\text{Ac}$  (338,3 keV, 911,1 keV i 968,9 keV) i  $^{208}\text{Tl}$  (583,0 keV i 860,6 keV). Za procenu specifične aktivnosti  $^{40}\text{K}$  i  $^{137}\text{Cs}$  su korišćene linije 1460,7 keV i 661,6 keV, respektivno.

### 3. Rezultati i diskusija

Na Slici 2 prikazane su specifične aktivnosti radionuklida izmerene u uzorcima dva sloja zemlje (0-15 cm i 15-30 cm), a deskriptivna statistika aktivnosti (usrednjenih za dva sloja) je data u tabeli 1. Usrednjene specifične aktivnosti  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  i  $^{137}\text{Cs}$  su u opsegu 15,7–33,1; 13,1–54,1; 199–620 i 0,29–98,35 Bq kg<sup>-1</sup>, respektivno. Izmerene aktivnosti su u saglasnosti sa srednjim svetskim vrednostima [4], kao i sa vrednostima izmerenim u drugim delovima Srbije [5,6]. Rezultati su takođe uporedivi sa vrednostima prethodno izmerenim u drugim delovima grada Kragujevca [7,8].

Na osnovu Shapiro-Wilk testa normalnosti specifične aktivnosti  $^{226}\text{Ra}$  i  $^{40}\text{K}$  (p=0,764 i 0,109, respektivno) imaju normalnu raspodelu za razliku od  $^{232}\text{Th}$  (p=0,009) i  $^{137}\text{Cs}$  (p=0,015). Razlike između slojeva za prirodne radionuklide su zanemarljive; koeficijent varijacije (CV) za  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  i  $^{40}\text{K}$  kreće se u opsegu 0 – 21%, 1 – 23% i 0 – 31%, respektivno (slika 3). Wilcoxon test je korišćen da se porede specifične aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  u gornjem i donjem sloju zemlje. Nije uočena statistički značajna razlika (Z=-0,919 i

p=0,358) iako postoje velike varijacije aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  između dva sloja kod velikog broja uzoraka. Koeficijent varijacije kreće se od 1% do 141%, kao što je predstavljeno na slici 3.



Slika 2. Specifične aktivnosti radionuklida merene u dva sloja: gornji (0-15 cm) i donji (0-15 cm).

Tabela 1. Deskriptivna statistika specifičnih aktivnosti ( $\text{Bq kg}^{-1}$ ), godišnje efektivne doze ( $\mu\text{Sv}$ ), rizika pojave kancera i eksternog hazard indeksa.

	Min	Max	Medijana	Srednja vrednost	SD	Skewness	Kurtosis	p*
$^{226}\text{Ra}$	15,7	33,0	25,0	24,8	4,2	0,033	-0,044	0,764
$^{232}\text{Th}$	13,1	54,1	34,3	34,8	7,1	-0,011	3,673	0,009
$^{40}\text{K}$	199,0	620,5	424,5	432,3	87,3	0,033	1,509	0,109
$^{137}\text{Cs}$	0,3	98,4	25,1	30,8	24,9	0,870	0,216	0,015
$D_E$	32,1	86,7	68,8	66,7	11,5	-0,732	1,575	0,179
$ELCR$	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$3,3 \cdot 10^{-4}$	$2,6 \cdot 10^{-4}$	$2,6 \cdot 10^{-4}$	$0,4 \cdot 10^{-4}$	-0,732	1,575	0,179
$H_{ex}$	0,13	0,40	0,29	0,29	0,05	-0,313	0,833	0,058

\* Shapiro-Wilk test normalnosti.

U tabeli 1 je takođe prikazana deskriptivna statistika za rizik pojave kancera (*ELCR*) koji je računat korišćenjem sledeće formule:

$$ELCR = D_E \cdot DL \cdot PC \quad (1)$$

gde *DL* predstavlja prosečni životni vek (70 godina), a  $PC=5.5 \cdot 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$  je nominalni koeficijent verovatnoće pojave kancera za čitavu populaciju [9]. *D<sub>E</sub>* je godišnja efektivna doza (tabela 1), računata po formuli:

$$D_E = DCF \cdot \dot{D} \cdot t \cdot p \quad (2)$$

gde je *DCF* dozni konverzioni koeficijent ( $0,7 \text{ Sv Gy}^{-1}$ ); *t* je godišnje vreme izlaganja (8760 h), a *p* = 0,2 je faktor koji se odnosi na vreme boravka stanovništva na otvorenom.  $\dot{D}$  ( $\text{nGy h}^{-1}$ ) je jačina apsorbovane doze u vazduhu, na visini 1 m iznad tla, računata na osnovu izmerenih specifičnih aktivnosti  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  i  $^{137}\text{Cs}$  (*A<sub>Ra</sub>*, *A<sub>Th</sub>*, *A<sub>K</sub>* i *A<sub>Cs</sub>*, respektivno) [10-12]:

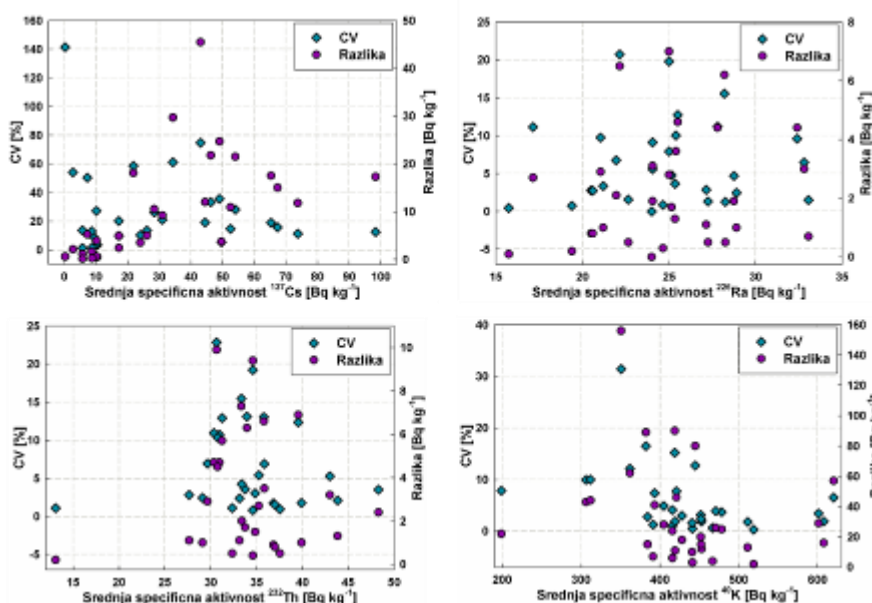
$$\dot{D} = 0.462A_{Ra} + 0.604A_{Th} + 0.0417A_K + 0.1243A_{Cs} \quad (3)$$

Godišnja efektivna doza se kreće u opsegu od 32,1 do 86,7  $\mu\text{Sv}$ , pri čemu doprinos od  $^{137}\text{Cs}$  varira od 0,1% do 18,8%. Srednja vrednost za *ELCR* iznosi  $2,6 \cdot 10^{-4}$  (tabela 1) što je uporedivo sa svetskom srednjom vrednošću od  $2,54 \cdot 10^{-4}$  [10]. U proračunima su korišćene srednje vrednosti specifičnih aktivnosti radionuklida (usrednjene za dva sloja).

Eksterni hazard indeks, koji predstavlja modifikovanu veličinu radijum ekvivalenta ( $H_{ex} = 1$  odgovara radijum ekvivalentu od  $370 \text{ Bq kg}^{-1}$ ), računa se po formuli [13]:

$$H_{ex} = \frac{A_{Ra}}{370} + \frac{A_{Th}}{259} + \frac{A_K}{4810} \quad (4)$$

S obzirom da je maksimalni eksterni hazard indeks dobijen u radu ( $H_{ex} = 0,4$ ) manji od 1, može se smatrati da je radijacioni rizik zanemarljiv.



**Slika 3. Koeficijenti varijacije i apsolutne razlike izmerenih specifičnih aktivnosti radionuklida u dva sloja.**

Spirmanova korelacija između specifičnih aktivnosti radionuklida je računata softverom SPSS 20.0. Korelacioni koeficijenti su prikazani u tabeli 2. Uočava se jaka pozitivna korelacija između prirodnih radionuklida, koja ukazuje na njihovo zajedničko pojavljivanje u prirodi i slično ponašanje tokom njihovog transporta kroz slojeve zemljišta [14].

**Tabela 2. Spirmanova korelaciona matrica specifičnih aktivnosti radionuklida.**

	<sup>226</sup> Ra	<sup>232</sup> Th	<sup>40</sup> K	<sup>137</sup> Cs
<sup>226</sup> Ra	1	0,706**	0,663**	0,135
<sup>232</sup> Th		1	0,696**	-0,151
<sup>40</sup> K			1	0,176
<sup>137</sup> Cs				1

\*\* Nivo značajnosti 0,01.

#### 4. Zaključak

Specifične aktivnosti <sup>226</sup>Ra, <sup>232</sup>Th i <sup>40</sup>K u zemljištu duž obale reke Lepenice, na teritoriji grada Kragujevca, su u saglasnosti sa prosečnim svetskim vrednostima, kao i vrednostima merenim u drugim delovima Srbije. Koeficijenti varijacije aktivnosti prirodnih radionuklida u dva sloja zemljišta kreću se u opsegu od 0 do 31%. Uočena je jaka pozitivna korelacija između aktivnosti <sup>226</sup>Ra, <sup>232</sup>Th i <sup>40</sup>K. Specifične aktivnosti <sup>137</sup>Cs, usrednjene za dva sloja, kreću se u opsegu od 0,3 do 94,8 Bq kg<sup>-1</sup>. Wilcoxon test nije pokazao statistički značajne razlike između slojeva, mada koeficijent varijacije za <sup>137</sup>Cs varira od 1% do 141%. Na osnovu procenjenih vrednosti jačine apsorbovane doze u vazduhu, godišnje efektivne doze i eksternog hazard indeksa, nije uočen povećan radijacioni rizik.

#### 5. Zahvalnica

Ovaj rad je podržan od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja, kroz projekat N<sub>0</sub> 171021.

#### 6. Literatura

- [1] UNSCEAR, 2000. Report to General Assembly, with Scientific Annexes: Sources and effects of ionizing radiation. United Nations, New York.
- [2] UNEP, 1999. <http://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/8433/-The%20Kosovo%20Conflict%20Consequences%20for%20the%20Environment%20%26%20Human%20Settlements-1999378.pdf?sequence=3&isAllowed=y> (accessed 13 March 2019).
- [3] IAEA, 2004. Soil sampling for environmental contaminants. IAEA- TECDOC-1415. IAEA, Vienna, Austria.
- [4] UNSCEAR, 2008. Report to the General Assembly, Annex B: Exposure of the



- public and workers from various sources of radiation. United Nations, New York.
- [5] L. Jankovic Mandic, S. Dragovic. Assessment of terrestrial gamma exposure to the population of Belgrade (Serbia). *Radiat. Prot. Dosim.* 140, 2010, 369–377.
- [6] S. Forkapic, J. Vasin, I. Bikit, D. Mrdja, K. Bikit, S. Milic. Correlations between soil characteristics and radioactivity content of Vojvodina soil. *J. Environ. Radioact.* 166, 2017, 104–111.
- [7] B. Milenkovic, J.M. Stajic, Lj. Gulan, T. Zeremski, D. Nikezic. Radioactivity levels and heavy metals in the urban soil of Central Serbia. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 22, 2015, 16732-16741.
- [8] J.M. Stajic, B. Milenkovic, M. Pucarevic, N. Stojic, I. Vasiljević, D. Nikezic. Exposure of school children to polycyclic aromatic hydrocarbons, heavy metals and radionuclides in the urban soil of Kragujevac City, Central Serbia. *Chemosphere* 146, 2016, 68–74.
- [9] ICRP, 2007. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Ann. Publ. 103, Pergamon, Oxford.
- [10] UNSCEAR, 2008. Report to the General Assembly, Annex B: Exposure of the public and workers from various sources of radiation. United Nations, New York.
- [11] N.M. Antovic, P. Vukotic, N. Svrkota, S.K. Andrukhovich. Pu-239+240 and Cs-137 in Montenegro soil: their correlation and origin. *J. Environ. Radioact.* 110, 2012, 90–97.
- [12] E. Kapdan, A. Varinlioglu, G. Karahan. Radioactivity levels and health risks due to radionuclides in the soil of Yalova, northwestern Turkey. *Int. J. Environ. Res.* 5 (4), 2011, 837–846.
- [13] J. Beretka, P.J. Mathew. Natural radioactivity of Australian building materials, industrial wastes and by-products. *Health Physics* 48, 1985, 87–95.
- [14] A. Chandrasekaran, R. Ravisankar, A. Rajalakshmi, P. Eswaran, P. Vijayagopal, B. Venkatraman. Assessment of natural radioactivity and function of minerals in soils of Yelagiri hills, Tamilnadu, India by Gamma Ray spectroscopic and Fourier Transform Infrared (FTIR) techniques with statistical approach. *Spectrochim Acta Part A* 136, 2015, 1734–1744.



**NATURAL RADIONUCLIDES AND  $^{137}\text{Cs}$  ALONG THE  
RIVERBANK OF LEPENICA RIVER**

**Jelena M. STAJIĆ, Biljana MILENKOVIĆ and Dragoslav NIKEZIĆ**  
*University of Kragujevac, Faculty of Science, Kragujevac, Serbia,*  
*stajicjelenal1052012@gmail.com, bmilenkovic@kg.ac.rs, nikezic@kg.ac.rs*

**ABSTRACT**

The paper reports the results of gamma spectrometric measurements of radionuclides in soil samples collected from two depths (0-15 cm and 15-30 cm) at 30 locations along the riverbank of Lepenica river. The average specific activities of  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  and  $^{137}\text{Cs} \pm$  standard deviations were:  $24.8 \pm 4.2$ ,  $34.8 \pm 7.1$ ,  $432 \pm 87$  i  $30.8 \pm 24.9$  Bq kg<sup>-1</sup>, respectively. These results are in the range typical for Serbia and they are in good agreement with the average worldwide values. The specific activities of  $^{226}\text{Ra}$  and  $^{40}\text{K}$  have shown normal distribution. The air-absorbed dose rates, the annual effective doses, external hazard indexes and excess lifetime cancer risk were also estimated. Coefficients of variation between two layers were presented. According to Wilcoxon non-parametric test the differences between two layers with respect to the analyzed radionuclides were not statistically significant.

## MONITORING RADIOAKTIVNOSTI ZEMLJIŠTA I PROCENA RADIJACIONOG RIZIKA ZA STANOVNIŠTVO

**Jovana ILIĆ, Vesna ARSIĆ, Suzana BOGOJEVIĆ i Irena TANASKOVIĆ**  
*Institut za medicinu rada Srbije „Dr Dragomir Karajović“, Beograd, Srbija,*  
*jovana.ilic@institutkarajovic.rs, vesna.arsic@institutkarajovic.rs,*  
*suzana.bogojevic@institutkarajovic.rs, irena.tanaskovic@institutkarajovic.rs*

### SADRŽAJ

*U ovom radu prikazane su koncentracije aktivnosti prirodnih radionuklida  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  kao i koncentracije aktivnosti antropogenog radionuklida  $^{137}\text{Cs}$  detektovane u uzorcima neobradivog zemljišta. U 2018. god. uzorkovano je zemljište na teritoriji 9 upravnih okruga u Srbiji: Grad Beograd-Beograd, Kolubarski-Valjevo, Rasinski-Kruševac, Moravički-Čačak, Zlatiborski-Prijepolje, Raški-Novı Pazar, Pirotski-Pirot, Toplički-Prokuplje i Jablanički-Leskovac. U Laboratoriji za ispitivanje radioaktivnosti Instituta za medicinu rada Srbije „Dr Dragomir Karajović“ analizirano je 18 uzoraka neobradivog zemljišta spektrometrijom gama emitera merenjem na HPGe detektorima. Koncentracija aktivnosti  $^{226}\text{Ra}$  bila je u opsegu 22-54 Bq/kg sa srednjom vrednošću 37 Bq/kg,  $^{232}\text{Th}$  u opsegu 26-71 Bq/kg, sa srednjom vrednošću od 51 Bq/kg,  $^{40}\text{K}$  u opsegu 419-779 Bq/kg, sa srednjom vrednošću 634 Bq/kg,  $^{137}\text{Cs}$  u opsegu  $< \text{MDC}$ -76 Bq/kg, dok je srednja vrednost iznosila 26 Bq/kg. U cilju procene radijacionog rizika za stanovništvo izračunate su jačina apsorbovane doze gama zračenja u vazduhu, godišnja efektivna doza od spoljašnjeg izlaganja, radijumski ekvivalent aktivnosti kao i indeks radijacionog rizika usled spoljašnjeg izlaganja. Dobijeni rezultati ukazuju na to da ne postoji značajan radijacioni rizik za stanovništvo kao posledica eksternog izlaganja prirodnim radionuklidima iz zemljišta.*

### 1. Uvod

Mnogi prirodni i veštački radionuklidi koji se mogu naći u zemljištu mogu imati uticaj na životnu sredinu i javno zdravlje te je njihova aktivnost faktor koji treba pratiti. Prirodna radioaktivnost predstavlja kontinualan izvor izlaganja ljudi zračenju. Ona potiče od kosmogenih radionuklida i primordijalnih radionuklida koji se nalaze u Zemljinoj kori. Prirodni izvori zračenja čine 80% svih izlaganja zračenju svetske populacije. Gama zračenje koje emituju prirodni radionuklidi, koje se još naziva i terestrijalno pozadinsko zračenje predstavlja glavni izvor spoljašnjeg ozračivanja ljudi [1]. Proizvedeni radionuklidi  $^{137}\text{Cs}$  i  $^{90}\text{Sr}$  mogu biti prisutni u značajnoj meri u zemljištu, kao posledica nuklearnih testova 60-ih godina prošlog veka, akcidenta u Černoblju 1986. god, ili kao posledica ispuštanja iz nuklearnih postrojenja. Doprinos ostalih radionuklida ukupnoj aktivnosti je zanemarljiv [1]. Kada se jednom nađu u životnoj sredini, radionuklidi, bilo prirodni bilo antropogeni, postaju dostupni biljkama i životinjama i na taj način ulaze u lanac ishrane. Količina radioaktivnosti u zemljištu varira značajno i veoma je važno pratiti nivo terestrijalnog pozadinskog zračenja koje

potiče od prirodnih radionuklida prisutnih u zemljištu. Radijacioni rizik se definiše kao verovatnoća da pojedinac doživi određeni štetni efekat kao rezultat izlaganja jonizujućim zračenjima. Veličina radijacionog rizika se određuje preko doze zračenja-veličine koja služi kao kvantitativna mera nivoa izlaganja jonizujućim zračenjima. Povećani radijacioni rizik se može javiti usled eksternog i internog izlaganja jonizujućim zračenjima. Da bi se procenio radijacioni rizik, a na osnovu izmerenih koncentracija aktivnosti prirodnih radionuklida  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  i  $^{40}\text{K}$  u zemljištu, može se izračunati jačina apsorbovane doze gama zračenja u vazduhu, godišnja efektivna doza od spoljašnjeg izlaganja, radijumska ekvivalentna aktivnost kao i indeks radijacionog rizika usled spoljašnjeg izlaganja stanovništva gama zračenju iz zemljišta. Na osnovu Pravilnika o utvrđivanju Programa sistematskog ispitivanja sadržaja radionuklida u životnoj sredini [2] i Pravilnika o monitoringu radioaktivnosti [3], a prema ugovoru sklopljenim sa Direktoratom za radijacionu i nuklearnu sigurnost i bezbednost Srbije u 2018. godini je na teritoriji Republike Srbije izvršeno ispitivanje sadržaja radionuklida u zemljištu. Ispitivanja su izvršili Institut za nuklearne nauke Vinča, Prirodno matematički fakultet u Novom Sadu i Institut za medicinu rada Srbije „Dr Dragomir Karajović“ [4]. Cilj ovog rada je da prikaže rezultate merenja koncentracije aktivnosti prirodnih radionuklida  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  i  $^{40}\text{K}$ , kao i proizvedenog radionuklida  $^{137}\text{Cs}$  u uzorcima neobradivog zemljišta sa teritorije Republike Srbije. Na osnovu dobijenih rezultata procenjen je radijacioni rizik za stanovništvo usled izlaganja prirodnim radionuklidima iz zemljišta.

## 2. Eksperimentalni deo

U Laboratoriji za ispitivanje radioaktivnosti Instituta za medicinu rada Srbije „Dr Dragomir Karajović“ analizirano je 18 uzoraka neobradivog zemljišta, sa teritorije 9 upravnih okruga u Republici Srbiji: Grad Beograd-Beograd, Kolubarski-Valjevo, Rasinski-Kruševac, Moravički-Čačak, Zlatiborski-Prijepolje, Raški-Novi Pazar, Pirotski-Pirot, Toplički-Prokuplje i Jablanički-Leskovac (slika 1). Sa svake lokacije uzorci neobradivog zemljišta su uzeti iz dva sloja, površinskog od 0 do 5 cm i sloja od 5 do 15 cm. Prikupljeni uzorci mase 1 do 1,5 kg su očišćeni od biljnog materijala i kamenja i sušeni na temperaturi 105 °C do konstantne mase 24-48h. Zatim su homogenizovani, samleveni i prosejani kroz sito veličine 2 mm. Za gamaspektrometrijsko merenje korišćena je marineli posuda zapremine 0,5 l, zatopljena kako bi se uspostavila ravnoteža između  $^{226}\text{Ra}$  i njegovih potomaka. Uzorci su mereni nakon 40 dana što je dovoljno za uspostavljanje radioaktivne ravnoteže.

Ispitivanje je izvršeno metodom visokorezolucione gamaspektrometrije prema referentnom dokumentu SRPS ISO 18589-3 [5]. Merenja su vršena na poluprovodničkim HPGe detektorima proizvođača ORTEC, relativne efikasnosti 25% i 40%, rezolucije 1,95 keV odnosno 1,85 keV na liniji 1332,5 keV  $^{60}\text{Co}$ , respektivno. Detektori su povezani sa višekanalnim analizatorom (8192 kanala) istog proizvođača i sa odgovarajućom računarskom opremom. Za obradu dobijenih spektara korišćen je softver GammaVision 32. Vreme merenja svakog uzorka bilo je 15000 s, a fona 250000 s. Kalibracija efikasnosti kao i energetska kalibracija detektora je izvršena sertifikovanim referentnim materijalom-mešavina radionuklida, homogeno raspoređena u zapremini 450 cm<sup>3</sup>, mase 443,25 g, gustine 0,985g/cm<sup>3</sup> Češkog metrološkog instituta Cert. No. 931-OL-422/12. U tabeli 1 dati su radionuklidi čije su koncentracije aktivnosti

određivane kao i energije linija koje su korišćene za izračunavanje i odgovarajući prinosi.



Slika 1. Prikaz lokacija uzorkovanja zemljišta.

Tabela 1. Izabrani radionuklidi i korišćene gama linije.

Određivani radionuklid	Mereni radionuklid	Energija $E_\gamma$ (keV)	Prinos $P_E$ (%)
$^{226}\text{Ra}$	$^{214}\text{Bi}$	609,312	45,49
	$^{214}\text{Bi}$	1120,287	14,91
	$^{214}\text{Bi}$	1764,494	15,31
$^{232}\text{Th}$	$^{228}\text{Ac}$	338,320	11,40
	$^{228}\text{Ac}$	911,196	26,20
	$^{228}\text{Ac}$	968,96	15,90
$^{40}\text{K}$	$^{40}\text{K}$	1460,822	10,55
$^{137}\text{Cs}$	$^{137}\text{Cs}$	661,657	84,99

Na osnovu koncentracije aktivnosti prirodnih radionuklida  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  i  $^{40}\text{K}$  u datim uzorcima zemljišta izračunata je jačina apsorbovane doze gama zračenja u vazduhu ( $\dot{D}$ ), godišnja efektivna doza ( $D_E$ ), radijumski ekvivalent aktivnosti ( $Ra_{eq}$ ) kao i indeks radijacionog rizika usled spoljašnjeg izlaganja ( $H_{eks}$ ). Jačina doze gama zračenja u vazduhu 1m iznad tla izračunata je na osnovu izmerenih koncentracija aktivnosti  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  i  $^{40}\text{K}$  (pretpostavljeno je da su svi potomci u ravnoteži sa svojim prekursorima kao i da drugi radionuklidi kao što su  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  i  $^{235}\text{U}$  neznatno doprinose ukupnoj dozi usled spoljašnjeg izlaganja), prema jednačini (1) [1]:

$$\dot{D} = 0,462A_{Ra} + 0,604A_{Th} + 0,0417A_K \quad (1)$$

где је  $\dot{D}$ -јаčina дозе у nGy/h, а  $A_{Ra}$ ,  $A_{Th}$ ,  $A_K$ -концентрације активности у Bq/kg,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и  $^{40}\text{K}$  респективно. Годишња ефективна доза ( $D_E$ ) изражена у mSv/god израчуната је користећи фактор конверзије 0,7 Sv/Gy и претпоставку да становништво проводи у просеку 20% времена на отвореном према једначини (2) [1]:

$$D_E = \dot{D}(\text{Gyh}^{-1}) \times 24h \times 365d \times 0,7\text{SvGy}^{-1} \times 0,2 \times 10^{-6} \quad (2)$$

Дистрибуција  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и  $^{40}\text{K}$  у окружењу није униформна. Да би се могла вршити компарација концентрација активности материјала који садрже различите количине ових природних радонуклида користи се радијумски еквивалент активности изражен у Bq/kg, који се рачуна према једначини (3) [6,7]:

$$Ra_{eq} = A_{Ra} + A_{Th} \times 1,43 + A_K \times 0,077 \quad (3)$$

Процењено је да 370 Bq/kg  $^{226}\text{Ra}$ , или 259 Bq/kg  $^{232}\text{Th}$  или 4810 Bq/kg  $^{40}\text{K}$  продукују исту јаčinу дозе гама зрачења. Максимална вредност радијумског еквивалента активности мора бити мања од 370 Bq/kg, која одговара граници дозе за становништво од 1 mSv. Индекс радијационог ризика услед спољашњег излагања  $H_{eks}$  израчунат је према једначини (4) [6,7]:

$$H_{eks} = \frac{A_{Ra}}{370} + \frac{A_{Th}}{259} + \frac{A_K}{4810} \quad (4)$$

Уколико је вредност параметра  $H_{eks}$  мања од један, радијациони ризик услед спољашњег излагања се не сматра значајним.

### 3. Резултати

У табели 2 су приказани резултати гамаспектрометријског испитивања узорака земљишта. Дате су концентрације активности анализираних радонуклида и њима придружене мерне несигурности. Мерна несигурност је приказана као проширена мерна несигурност за фактор обухвата  $k=2$ , који за нормалну расподелу одговара нивоу поверења од 95%. На основу измерених вредности концентрације активности природних радонуклида, израчунате су јаčina апсорбоване дозе гама зрачења у ваздуху према једначини (1), годишње ефективне дозе према једначини (2), радијумски еквиваленти активности према једначини (3) као и индекси радијационог ризика услед спољашњег излагања становништва према једначини (4) и приказани су у табели 2.

Концентрација активности  $^{226}\text{Ra}$  била је у опсегу од 22 Bq/kg у Пироту до 54 Bq/kg у Београду док је средња вредност износила 37 Bq/kg,  $^{232}\text{Th}$  у опсегу од 26 Bq/kg у Пироту до 71 Bq/kg у Београду са средњом вредношћу од 51 Bq/kg,  $^{40}\text{K}$  у опсегу од 419 Bq/kg у Крушевцу до 779 Bq/kg у Ваљевоу са средњом вредношћу 634 Bq/kg, а  $^{137}\text{Cs}$  у опсегу од испод MDC (0,2 Bq/kg) у Пироту до 76 Bq/kg у Прокупљу, док је средња вредност износила 26 Bq/kg. Концентрације активности ових радонуклида су се у свим узорцима кретале у уобичајеним границама. Према подацима UNSCEAR [1] у свету су просечне концентрације активности у земљишту 400 Bq/kg за  $^{40}\text{K}$ , 35 Bq/kg за  $^{226}\text{Ra}$  и 30 Bq/kg за  $^{232}\text{Th}$ .

**Tabela 2. Rezultati gamaspektrometrijskog ispitivanja uzoraka zemljišta.**

Lokacija	Sloj (cm)	<sup>40</sup> K (Bq/kg)	<sup>226</sup> Ra (Bq/kg)	<sup>232</sup> Th (Bq/kg)	<sup>137</sup> Cs (Bq/kg)	$\dot{D}$ (nGy/h)	D <sub>E</sub> (mSv/god)	H <sub>eks</sub>	Ra <sub>eq</sub> (Bq/kg)
Beograd	0-5	715 ± 24	54 ± 3	70 ± 5	46,7±1,6	97	0,12	0,56	209
	5-15	734 ± 34	53 ± 3	71 ± 6	47,2±2,2	98	0,12	0,57	212
Valjevo	0-5	769 ± 26	43 ± 2	69 ± 4	8,6±0,4	93	0,11	0,54	200
	5-15	779 ± 26	44 ± 2	70 ± 5	8,5±0,4	95	0,12	0,55	204
Kruševac	0-5	455 ± 24	44 ± 3	59 ± 5	8,7±1,8	75	0,09	0,44	163
	5-15	419 ± 24	40 ± 3	55 ± 5	6,5±0,8	69	0,08	0,41	151
Čačak	0-5	642 ± 22	34 ± 2	51 ± 3	7,9±0,4	73	0,09	0,42	156
	5-15	580 ± 28	36 ± 3	46 ± 4	7,5±0,8	69	0,08	0,40	147
Prijeopolje	0-5	623 ± 32	33 ± 3	52 ± 5	45,6±2,2	72	0,09	0,42	155
	5-15	636 ± 28	33 ± 2	53 ± 5	49,9±2,2	74	0,09	0,43	158
Novi Pazar	0-5	701 ± 36	33 ± 3	45 ± 5	41,1±2,2	72	0,09	0,41	151
	5-15	674 ± 32	35 ± 3	44 ± 5	43,0±2,0	71	0,09	0,41	150
Pirot	0-5	535 ± 26	25 ± 2	26 ± 3	< 0,3	49	0,06	0,28	103
	5-15	517 ± 26	22 ± 2	26 ± 3	< 0,2	47	0,06	0,27	99
Prokuplje	0-5	652 ± 34	34 ± 3	38 ± 9	75,7±3,2	66	0,08	0,38	140
	5-15	585 ± 30	34 ± 3	39 ± 4	62,9±2,8	64	0,08	0,37	136
Leskovac	0-5	744 ± 36	37 ± 9	62 ± 6	1,6±0,8	85	0,10	0,49	182
	5-15	653 ± 30	35 ± 8	43 ± 9	2,4±0,8	69	0,09	0,40	147

Ako se uporede nivoi aktivnosti prirodnih radionuklida u zemljištu sa teritorije Srbije prikazani u ovom radu sa rezultatima UNSCEAR [1] zaključuje se da je koncentracija aktivnosti ovih radionuklida u ispitivanom zemljištu Srbije nešto viša u odnosu na svetski prosek. Antropogeni radionuklid <sup>137</sup>Cs detektovan je u 16 od 18 uzoraka zemljišta, a njegovo prisustvo je posledica akcidenta u Černobilju 1986. god. Kao što se može videti iz tabele 2 koncentracije posmatranih radionuklida se ne razlikuju na većini lokacija za dve različite dubine uzorkovanja. Radijumski ekvivalent aktivnosti ispitivanih uzoraka se kretao u opsegu 99-212 Bq/kg, sa srednjom vrednošću od 159 Bq/kg što je niže od maksimalne dozvoljene koncentracije aktivnosti koja iznosi 370 Bq/kg [3]. Jačina apsorbovane doze gama zračenja u vazduhu je bila u opsegu 47-98



$\text{nGyh}^{-1}$  sa prosečnom vrednošću  $74 \text{ nGyh}^{-1}$ . Prema [1] jačina doze u vazduhu usled terestrijalnog gama zračenja pri spoljašnjem izlaganju u normalnim uslovima iznosi oko  $57 \text{ nGyh}^{-1}$ . Godišnja efektivna doza kretala se od 0,06 do 0,12 mSv dok je srednja vrednost bila 0,09 mSv za spoljašnje izlaganje što je u saglasnosti sa srednjom vrednošću na svetskom nivou od 0,07 mSv [1]. Vrednosti indeksa radijacionog rizika usled spoljašnjeg izlaganja terestrijalnom zračenju ( $H_{eks}$ ) variraju od 0,27 do 0,57 sa srednjom vrednošću od 0,43. Kako su obe ove vrednosti manje od jedan ne postoji značajan radijacioni rizik za stanovništvo usled spoljašnjeg izlaganja.

#### 4. Zaključak

Na osnovu dobijenih rezultata, može se zaključiti da uzorci neobradivog zemljišta sa svih lokacija ne ukazuju na povećanje radioaktivnosti te da je rizik za stanovništvo u datim oblastima vrlo nizak, odnosno da je verovatnoća za pojavu nekog zdravstvenog efekta kao posledice prisustva prirodne radioaktivnosti u uzorcima zemljišta mali.

#### 5. Literatura

- [1] UNSCEAR (United nation scientific committee on the effects of atomic radiation), Exposures From Natural Radiation Sources, Annex B, United Nations, New York, 2000.
- [2] Pravilnik o utvrđivanju Programa sistematskog ispitivanja sadržaja radionuklida u životnoj sredini. Sl. glasnik br. 100/10, 2010.
- [3] Pravilnik o monitoringu radioaktivnosti. Sl. glasnik br. 97/11, 2011.
- [4] Institut za nuklearne nauke Vinča, Institut za medicinu rada Srbije “Dr Dragomir Karajović”, PMF Novi Sad, Departman za fiziku. Izveštaj o realizaciji sistematskog ispitivanja sadržaja radionuklida u zemljištu u Republici Srbiji, 2018.
- [5] SRPS EN ISO 18589-3 Merenje radioaktivnosti u životnoj sredini–Zemljište, deo 3, Metoda ispitivanja radionuklida koji emituju gama zračenje pomoću gama spektrometrije, april 2018
- [6] K.N. Yu, Z.J. Guan, M.J. Stoks, E.C. Young. The assessment of natural radiation dose committed to the Hong Kong people. *J. Environ. Radioact.* 17(1), 1992, 31-48.
- [7] J. Beretka, P.J. Methew. Natural radioactivity of Australian building materials, industrial wastes and by-products. *Health Phys.* 48, 1985, 87-95.



## RADIOACTIVITY MONITORING OF SOIL AND ASSESSMENT OF RADIATION RISK FOR THE POPULATION

**Jovana ILIĆ, Vesna ARSIĆ, Suzana BOGOJEVIĆ and Irena TANASKOVIĆ**  
*Serbian Institute of Occupational Health " Dr Dragomir Karajovic", Belgrade, Serbia,*  
*jovana.ilic@institutkarajovic.rs, vesna.arsic@institutkarajovic.rs,*  
*suzana.bogojevic@institutkarajovic.rs, irena.tanaskovic@institutkarajovic.rs*

### ABSTRACT

The activity concentrations of natural radionuclides  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  and  $^{40}\text{K}$  as well as anthropogenic radionuclide  $^{137}\text{Cs}$ , detected in the samples of uncultivated soil on the territory of Republic of Serbia are presented in this paper. In 2018 soil was sampled on the territory of 9 administrative districts in Serbia: The city of Belgrade-Belgrade, Kolubarski-Valjevo, Rasinski-Kruševac, Moravički-Čačak, Zlatiborski-Prijepolje, Raški-Novı Pazar, Pirotski-Pirot, Toplički-Prokuplje and Jablanički-Leskovac. Total of 18 samples were analyzed by gamma spectrometry (measuring on HPGe detectors) in Laboratory for radioactivity testing-Serbian Institute of Occupational Health „Dr Dragomir Karajovic“. The activity concentration of  $^{226}\text{Ra}$  varied in the range of 22-54 Bq/kg with an average value of 37 Bq/kg,  $^{232}\text{Th}$  in the range of 26-71 Bq/kg, with an average value of 51 Bq/kg,  $^{40}\text{K}$  in the range 419-779 Bq/kg, with an average value of 634 Bq/kg,  $^{137}\text{Cs}$  in the range <MDA-76 Bq/kg, while the average value was 26 Bq/kg. In order to assess the radiation risk for the population as a result of external exposure to natural radionuclides from the soil, the absorbed dose rate, the annual effective dose equivalent from the external exposure, the radium equivalent activity and the external radiation hazard index were calculated. The obtained results indicate that there is no significant radiation risk for the population as a result of external exposure to natural radionuclides from the soil.

## PROCENA BRZINE EROZIJE ZEMLJIŠTA NA OSNOVU AKTIVNOSTI $^{137}\text{Cs}$ NA TITELSKOM LESNOM PLATOU

Sofija FORKAPIĆ<sup>1</sup>, Kristina KALKAN<sup>1</sup>, Slobodan MARKOVIĆ<sup>1</sup>,  
Kristina BIKIT-ŠREDER<sup>1</sup>, Dušan MRĐA<sup>1</sup>, Robert LAKATOŠ<sup>2</sup>  
i Selena SAMARDŽIĆ<sup>2</sup>

- 1) Univerzitet u Novom Sadu, Prirodno-matematički fakultet, Novi Sad, Srbija,  
[sofija@df.uns.ac.rs](mailto:sofija@df.uns.ac.rs), [kalkica@gmail.com](mailto:kalkica@gmail.com), [baca.markovic@gmail.com](mailto:baca.markovic@gmail.com),  
[kristina.bikit@df.uns.ac.rs](mailto:kristina.bikit@df.uns.ac.rs), [mrdjad@df.uns.ac.rs](mailto:mrdjad@df.uns.ac.rs)
- 2) Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, Srbija,  
[laki@uns.ac.rs](mailto:laki@uns.ac.rs), [selena@uns.ac.rs](mailto:selena@uns.ac.rs)

### SADRŽAJ

Poslednjih decenija istraživanje erozije tla praćenjem koncentracije aktivnosti radionuklida u zemljištu je široko rasprostranjeno pošto je ova savremena metoda brza i daje precizne podatke o brzini erozije na godišnjem nivou, bez potrebe dugotrajnih geoloških monitoringa. Proučavanje erozije zemljišta ima veliki socio-ekonomski značaj pošto utiče na degradaciju poljoprivrednog zemljišta, dovodi do zagađenja i uništavanja izvorišta vode i trajnih promena u životnoj sredini. U ovom radu dati su preliminarni rezultati kvantitativne procene erozije na Titelskom lesnom platou koji se nalazi u jugoistočnom delu Bačke kod ušća Tise u Dunav. Odabrano područje predstavlja zapadnu stranu severne jaruge ispred lesne piramide, veoma specifičnog oblika reljefa, nastalog radom pluvijalne erozije koja ima karakteristike i bujične erozije prilikom intenzivnih padavina. Duž nagiba jaruge uzorkovano je osam dubinskih profila zemljišta i još dva sa terena Kalvarije radi odabira referentnog profila. Analiza sadržaja radionuklida izvršena je gama-spektrometrijskom metodom u slojevima zemljišta debljine od oko 1 cm. Brzine erozije, odnosno akumulacije nanosa procenjene su na osnovu konverzionog modela vertikalne distribucije  $^{137}\text{Cs}$  za neobrađivano zemljište uz diskusiju dominantne depozicije ovog radionuklida iz atmosfere. Razmatrana je i vertikalna distribucija prirodnih radionuklida u profilima zemljišta, korelacija sa granulacijom zemljišta i mogućnost primene alternativnih metoda za procenu erozije.

### 1. Uvod

Nedavna istraživanja pokazuju da brzine erozije zemljišta nisu održive i u poslednje vreme imaju tendenciju porasta usled klimatskih promena i intenzivnih padavina. Tradicionalne tehnike imaju niz ograničenja u smislu reprezentativnosti rezultata, vremenske i prostorne rezolucije, troškova i dugotrajnih merenja sa velikom nesigurnošću [1]. Najčešće korišćena tehnika za procenu erozije je gama-spektrometrijsko određivanje sadržaja radionuklida nataloženih iz atmosfere i vezanih za minerale gline i organsku materiju u površinskim slojevima zemljišta, kao što su fisioni produkt  $^{137}\text{Cs}$  i radionuklid prirodnog porekla  $^{210}\text{Pb}$  [2]. Njihova redistribucija ukazuje na gubitak ili depoziciju zemljišta uz mogućnost preciznog određivanja godišnje brzine

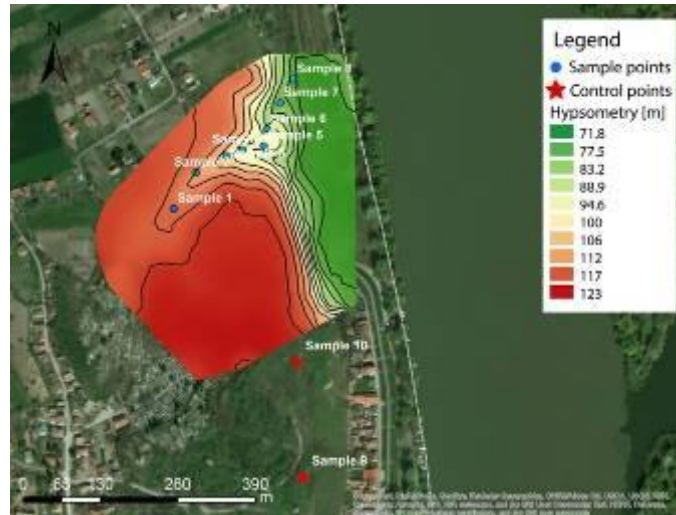
erozije/depozicije. Radiocezijum  $^{137}\text{Cs}$  dospeva u gornje slojeve stratosfere probama nuklearnog oružja u periodu od 1950-1970. odakle se taloži po čitavoj severnoj hemisferi i delu južne hemisfere sa maksimalnom depozicijom 1963 prema mnogim istraživanjima [2-4]. Za razliku od nuklearnih proba, cezijum oslobođen u nuklearnim akcidentima ima lokalnu distribuciju, pri čemu je depozicija snažno uslovljena meteorološkim parametrima [4-6]. Prema atlasu prostorne distribucije rezidualnih nivoa cezijuma nakon nuklearnih proba iz 1986. neposredno pre akcidenta, srednje vrednosti su se kretale u opsegu od 2,5 do 3 kBq/m<sup>2</sup> na području Republike Srbije [7]. Zabeležene srednje vrednosti površinske kontaminacije cezijumom u toku 1986. godine na teritoriji bivše Jugoslavije od 13 940 Bq/m<sup>2</sup> (od 766 Bq/m<sup>2</sup> u zoni minimalne kontaminacije do 83 400 Bq/m<sup>2</sup> u zoni maksimalne kontaminacije) pokazuju da je černobiljska depozicija imala značajniji doprinos ukupnoj depoziciji  $^{137}\text{Cs}$  za naše područje [8]. Osnovni cilj ove studije je primena gamaspektrometrijske metode za kvantifikovanje brzine erozije/depozicije na području Titelskog brega u blizini lesne piramide koja predstavlja redak oblik reljefa. Ovaj lesni plato je paleoklimatski i paleoekološki svedok pet glacijalnih-interglacijalnih ciklusa koji su se smenjivali tokom poslednjih 650 000 godina [9] i zahvaljujući posebnim prirodnim i društvenim karakteristikama Titelski breg je proglašen specijalnim rezervatom prirode. Prikazani preliminarni rezultati ispitivanja erozije ovog područja na osnovu površinske kontaminacije radiocezijumom su upoređeni sa detektovanim koncentracijama nepodržanog olova  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ , koje se taloži iz atmosfere kao produkt raspada radona i predstavlja alternativnu i komplementarnu metodu u istraživanjima erozije zemljišta [2-3].

## 2. Metodologija uzorkovanja i merenja

Titelski breg je lesni plato koji se nalazi u krajnjem jugo-istočnom delu Bačke, u Vojvodini, kod ušća Tise u Dunav. Za istraživanje erozije odabrana je severna jaruga kod lesne piramide, severo-istočno od naselja Titel, koja je obrazovana pluvijalno-fluvijalnim radom vode sa jedne strane i fluvijalnom erozijom Tise sa druge strane. U gornjem delu padine do baze lesne piramide ukupne dužine 182 m uzorkovano je 6 zemljišnih profila (broj profila 1-6) na mestima sa izraženom vertikalnom erozijom gde takođe dolazi do akumulacije rastresitog materijala (slika 1). Donji deo pomenute trase, od mesta bifurkacije preusmeren je na korito severne jaruge, koja ima karakter bujične doline. Na ovom potezu, koji ima kontinuirani pad prema aluvijalnoj ravni Tise, ukupne dužine od 252 m, uzorkovana su dva zemljišna profila (broj profila 7-8). Kao referentne lokacije odabrana su dva lokaliteta: plato na Kalvariji-arheološkom lokalitetu, i poljana u neposrednoj blizini (broj profila 9-10). Prema nedavnim istraživanjima [9-10] prosečna debljina erodiranih i akumuliranih sedimenata na desnoj obali Tise iznosi oko 90 m.

Vertikalni profili neobradivog zemljišta su uzeti u proljeće 2017. nakon velikih padavina u regionu čeličnim Auger-ovim korerom dijametra 53 mm i dužine 40 cm. Dominantni tip zemljišta je kalcifikovani černozem na Titelskoj lesnom platou na osnovu pedološke karte Vojvodine [11]. Na mestima uzorkovanja izmerene su spoljašnje gama doze na 1 m rastojanja od tla. Zemljišne profile u plastičnoj foliji lako je izdeliti nakon zamrzavanja na slojeve potrebne debljine (u ovom slučaju 1 cm), koji se nakon sušenja do konstantne mase na 105°C i usitnjavanja pakuju u cilindričnu geometriju (30 mm x 67 mm). Sadržaj radionuklida u uzorcima zemljišta nakon uspostavljanja sekularne ravnoteže je određen gama-spektrometrijskim merenjima

pomoću dva HPGe detektora visoke rezolucije. Tipično vreme merenja iznosilo je oko 80 ks. Svi slojevi jednog zemljišnog profila su mereni na istom detektoru. Granulacija zemljišta je ispitana u 35 odabranih slojeva na osnovu promene magnetne susceptibilnosti u njima. Raspodela veličine zrna je određena suvim metodom laserske difrakcije pomoću uređaja Mastersizer 2000, Malvern Instruments na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu.



Slika 1. Topografija istraživanog područja sa ucrtanim tačkama uzorkovanja (ArcMap 2.1.0 program).

### 3. Konverzioni modeli za procenu brzine erozije

Teorijski konverzioni modeli za procenu brzine erozije kod neobrađivog zemljišta se baziraju na karakterističnoj eksponencijalnoj distribuciji  $^{137}\text{Cs}$  po dubini [12] i iznalaženju jednostavne numeričke funkcije na osnovu koje se može proceniti dubina erodiranog zemljišta iz referentne ukupne aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  po jedinici površine [2]. Ukupna aktivnost cezijuma po jedinici površine  $A$  [ $\text{Bq}/\text{m}^2$ ] za svaku tačku uzorkovanja, se određuje na osnovu sledeće formule [3]:

$$A = \sum_{i=1}^n C_i B D_i D_i \quad (1)$$

gde su:  $n$ –maksimalni broj slojeva sa detektovanim sadržajem  $^{137}\text{Cs}$ ,  $C_i$  – koncentracija aktivnosti Cs u datom sloju  $i$ ,  $B D_i$ –gustina osušenog zemljišta za dati sloj  $i$   $D_i$ – debljina sloja. Procentualna redukcija ukupne aktivnosti cezijuma po jedinici površine u odnosu na referentnu vrednost (tačka uzorkovanja na zaravni na kojoj se pretpostavlja da nema erozije) se određuje na sledeći način:

$$X = \frac{A_{ref} - A}{A_{ref}} \times 100\% \quad (2)$$

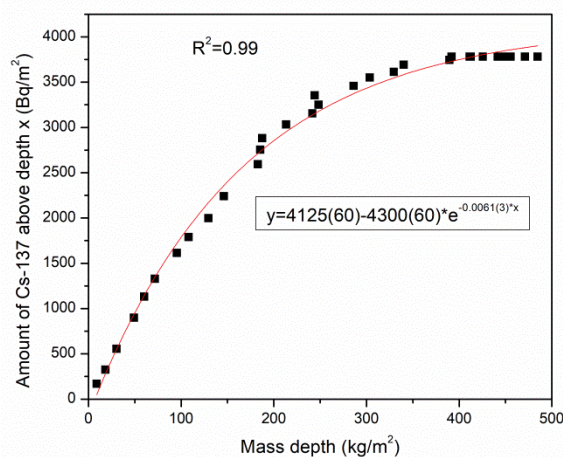
gde su  $A_{ref}$ – ukupna aktivnost  $^{137}\text{Cs}$  po jedinici površine za referentnu tačku  $i$   $A$ –ukupna aktivnost  $^{137}\text{Cs}$  po jedinici površine za ostale tačke uzorkovanja U većini slučajeva distribucija  $^{137}\text{Cs}$  po dubini nekultivisanog zemljišta predstavlja eksponencijalnu zavisnost od dubine i može se izraziti sledećom formulom [3]:

$$A'(x) = A_{ref}(1 - e^{-x/h_0}) \quad (3)$$

gde su:  $x$ -masena dubina od površine zemljišta [ $\text{kg}/\text{m}^2$ ],  $A'(x)$ -ukupna aktivnost cezijuma po jedinici površine iznad dubine  $x$ ,  $h_0$ -koeficijent koji opisuje oblik profila i predstavlja indikator prodora cezijuma. Ako se pretpostavi da se totalno taloženje cezijuma desilo 1986. godine i da je distribucija cezijuma po dubini profila zemljišta nezavisna od vremena, tada se godišnja brzina erozije  $Y$  [ $\text{t}/\text{ha}/\text{yr}$ ] može izraziti kao:

$$Y = \frac{10}{t-1986} \ln\left(1 - \frac{x}{100}\right) h_0 \quad (4)$$

gde su:  $t$  -godina uzorkovanja (yr),  $X$  -procentualna redukcija u odnosu na referentnu vrednost određena prema jednačini (2) i  $h_0$  koeficijent profila za referentnu lokaciju. Detaljnom analizom odabrana je lokacija poljana (profil 10) za referentnu zbog najboljeg eksponencijalnog fita (slika 2) i topografije terena - Kalvarija predstavlja najvišu tačku Titelskog brega (132 m nadmorske visine - slika 1) sa uočenom erozijom.

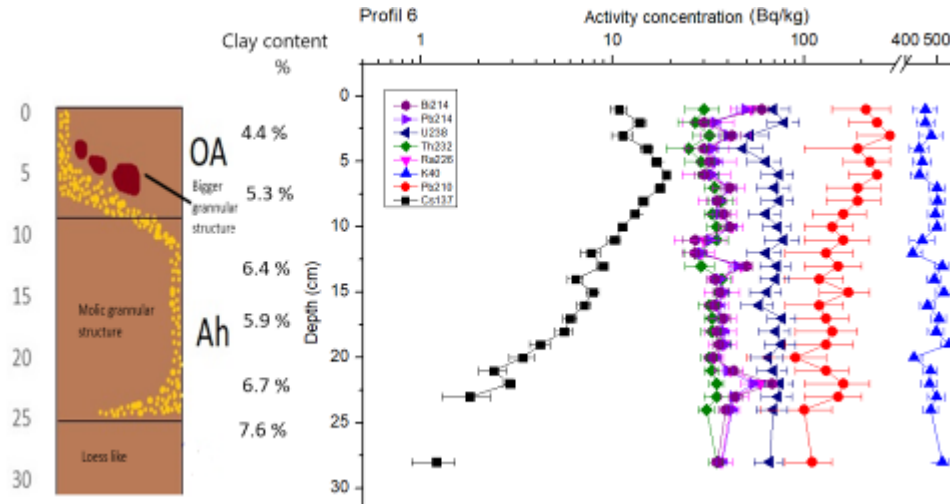


**Slika 2. Eksponencijalni fit za  $A'=f(x)$  za referentnu lokaciju sa procenom koeficijenta profila  $h_0=163,9 \text{ kg}/\text{m}^2$ .**

#### 4. Rezultati i zaključak

Horizont jednog zemljišnog profila sa vertikalnom distribucijom izmerenih radionuklida i procentualnim udelom fine glinene komponente po slojevima prikazan je na slici 3. Koncentracije aktivnosti prirodnih radionuklida se kreću u uobičajenim granicama za poljoprivredno zemljište: (25 – 85) Bq/kg za  $^{226}\text{Ra}$ , (20 – 84) Bq/kg za  $^{238}\text{U}$ , (18 – 47) Bq/kg za  $^{232}\text{Th}$  i (372 – 920) Bq/kg za  $^{40}\text{K}$ . Prisustvo organske materije utiče na sadržaj  $^{226}\text{Ra}$  za koji je uočena blaga varijacija po dubini zemljišta šta se slaže sa nalazima publikacija [13]. Uočeno je da sadržaj gline postepeno raste po dubini što omogućava prodiranje cezijumovih jona u dublje slojeve. Potvrđeno je dominantno prisustvo silit komponente u granulaciji zemljišta, za koju je karakteristična slaba otpornost na eroziju. Prema veličini zrna granulacija je podeljena u pet komponenti prema Wentworth-ovoj [14]: glina (<3,9  $\mu\text{m}$ ), silit (3,9-62,5)  $\mu\text{m}$ , fini pesak (62,5-250)  $\mu\text{m}$ , srednji pesak (250-500)  $\mu\text{m}$  i grubi pesak (500-2000)  $\mu\text{m}$ .





**Slika 3. Horizont zemljišnog profila 6 (OA - prelazni horizont između humusa i mineralnog zemljišta, Ah - mineralni horizont sa akumulacijom organske materije) sa sadržajem gline po slojevima (u sredini) i vertikalnom distribucijom izmerenih radionuklida (desno).**

Rezultati ispitivanja erozije severne jaruge i referentnih lokacija dati su u tabeli 1. Strane severne jaruge su strme i obrasle vegetacijom (trava i grmlje). Date godišnje brzine erozije zemljišta su procenjene na osnovu izmerenih koncentracija aktivnosti radiocezijuma, dok je uočeno da metoda nepodržanog olova nije dala realistične rezultate. Na tačkama 2, 3, 4, 5 i 8 uočena je akumulacija zemljišta što se može objasniti izgledom terena i nanošenjem rastresitog zemljišta sa strana jaruge. Intenzivna erozija uočena je na tačkama uzorkovanja 1, 6, 7 i 9 koje se nalaze na većem nagibu terena, a dobijene vrednosti za brzinu erozije se slažu sa prethodno publikovanim rezultatima.

**Tabela 1. Nadmorska visina, jačina ambijentalnog ekvivalenta doze H\*(10), opis vegetacije, ukupne aktivnosti radionuklida po jedini površine i procena godišnje brzine erozije za deset ispitanih zemljišnih profila.**

Broj profila	Nadmorska visina (m)	H*(10) (μSv/h)	Vegetacija	A ( <sup>137</sup> Cs) (Bq/m <sup>2</sup> )	A ( <sup>210</sup> Pb <sub>ex</sub> ) (Bq/m <sup>2</sup> )	X (%)	Y (t/ha/yr)
1	118	0,22	trava	3568,0	19209,2	5,6	-3,0
2	116	0,20	trava i žbunje	5090,0	50483,6	-34,6	16,2
3	112	0,15	trava i žbunje	5153,9	20068,1	-36,3	16,9
4	107	0,17	trava i žbunje	5154,9	55959,6	-36,4	17,0
5	102	0,14	-	4024,7	16519,8	-32,9	15,5
6	101	0,17	-	3060,6	45948,2	19,0	-11,5
7	106	0,16	-	3229,8	22870,8	14,6	-8,3
8	99	0,18	drveće	3895,5	53864,9	-3,0	1,6
9	127	0,17	trava	2255,8	41472,1	40,3	-28,2
10	131	0,14	trava	3780,3	10687,6	referentni sajt	

Planira se nastavak istraživanja erozije ovog veoma kompleksnog terena na većem broju uzoraka uz poređenje sa potencijalnim modelom erozije (Gavrilovićev model) koji koristi količinu padavina i ostale meteorološke parametre u cilju validacije rezultata. Upotreba drugih modela konverzije, kao što je model difuzije i migracije, koji je takođe pogodan za nekultivirano zemljište, u kombinaciji sa analizom veličine čestica će dati preciznije rezultate.

### 5. Zahvalnica

Rad je finasiran sredstvima Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije (projekat OI171002 i III 43002).

### 6. Literatura

- [1] G. Guzmán et al. Sediment tracers in water erosion studies: current approaches and challenges, *J. Soils Sediments* 13, 2013, 816–833.
- [2] F.Zapata. Handbook for the assessment of soil erosion and sedimentation using environmental radionuclides, Kluwer Academic Publishers, US, 2002.
- [3] D. E. Walling, Q. He, P. G. Appleby. Conversion Models for Use in Soil-Erosion, Soil-Redistribution and Sedimentation Investigations, in: *Handbook for the Assessment of Soil Erosion and Sedimentation Using Environmental Radionuclides*, Kluwer Academic Publishers, US, 2003,111–164.
- [4] E. Fulajtar et al. *Use of 137 Cs for Soil Erosion Assessment*, FAO/IAEA, Rome, 2017.
- [5] G. Porêba, A. Bluszcz and Z. Snieszko. Concentration and vertical distribution of 137Cs in agricultural and undisturbed soils from Chechlo and Czarnocin areas, *Geochronometria* 22, 2003, 67–72.
- [6] Q. H. Hu, J. Q. Weng and J. S. Wang. Sources of anthropogenic radionuclides in the environment: A review, *J. Environ. Radioact.* 101(6), 2010, 426–437.
- [7] Marc de Cort et al. *Atlas of caesium deposition on Europe after the Chernobyl accident*, Luxembourg, 1998, EC 176 A3, ISBN 92-828-3140-X.
- [8] Nivoi radioaktivne kontaminacije čovekove sredine i ozračenost stanovništva Jugoslavije 1986. godine usled havarije nuklearne elektrane u Černobilju, Savezni komitet za rad, zdravlje i socijalnu zaštitu, Beograd, 1987.
- [9] S. B. Marković et al. Loess in the Vojvodina region (Northern Serbia): an essential link between European and Asian Pleistocene environments, *Netherlands Journal of Geosciences* 91 (1-2), 2012, 173-188.
- [10] D. Bjelajac et al. Introducing the Loess Pyramid – an Unusual Landform in the Thick Loess Deposits of Vojvodina, Serbia, *Geographica Pannonica* 20 (1), 2015, 1-7.
- [11] B. Nejgebauer, B. Živković, Đ. Tanasijević, N. Miljković. Pedološka karta Vojvodine u razmeri 1:50 000, Institut za poljoprivredna istraživanja, Novi Sad, 1971.



- [12] D. Krstić, D. Nikezić, N. Stevanović, M. Jelić. Vertical profile of  $^{137}\text{Cs}$  in soil, *Appl. Radiat. Isot.* 61, 2004, 1487-1492.
- [13] B. Michalik. NORM contaminated area identification using radionuclides activity concentration pattern in a soil profile, *J. Environ. Radioact.* 173, 2017, 102-111.
- [14] USGS Open-File Report 2006-1195: Nomenclature [WWW Document], U.S. Geol. Surv. Open-File Rep, 2006.

### SOIL EROSION RATE ASSESSMENT BASED ON THE ACTIVITY OF $^{137}\text{Cs}$ ON TITEL LOESS PLATEAU

**Sofija FORKAPIĆ<sup>1</sup>, Kristina KALKAN<sup>1</sup>, Slobodan MARKOVIĆ<sup>1</sup>,  
Kristina BIKIT-ŠREDER<sup>1</sup>, Dušan MRĐA<sup>1</sup>, Robert LAKATOŠ<sup>2</sup>,  
and Selena SAMARDŽIĆ<sup>2</sup>**

1) *University of Novi Sad, Faculty of Sciences, Novi Sad, Serbia, [sofija@df.uns.ac.rs](mailto:sofija@df.uns.ac.rs),  
[kalkica@gmail.com](mailto:kalkica@gmail.com), [baca.markovic@gmail.com](mailto:baca.markovic@gmail.com), [kristina.bikit@df.uns.ac.rs](mailto:kristina.bikit@df.uns.ac.rs),  
[mrdjad@df.uns.ac.rs](mailto:mrdjad@df.uns.ac.rs)*

2) *University of Novi Sad, Faculty of Technical Sciences, Novi Sad, Serbia,  
[laki@uns.ac.rs](mailto:laki@uns.ac.rs), [selena@uns.ac.rs](mailto:selena@uns.ac.rs)*

#### ABSTRACT

In recent decades, soil erosion research by radioactive method has been widespread since it is rapid and gives precise erosion rate estimates without the need for long-term geological monitoring. Soil erosion is one of the largest global problems of the environmental protection and sustainable development, causing serious land degradation and environmental deterioration. In this paper we used gamma spectrometry measurements of  $^{137}\text{Cs}$  and unsupported  $^{210}\text{Pb}$  for soil erosion assessment of northern gully on Titel loess plateau near the Tisa River. Along the torrential slope and in the immediate vicinity of studied area ten representative soil depth profiles were taken and analyzed the radioactivity content in 1 cm thick soil layers. Soil erosion rates were estimated according to conversional profile distribution model for undisturbed soil. Vertical distribution of natural radionuclides in soil profiles was also discussed and compared with profile distribution of unsupported  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  measurements.

## ASSESSMENT OF SOIL EROSION RATES IN SOUTHEASTERN SERBIA USING NUCLEAR TECHNIQUES

Snežana DRAGOVIĆ<sup>1</sup>, Emil FULAJTAR<sup>2</sup>, Jelena PETROVIĆ<sup>1</sup>,  
Milan ĐORĐEVIĆ<sup>3</sup>, Mrđan ĐOKIĆ<sup>3</sup>, Mirjana ČUJIĆ<sup>1</sup>,  
Ljiljana JANKOVIĆ MANDIĆ<sup>1</sup>, Ranko DRAGOVIĆ<sup>3</sup> and Boško GAJIĆ<sup>4</sup>

- 1) University of Belgrade, Vinča Institute of Nuclear Sciences, Belgrade, Serbia, [sdragovic@vin.bg.ac.rs](mailto:sdragovic@vin.bg.ac.rs), [petrovicj@vin.bg.ac.rs](mailto:petrovicj@vin.bg.ac.rs), [cujicm@vin.bg.ac.rs](mailto:cujicm@vin.bg.ac.rs), [ljmandic@vin.bg.ac.rs](mailto:ljmandic@vin.bg.ac.rs)
- 2) Joint FAO/IAEA Division of Nuclear Techniques in Food and Agriculture, International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria, [E.Fulajtar@iaea.org](mailto:E.Fulajtar@iaea.org)
- 3) University of Niš, Faculty of Sciences and Mathematics, Department of Geography, Niš, Serbia, [milan.djordjevic@pmf.ni.ac.rs](mailto:milan.djordjevic@pmf.ni.ac.rs), [mrdjandjokic@gmail.com](mailto:mrdjandjokic@gmail.com), [dragovicr@pmf.ni.ac.rs](mailto:dragovicr@pmf.ni.ac.rs)
- 4) University of Belgrade, Institute of Land Management, Faculty of Agriculture, Serbia, [bonna@agrif.bg.ac.rs](mailto:bonna@agrif.bg.ac.rs)

### ABSTRACT

Soil erosion by water presents an important environmental problem in Serbia resulting in degradation of the soil resources, reducing soil fertility and agricultural production. The highest intensity of erosion was observed at cultivated land occupying steep slopes. The conversion of pastures to arable land enhances this problem. This study presents the preliminary results of Technical Cooperation Project of International Atomic Energy Agency 'Strengthening the Capacities for Soil Erosion Assessment Using Nuclear Techniques to Support Implementation of Sustainable Land Management Practices' (SRB5003) aimed at estimation of soil erosion rates using the <sup>137</sup>Cs-method. The investigation of Pčinja and South Morava River Basins in southeastern Serbia revealed intensive erosion in the area. The investigation will continue at several other sites and the results will be used to support national soil conservation policy.

### 1. Introduction

Soil erosion is one of the most common and important land degradation processes. As soil erosion is identified as one of the key environmental problems in Serbia there is an increasing need for obtaining the reliable information on soil erosion rates. The use of fallout radionuclides (FRNs) such as artificial <sup>137</sup>Cs and <sup>239+240</sup>Pu (medium-term erosion assessment, recently about 55-60 years), geogenic <sup>210</sup>Pb<sub>ex</sub> (long-term erosion assessment, about 100 years) and cosmogenic <sup>7</sup>Be (short-term erosion assessment ≤ 6 m) for obtaining such information [1-4] possesses some advantages as compared to traditional methods, such as cost-effectiveness and possibility to obtain information retrospectively [5]. Advantages, as well as limitations of FRN techniques, are discussed in number of papers [1-2, 5]. The main goal of erosion assessment with <sup>137</sup>Cs method is to obtain information needed for identification of areas exposed to high erosion risk and soil

conservation strategies as an important part of sustainable agriculture and food production. Over the years, many different models have been developed for cultivated and uncultivated lands in order to convert  $^{137}\text{Cs}$  inventories into soil erosion and deposition rates, such as models developed by Walling (2006) - Proportional Model (PM), Mass Balance Model (MBM) I, II and III, Profile Distribution Model (PDM) and Diffusion and Migration Model (DMM) [1]; by Arata et al. (2014) Modelling Deposition and Erosion Rates with RadioNuclides (MODERN) [3,4], by Soto and Navas (2004; 2008) [6-7] etc.

In last years the use of  $^{137}\text{Cs}$  method is developing abruptly in Serbia and first results were published [8]. The use of  $^{137}\text{Cs}$  method is supported by International Atomic Energy Agency (IAEA) and Food and Agricultural Organization (FAO) through their Joint FAO/IAEA Division of Nuclear Techniques in Food and Agriculture. The Joint FAO/IAEA Division supports the Technical Cooperation Project „Strengthening the Capacities for Soil Erosion Assessment Using Nuclear Techniques to Support Implementation of Sustainable Land Management Practices” (SRB5003) launched in 2018 with the main objective to enhance soil conservation and environmental protection in Serbia, using environmental radionuclides; to improve national policies for sustainable soil management, based on the soil erosion assessment results; and to revise the earlier erosion map of Serbia using  $^{137}\text{Cs}$  method. Some preliminary results of this project achieved at Pčinja study site in southeastern Serbia are presented in this study.

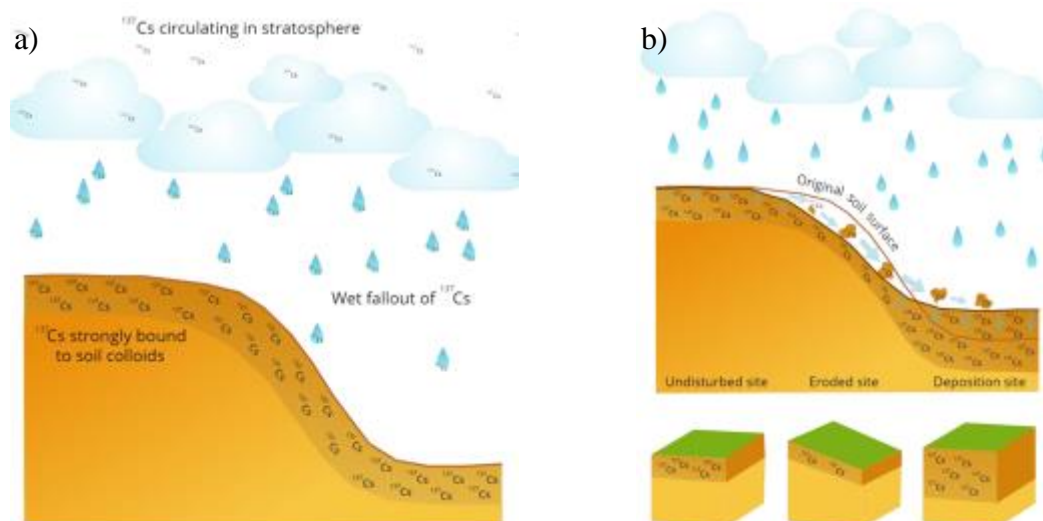
## 2. Methods

The  $^{137}\text{Cs}$  (half-life,  $t_{1/2} = 30.2$  years) is the most widely used radionuclide tracer for studying soil redistribution. The  $^{137}\text{Cs}$  is found in the environment worldwide due to fallout after nuclear weapon testing in the 1950's and 1960's and after nuclear power plant accident such as Chernobyl in 1986 or Fukushima-Daiichi in 2011. Once deposited on the ground,  $^{137}\text{Cs}$  strongly bind to fine soil particles and move across the landscape together with soil particles by mechanical processes such as water, tillage, and wind erosion.

Due to the intense folding and faulting of the geological strata, the Pčinja and South Morava River valleys are narrow and dominated by steep slopes. The climate of the study area is temperate continental with mean annual precipitation of about 620 mm [9]. At most of the sampling sites the soils are dominated by Haplic Cambisols and Luvic Planosols.

The soil samples were collected on five slope transects at selected grassland site exposed to erosion processes, especially to pluvial erosion. The total inventories of  $^{137}\text{Cs}$  ( $\text{Bq m}^{-2}$ ) at sampling points were calculated from the activity concentrations of this radionuclide measured by gamma-ray spectrometry taking into account the soil bulk density and the soil profile depth increments. The details on sampling design and analysis could be found in Petrović et al. (2016) [8].

The methodology used to determine soil erosion and deposition rates was based on a comparison between the total  $^{137}\text{Cs}$  inventories for the sampling points with the reference inventory - site where no soil redistribution processes have occurred since the  $^{137}\text{Cs}$  main deposition. At a deposition point the  $^{137}\text{Cs}$  inventory is greater than the reference inventory ( $A_u (\text{Bq m}^{-2}) > A_{\text{ref}} (\text{Bq m}^{-2})$ ), while at an eroded point the total  $^{137}\text{Cs}$  inventory is lower than the reference inventory ( $A_u (\text{Bq m}^{-2}) < A_{\text{ref}} (\text{Bq m}^{-2})$ ) [1, 2], Fig. 1.



**Figure 1. a) Homogenous distribution of the fallen <sup>137</sup>Cs in area not affected by soil erosion, b) <sup>137</sup>Cs and soil redistribution by erosion: undisturbed, eroded and deposition site [10].**

A key step of the <sup>137</sup>Cs method is to estimate <sup>137</sup>Cs inventory at representative undisturbed reference site. Guidelines and criteria for reference sites selection were provided by Mabit et al. (2014) [2].

### 3. Results

The <sup>137</sup>Cs inventories of the sampling points were converted to soil erosion and deposition rates with the Profile Distribution Model and Diffusion and Migration Model. Since more than 80% of <sup>137</sup>Cs input came from Chernobyl accident [11-13], the year 1986 is selected as the main fallout <sup>137</sup>Cs input in the applied conversion models. The erosion and deposition rates estimated using selected models are presented in Table 1. For all transects, the sediment delivery ratio is given, i.e. the ratio between net erosion rate and gross erosion rate. More details could be found in FAO/IAEA (2017) [1, 10].

**Table 1. Soil redistribution rate estimated using the PDM and DMM.**

	<i>Transect 1</i>		<i>Transect 2</i>		<i>Transect 3</i>		<i>Transect 4</i>		<i>Transect 5</i>	
	<b>PDM</b>	<b>DMM</b>	<b>PDM</b>	<b>DMM</b>	<b>PDM</b>	<b>DMM</b>	<b>PDM</b>	<b>DMM</b>	<b>PDM</b>	<b>DMM</b>
Gross erosion rate (t ha <sup>-1</sup> yr <sup>-1</sup> )	-5.6	-2.4	-28.0	-8.9	-13.9	-4.7	-10.5	-4.3	-14.6	-5.8
Net erosion rate (t ha <sup>-1</sup> yr <sup>-1</sup> )	-4.7	-1.9	-25.4	-7.5	-5.9	-0.6	-10.5	-4.3	-14.6	-5.8
Sediment delivery ratio (%)	83	81	91	84	43	13	100	100	100	100

The substantial differences in soil redistribution rates obtained by the models could be attributed to the differences in model assumptions. Namely, the PDM does not take into

account the time-dependent nature of  $^{137}\text{Cs}$  fallout deposition and the post-fallout redistribution in the soil profile which results in overestimation of soil loss. Therefore, the results of DMM are more realistic. The variation of the soil redistribution rates down the slopes of transects could be found in Petrović et al. (2016) [8]. The obtained net erosion rates (as calculated by DMM) seems to be not much at first look but considering the strong soil conserving efficiency of grass cover and the site topography the erosion should be at similar sites close to zero. The measured values indicate that at longer slopes the erosion may be relatively strong and may result in linear erosion (rills and gullies) causing serious damage. Indeed the rills and gullies were commonly observed by project team in mountainous areas of Serbia. In a pastureland from Cluj county, Romania the net erosion rate estimated by PDM was  $-5.8 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$  [14] and  $-6.6 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$  using DMM [15], which is comparable with results obtained in this study. The average erosion rates obtained using the Profile Distribution method in undisturbed soils for the Peynirli and the Kırtas Hills in Western Turkey were found to be 15 and 27  $\text{t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ , respectively [16].

#### 4. Conclusion

The  $^{137}\text{Cs}$  method was used to estimate soil redistribution rates at selected sites in Pčinja and South Morava River Basins, southeastern Serbia. The data gained by  $^{137}\text{Cs}$  method have some advantages as compared to data provided by most conventional methods because  $^{137}\text{Cs}$  method provides (i) retrospective information, (ii) estimates of medium-term average rates of soil redistribution, (iii) values representing integrated result of all mechanical soil redistribution processes running at studied site, and (iv) information on both erosion and deposition. The information presented in this paper should be further used to support soil conservation in Serbia.

#### 5. Acknowledgements

The authors acknowledge the support of the Joint FAO/IAEA Division of Nuclear Techniques in Food and Agriculture (project SRB5003) and Ministry of Education, Science and Technological Development of the Republic of Serbia (project III43009).

#### 6. References

- [1] D.E. Walling, Y. Zhang, Q. He, Models for converting measurements of environmental radionuclide inventories ( $^{137}\text{Cs}$ , Excess  $^{210}\text{Pb}$ , and  $^7\text{Be}$ ) to estimates of soil erosion and deposition rates (Including software for model implementation), Exeter, EX4 4RJ U.K.: Department of Geography, University of Exeter, 2006.
- [2] L. Mabit, S. Chhem-Kieth, P. Dornhofer, A. Toloza, M. Benmansour, C. Bernard, E. Fulajtar, D. E. Walling.  $^{137}\text{Cs}$ : A widely used and validated medium-term soil tracer, in *Guidelines for Using Fallout Radionuclides to Assess Erosion and Effectiveness of Soil Conservation Strategies*, Vienna, Austria, IAEA-TECDOC-1741, 2014, pp. 27-77.
- [3] L. Arata, K. Meusburger, E. Frenkel, A. A'Campo-Neuen, A.-R. Iurian, M. E. Ketterer, L. Mabit and C. Alewell. Modelling Deposition and Erosion rates with RadioNuclides (MODERN) Part 1: A new conversion model to derive soil

- redistribution rates from inventories of fallout radionuclides. *J. Environ. Radioact.* 162-163, 2016, 45-55.
- [4] L. Arata, C. Alewell, E. Frenkel, A. A'Campo-Neuen, A.-R. Iurian, M.E. Ketterer, L. Mabit, K. Meusbürger. Modelling Deposition and Erosion rates with RadioNuclides (MODERN) - Part 2: A comparison of different models to convert  $^{239+240}\text{Pu}$  inventories into soil redistribution rates at unploughed sites. *J. Environ. Radioact.* 162-163, 2016, 97-106.
- [5] L. Mabit, M. Benmansour, D.E. Walling. Comparative advantages and limitations of the fallout radionuclides  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  and  $^7\text{Be}$  for assessing soil erosion and sedimentation. *J. Environ. Radioact.* 99, 2008, 1799-1807.
- [6] J. Soto, A. Navas. A model of  $^{137}\text{Cs}$  activity profile for soil erosion studies in uncultivated soils of Mediterranean environments, *J. Arid Environ.* 59, 2004, 719-730.
- [7] J. Soto, A. Navas. A simple model of Cs-137 profile to estimate soil redistribution in cultivated stony soils. *Radiat. Meas.* 43, 2008, 1285-1293.
- [8] J. Petrović, S. Dragović, R. Dragović, M. Đorđević, M. Đokić, B. Zlatković, D. Walling. Using  $^{137}\text{Cs}$  measurements to estimate soil erosion rates in the Pčinja and Soth Morava River Basins, southeastern Serbia. *J. Environ. Radioact.* 158-159, 2016, 71-80.
- [9] Republic Hydrometeorological Service of Serbia, 1991-2013 Report, Belgrade.
- [10] E. Fulajtar, L. Mabit, C.S. Renschler, A. Lee Zhi Yi. *Use of  $^{137}\text{Cs}$  for soil erosion assessment*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 2017, 64.
- [11] A.R. Byrne. Radioactivity in fungi in Slovenia, Yugoslavia, following the Chernobyl accident. *J. Environ. Radioact.* 6, 1988, 177-183.
- [12] Federal Committee for Labor, Health and Social Policy. *The level of radioactive contamination of human environment and exposure of population in Yugoslavia in 1986 due to nuclear power plant disaster in Chernobyl*, Belgrade, 1987 (in Serbian).
- [13] J. Petrović, M. Čujić, M. Đorđević, R. Dragović, B. Gajić, Š. Miljanjić, S. Dragović. Spatial distribution and vertical migration of  $^{137}\text{Cs}$  in soils of Belgrade (Serbia) 25 years after the Chernobyl accident. *Environ. Sci. Proc. Imp.* 15, 2013, 1279-1289.
- [14] A.-R. Iurian, R. Begy, I. Căținaș, C. Cosma, Results of medium-term soil redistribution rates in Cluj county, Romania, using  $^{137}\text{Cs}$  measurements. *Procedia Environ. Sci.* 14, 2012, 22-31.
- [15] A.-R. Iurian, L. Mabit, C. Cosma, Uncertainty related to input parameters of  $^{137}\text{Cs}$  soil redistribution model for undisturbed fields. *J. Environ. Radioact.* 136, 2014, 112-120.
- [16] M.M. Saç, A. Uğur, G. Yener, B. Özden. Estimates of soil erosion using cesium-137 tracer models. *Environ. Monit. Assess.* 136, 2008, 461-467.



## PROCENA INTENZITETA EROZIJE ZEMLJIŠTA JUGOISTOČNE SRBIJE PRIMENOM NUKLEARNIH TEHNIKA

Snežana DRAGOVIĆ<sup>1</sup>, Emil FULAJTAR<sup>2</sup>, Jelena PETROVIĆ<sup>1</sup>,  
Milan ĐORĐEVIĆ<sup>3</sup>, Mrđan ĐOKIĆ<sup>3</sup>, Mirjana ČUJIĆ<sup>1</sup>,  
Ljiljana JANKOVIĆ MANDIĆ<sup>1</sup>, Ranko DRAGOVIĆ<sup>3</sup> i Boško GAJIĆ<sup>4</sup>

- 1) *Univerzitet u Beogradu, Institut za nuklearne nauke Vinča, Beograd, Srbija, [sdragovic@vin.bg.ac.rs](mailto:sdragovic@vin.bg.ac.rs), [petrovicj@vin.bg.ac.rs](mailto:petrovicj@vin.bg.ac.rs), [cujicm@vin.bg.ac.rs](mailto:cujicm@vin.bg.ac.rs), [ljmandic@vin.bg.ac.rs](mailto:ljmandic@vin.bg.ac.rs)*
- 2) *Međunarodna agencija za atomsku energiju, Beč, Austrija, [E.Fulajtar@iaea.org](mailto:E.Fulajtar@iaea.org)*
- 3) *Univerzitet u Nišu, Prirodno-matematički fakultet, Departman za geografiju, Niš, Srbija, [milan.djordjevic@pmf.ni.ac.rs](mailto:milan.djordjevic@pmf.ni.ac.rs), [mrdjandjokic@gmail.com](mailto:mrdjandjokic@gmail.com), [dragovicr@pmf.ni.ac.rs](mailto:dragovicr@pmf.ni.ac.rs)*
- 4) *Univerzitet u Beogradu, Institut za zemljište i melioracije, Poljoprivredni fakultet, Beograd, Srbija, [bonna@agrif.bg.ac.rs](mailto:bonna@agrif.bg.ac.rs)*

### SADRŽAJ

Erozija zemljišta vodom predstavlja važan problem zaštite životne sredine u Srbiji. Posledica erozije je degradacija zemljišnih resursa, smanjenje plodnosti zemljišta i redukcija poljoprivredne proizvodnje. Najveći intenzitet erozije uočen je na obradivom zemljištu na strmim padinama. Pretvaranje pašnjaka u obradivo zemljište uticalo je na povećanje prostora zahvaćenih procesom erozije. U ovom radu prikazani su preliminarni rezultati projekta tehničke saradnje sa Međunarodnom agencijom za atomsku energiju 'Jačanje kapaciteta za procenu intenziteta erozije zemljišta korišćenjem nuklearnih tehnika u cilju podrške održivom upravljanju zemljištem' (SRB5003) čiji je cilj procena intenziteta erozije zemljišta <sup>137</sup>Cs-metodom. Istraživanja sprovedena u basenima Pčinje i Južne Morave ukazala su na intenzivnu eroziju na ovom prostoru. Istraživanja će biti nastavljena na nekoliko drugih lokacija, a rezultati će biti upotrebljeni za podršku nacionalnim programima konzervacije zemljišta.



## ODREĐIVANJE AKTIVNOSTI RADIONUKLIDA U-235 I U-238 U JAMSKOJ VODI ZATVORENOG RUDNIKA GABROVNICA KOD KALNE

Ivana MAKSIMOVIĆ i Miodrag MILENOVIĆ

Javno preduzeće „Nuklearni objekti Srbije“, Beograd, Srbija,

[ivana.maksimovic@nuklearniobjekti.rs](mailto:ivana.maksimovic@nuklearniobjekti.rs), [miodrag.milenovic@nuklearniobjekti.rs](mailto:miodrag.milenovic@nuklearniobjekti.rs)

### SADRŽAJ

*Između 1964. i 1966. godine iz Hidrometalurškog postrojenja Gabrovnica kod Kalne je proizvedeno približno 900 kg uranijum oksida i 400 kg metalnog uranijuma. Prekidanje eksploatacije je izazvano velikim troškovima usled veoma malog sadržaja uranijuma u rudi. Odlukom o zatvaranju rudnika sve podzemne instalacije su blokirane i izvršena je izolacija i stabilizacija jalovšta na lokaciji. Nakon prelaska nadležnosti lokacije u JP „Nuklearni objekti Srbije“, vrši se redovna radiološka kontrola. Za određivanje aktivnosti U-235 i U-238 u uzorku jamske vode za Marinelli geometriju korišćen je poluprovodnički Ge detektor tipa GX5020. Pre korišćenja dostupnih softverskih paketa, urađeno je poređenje sa modelom razvijenim u Sektoru za razvoj i primenu nuklearnih tehnologija JP, pomoću Monte Karlo programa MCNP-5. Nakon potvrde da je razlika efikasnosti prema uprošćenom i realnom geometrijskom modelu Marinelli posude manja od neodređenosti kalibracionih izvora ( $\pm 3\%$ ) korišćenih za eksperimentalnu validaciju realnog modela Marinelli posude, softverski paket MEFFTRAN je korišćen za određivanje efikasnosti. Na kraju rada su prikazani rezultati određivanja aktivnosti aktivnosti U-238 i U-235 u uzorku iz bazena u blizini okna zatvorenog rudnika.*

### 1. Uvod

Nakon kratke eksploatacije od 1964. do 1966. godine, Hidrometalurško postrojenje Gabrovnica kod Kalne je danas zatvoren rudnik uranijuma. Proizvedeno je približno 900 kg uranijum oksida i 400 kg metalnog uranijuma i usled velikih troškova u eksploataciji proizvodnja je prekinuta [1,2]. Izvršena je izolacija i stabilizacija jalovišta na lokaciji i nakon prelaska nadležnosti lokacije u JP „Nuklearni objekti Srbije“ redovno se mere uzorci vode i zemlje sa lokacije u cilju radiološke kontrole i planiranja dekomisije na lokaciji. Usled obaveza Sektora za razvoj i primenu nuklearnih tehnologija u JP vezanih za radiološke karakterizacije materijala, a za svrhu dekomisije nuklearnih postrojenja, uspostavljene su i akreditovane metode za laboratorijska i *in-situ* merenja. Razvijene su nedestruktivne metode sa numerički kalibrisanim detektorima pomoću Monte Karlo programa MCNP [3], a usled velikog broja uzoraka radioaktivnog otpada koriste se razvijene tehnike za merenje uzoraka bez hemijskog ili fizičkog tretmana. Zbog veće količine tečnog radioaktivnog otpada, najčešće se tečni uzorci mere u cilindričnim posudama zapremine do 500 ml, a po potrebi i u posudama Marinelli tipa zapremine do 2000 ml. Za sve uzorke najpre su urađena merenja standardnih izvora iste geometrije. Da bi se omogućilo da se mere različiti uzorci u

čvrstom ili tečnom stanju, razvijeni su geometrijski modeli Ge detektora, za Monte Karlo program MCNP-5. Pre uvođenja u korišćenje, ovi modeli su detaljno provereni u odnosu na rezultate merenja standardnih izvora. U svim primerima razvijeni geometrijski modeli u odnosu na eksperimente nisu imali odstupanja veća od neodređenosti aktivnosti korišćenih izvora, koja je iznosila maksimalno  $\pm 3\%$  [4,5,6] Paralelno sa razvojem, testirane su mogućnosti za softverski paket za numeričku kalibraciju LabSOCS[7]. Pokazalo se da on nema odstupanja veća od  $\pm 5\%$  za uzorke merene u cilindričnoj geometriji, ali za uzorke merene u Marinelli geometriji na nižim energijama odstupanja su veća. Otuda smo u ovom radu, sledeći istu praksu merenja uzoraka vode bez tretmana, uradili obradu rezultata jamske vode zatvorenog rudnika Gabrovnica kod Kalne, koristeći eksperimentalne rezultate za Marinelli standard od 1500 ml sa homogenim silikonskim  $\text{H}_6\text{C}_2\text{OSi}$  gustine  $0,98 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  i softverski paket MEFFTRAN [8].

## 2. Metodologija

Uzorak jamske vode uzet 24.07.2018. je hermetički zatvoren voskom u Marinelli posudu. Radi merenja  $^{238}\text{U}$  preko  $^{234}\text{Th}$  koji ima period poluraspada 24.1 d, merenje je započeto 23.03.2019. Za merenje aktivnosti radionuklida prisutnih u uzorku korišćen je Ge detektor tipa GX5020 [4] sa softverom Genie2K [5].

Uobičajeno vreme merenja  $^{226}\text{Ra}$  u jamskoj vodi je  $10^5$  s. Međutim, u cilju određivanja aktivnosti  $^{235}\text{U}$  i  $^{238}\text{U}$  u uzorku jamske vode merenje je trajalo  $10^6$  s.

Standardnim postupkom  $^{238}\text{U}$  se meri preko 4 linije iz spektra, od kojih dve pripadaju  $^{234}\text{Th}$  (63,29 keV i 92,59 keV) i dve  $^{234\text{m}}\text{Pa}$  (766,42 keV i 1001,03 keV). Nakon izvršenih merenja, usled loše statistike pomenutih linija spektra i utvrđenog prisustva  $^{238}\text{U}$ , potomaka  $^{232}\text{Th}$  i mogućih spektralnih interferencija, aktivnost  $^{238}\text{U}$  je određena preko linija 63,29 keV i 1001,03 keV. Takođe, standardnim postupkom  $^{235}\text{U}$  se meri na osnovu tri linije (143,76 keV, 163,33 keV i 185,715 keV). Linija na 163,33 keV, zbog loše statistike, ovog puta nije korišćena. Iterativnim postupkom je otklonjeno preklapanje linije  $^{226}\text{Ra}$  sa linijom spektra na energiji 185,715 keV. Merenje ostalih radionuklida je urađeno po standardnom postupku.  $^{226}\text{Ra}$  preko linije na 186,211 keV,  $^{214}\text{Pb}$  preko tri linije (241,995 keV, 295,223 keV, 351,932 keV),  $^{214}\text{Bi}$  preko tri linije (609,32 keV, 1120,294 keV, 1764,491 keV),  $^{210}\text{Pb}$  preko linije na 46,539 keV,  $^{228}\text{Ac}$  iz torijumskog lanca raspada preko tri linije (338,32 keV, 911,204 keV, 968,971 keV).  $^{228}\text{Ac}$  je potomak raspada  $^{228}\text{Ra}$  i sa njim je u ravnoteži.  $^{212}\text{Pb}$  preko linije na 238,632 keV i  $^{208}\text{Tl}$  preko linije na 583,187 keV.

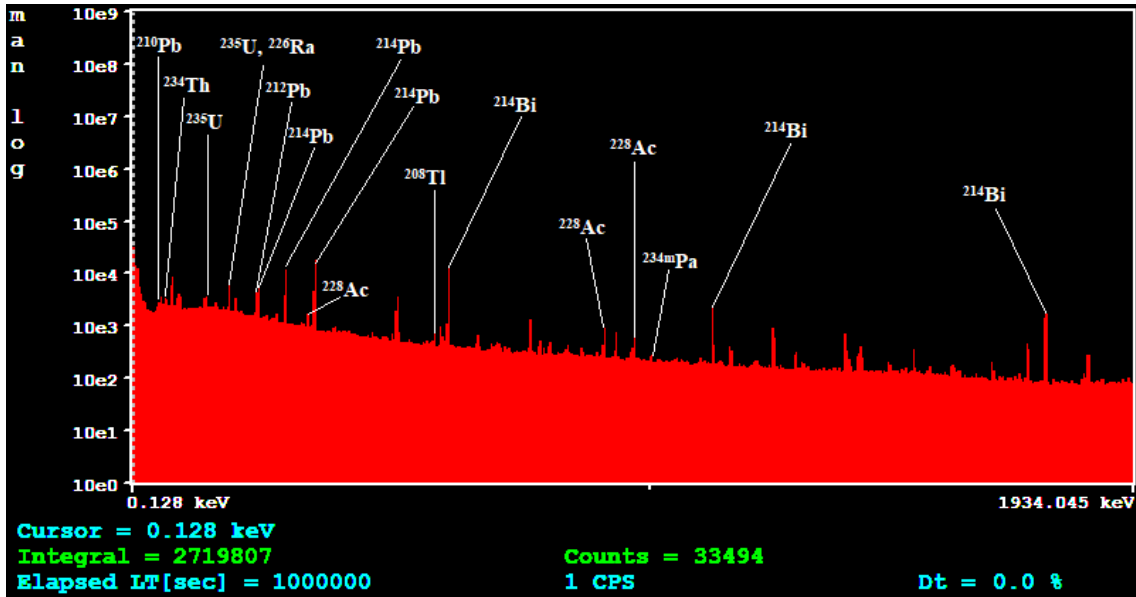
Za određivanje efikasnosti ( $\varepsilon$ ) Ge detektora je korišćen softverski paket MEFFTRAN, a za određivanje površine pikova radionuklida koristi se numerički algoritam ANGES [7]. Softverski paket MEFFTRAN koristi polu-empirijski pristup oslanjajući se na proceduru transfera efikasnosti. Koristi se relacija izvedena iz modela predloženog od strane Moensa i dr. [12] i data je kao:

$$\varepsilon = \varepsilon_{ref} \frac{\bar{\Omega}}{\bar{\Omega}_{ref}} \quad (1)$$

gde  $\varepsilon$  predstavlja efikasnost, a  $\bar{\Omega}$  prostorni ugao. Efektivni prostorni uglovi, kako referentnog tako i uzorka koji se meri, moraju biti određeni. Korekcionni faktori za koincidentna sumiranja COI dobijeni su isto preko pomenutog softverskog paketa.

### 3. Rezultati i diskusija

Energetski spektar gama zračenja ispitivanog uzorka jamske vode je prikazan na slici 1. Identifikovani su sledeći radionuklidi na energijama opisanim u metodologiji:  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}/^{234}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}/^{234\text{m}}\text{Pa}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{214}\text{Pb}$ ,  $^{214}\text{Bi}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{228}\text{Ra}/^{228}\text{Ac}$ ,  $^{224}\text{Ra}/^{212}\text{Pb}$  i  $^{208}\text{Tl}$ .



Slika 1. Spektar odziva Ge detektora GX5020.

Za vreme merenja  $t_m = 10^6$  s i masu uzorka od 1800 g, efikasnost ( $\varepsilon$ ) i vrednosti za  $COI$  faktor određeni su pomoću softvera MEFFTRAN za referentne vrednosti ( $\varepsilon_{ref}$ ) dobijene eksperimentalno za standardni izvor mase 1470g Marinelli geometrije. Sadržaj aktivnosti radionuklida i njihovu neodređenost u uzorku je određena prema relacijama (2) i (3):

$$\frac{C}{t_m \cdot y \cdot \varepsilon \cdot COI \cdot m} \quad (2)$$

$$u_{tot} = \sqrt{u_{\varepsilon}^2 + u_{geo}^2 + u_{COI}^2 + u_{pa}^2} \quad (3)$$

kao i minimalna detektibilna aktivnost ( $MDA$ ) na osnovu izmerenog fona ( $B$ ), određena je iz relacije:

$$MDA = \frac{2.71 + 4.65 \cdot \sqrt{B}}{\varepsilon \cdot y \cdot t_m \cdot m} \quad (4)$$

Rezultati ispitivanja aktivnosti radionuklida i njihova neodređenost u uzorku jamske vode i  $MDA$  za različite energetske linije prisutnih radionuklida date su u tabeli 1.

**Tabela 1. Vrednosti ispitivanja aktivnosti radionuklida u uzorku jamske vode i minimalna detektabilna aktivnost.**

Radionuklid	$A \pm u_{tot}$ (Bq/L)	MDA (Bq/L)
$^{235}\text{U}$	$0,115 \pm 0,004$	0,010
$^{238}\text{U}$	$2,473 \pm 0,135$	0,300
$^{234}\text{Th}$	$2,473 \pm 0,135$	0,300
$^{234m}\text{Pa}$	$2,473 \pm 0,135$	0,300
$^{226}\text{Ra}$	$4,810 \pm 0,185$	0,170
$^{214}\text{Pb}$	$4,442 \pm 0,056$	0,020
$^{214}\text{Bi}$	$4,286 \pm 0,086$	0,020
$^{210}\text{Pb}$	$1,095 \pm 0,115$	0,325
$^{228}\text{Ra}$	$0,600 \pm 0,014$	0,034
$^{228}\text{Ac}$	$0,600 \pm 0,014$	0,034
$^{224}\text{Ra}$	$0,164 \pm 0,008$	0,016
$^{212}\text{Pb}$	$0,164 \pm 0,008$	0,016
$^{208}\text{Tl}$	$0,060 \pm 0,004$	0,011

Dobijeni rezultati pokazuju prisustvo radionuklida  $^{238}\text{U}$  i  $^{235}\text{U}$ , odnosno uranijuma prirodnog obogaćenja. Sa radiounkildom  $^{238}\text{U}$  su u ravnoteži  $^{234}\text{Th}$  i  $^{234m}\text{Pa}$ . Aktivnost  $^{226}\text{Ra}$  je značajno veća od aktivnosti  $^{238}\text{U}$ , što ukazuje da rastvorljivost ova dva radionuklida u vodi nije bila jednaka, tj. rastvorljivost  $^{226}\text{Ra}$  je u vodi veća. Radionuklidi  $^{214}\text{Pb}$  i  $^{214}\text{Bi}$  su u ravnoteži sa radionuklidom  $^{226}\text{Ra}$ . U lancu raspada  $^{238}\text{U}$  identifikovan je radionuklid  $^{210}\text{Pb}$ , koji nije u ravnoteži sa  $^{214}\text{Pb}$  i  $^{214}\text{Bi}$ . U uzorku jamske vode prisutan je i radionuklid  $^{228}\text{Ra}$  (iz lanca raspada  $^{232}\text{Th}$ ) koji je u ravnoteži sa radionuklidom  $^{228}\text{Ac}$ . Kako  $^{228}\text{Th}$  u lancu raspada  $^{228}\text{Ra}$  ima srazmerno dugu poluperiodu (1,913 godina), ravnoteža između  $^{228}\text{Ra}$  i  $^{224}\text{Ra}$  nije uspostavljena. Sam radionuklid  $^{232}\text{Th}$ , čiji raspad prati gama energija na 140,88 keV, nije identifikovan, jer je prilikom merenja koje je trajalo dugo, došlo do aktivacije Ge kristala neutronima iz prirode i stvaranja radionuklida  $^{75m}\text{Ge}$  (139,9 keV). Iz tog razloga će u nastavku ovog rada biti urađena alfaspektrometrijska analiza jamske vode.

#### 4. Zaključak

Za granice sadržaja radionuklida u tečnom otpadu za oslobodanje od regulatorne kontrole (*clearance levels*) koriste se vrednosti koje važe za vodu za piće. Izvedene koncentracije radionuklida u vodi za piće *clearance levels* prema Pravilniku [13] se izračunavaju za graničnu vrednost efektivne doze za pojedinca iz stanovništva od 0,1 mSv/god. Kako je za uranijumove izotope  $^{234}\text{U}$  i  $^{238}\text{U}$  u Pravilniku navedeno da su date vrednosti dobijene samo razmatranjem radioloških svojstava, a nije uzeta u obzir hemijska toksičnost koja je dominantna kod uranijuma, koristi se granična vrednost *clearance levels* za sadržaj uranijuma u vodi za piće od 30  $\mu\text{g/l}$  preporučena od strane Svetske zdravstvene organizacije [14] i Agencije za zaštitu životne sredine Sjedinjenih

Američkih Država [15], što je ekvivalentno izvedenoj koncentraciji radionuklida od 0.4 Bq/l.

Aktivnosti radionuklida  $^{238}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  (prikazane u tabeli 1) su veće od izvedenih koncentracija pojedinačnih radionuklida u vodi za piće preuzete iz Pravilnika, koje iznose 0,4 Bq/l, 0,5 Bq/l, 0,2 Bq/l, 0,2 Bq/l, respektivno.

Analizom rezultata dolazimo do zaključka da se jamska voda, koja se sakuplja u bazenu blizu okna, ne može ispuštati u životnu sredinu bez prethodnog tretmana.

### 5. Zahvalnica

Autori se zahvaljuju kolegi Miodragu Miloševiću za pomoć tokom korišćenja Monte Karlo programa MCNP-5 i diskusiju tokom izrade ovog rada.

### 6. Literatura

- [1] Andrew Koch, "Yugoslavia's Nuclear Legacy: Should We Worry?" *The Nonproliferation Review*, Spring/Summer 1997, [www.nonproliferation.org](http://www.nonproliferation.org).
- [2] James P. Nichol and Gordon L. McDaniel, "Yugoslavia," in *Nuclear Power in Developing Countries*, James Everett Katz and Onkar S. Marwah (eds.), (Lexington: D.C. Heath and Company, 1982), p. 354.
- [3] X-5 Monte Carlo Team, "MCNP - A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5", Los Alamos National Laboratory, April 2003 (Revised, October 2005).
- [4] M. Milošević, I. Maksimović, D. Cekerevac-Mirković, "Merenje aktivnosti uranijuma," *Zbornik radova 58. Konferencije ETRAN 2014*, Vrnjačka Banja, 2 – 5. juna 2014. godine, str. NT1.3.1-6, 2014.
- [5] I. Djorđević, M. Milošević, "Numerička kalibracija Ge detektora za određivanje aktivnosti radionuklida sa izraženim efektima kaskadnog sumiranja i oduzimanja broja impulsa," *Zbornik radova 56. Konferencije ETRAN 2012*, Zlatibor, 11-14. juna 2012. godine, str. NT1.5.1-4, 2012.
- [6] M. Milošević, M. Petrović, "A Methods for Non-destructive Radiological Characterization by In Situ Spectrometry Measurements," *Proceedings of 4th International Conference on Electrical, Electronics and Computing Engineering, IcETAN 2017*, Kladovo, Serbia, June 05-08, pp. NTI2.3.1-6, 2017.
- [7] Model S574 LabSOCS V4.1 Calibration Software, *User's Manual*, Canberra Industries, Inc. 2002 (US Patent 6228664 B1, Compliant with 2009 NRC Regulatory Guide 1.21).
- [8] Tim Vidmar, EFFTRAN – "A Monte Carlo efficiency transfer code for gamma-ray spectrometry, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*", 2005.
- [9] Germanium Detector, *User's Manual*, Canberra Industries, Inc. 2001.
- [10] Genie 2000, Ver. 3.0, Customization Tools Manual, Canberra Industries, Inc. 2004.
- [11] P. Misliev, B. Vidolov, ANGES, Ver. 1.0, A Specialized Software Utilities for Gamma Ray Spectrometry, *User's Manual*, IAEA, 1991.

- [12] L. Moens, J. De Donder, X. Lin, et al., Nucl. Instr. Methods Phys. Res. 187 (1981) 451.
- [13] "Правилник о границама садржаја радионуклида у води за пиће, животним намирницама, сточној храни, лековима, предметима опште употребе, грађевинском материјалу и другој роби која се ставља у промет, " Сл. гл. РС, 36 од 10.05.2018
- [14] World Health Organization, "Guidelines for Drinking-water Quality, " 4th Edition, WHO, 2011.
- [15] U.S. Environmental Protection Agency, "Drinking Water Standards and Health Advisories Tables, " 2018 Edition, March 2018.

### **MEASUREMENT OF RADIONUCLIDES ACTIVITY U-235 AND U-238 IN WATER OF CLOSED URANIUM MINE GABROVNICA**

**Ivana MAKSIMOVIĆ and Miodrag MILENOVIĆ**

*Public Company Nuclear Facilities of Serbia, Belgrade, Serbia,*

*[ivana.maksimovic@nuklearniobjekti.rs](mailto:ivana.maksimovic@nuklearniobjekti.rs), [miodrag.milenovic@nuklearniobjekti.rs](mailto:miodrag.milenovic@nuklearniobjekti.rs)*

#### **ABSTRACT**

Between 1964 and 1966, approximately 900 kg of uranium oxide and 400 kg of metal uranium were produced from the uranium mine Gabrovnica near Kalna. The termination of exploitation is caused by high costs due to the very low content of uranium in the ore. By the decision to close the mines, all underground installations were blocked and isolation and stabilization of the tailings on site were carried out. After the transfer of the jurisdiction of the site to the PC "Nuclear facilities of Serbia", regular radiological control is carried out. A semiconductor Ge detector type GX5020 was used to determine the activity of U-235 and U-238 in the water sample for the Marinelli geometry. Before using the available software packages, a comparison was made with a model developed in the Sector for Development and Application of Nuclear Technology within JP, using the Monte Carlo MCNP program. After confirming that the efficiency difference according to the simplified and real geometric model of the Marinelli beaker is less than the uncertainty of the calibration sources ( $\pm 3\%$ ) used for the experimental validation of the real Marinelli beaker, the MEFFTRAN software was used to determine the efficiency. At the end of the paper, the results of determining the activities of U-238 and U-235 in the sample from the pool near entering of the closed mine are presented.



## RADIOAKTIVNOST U ZEMLJIŠTU NA LOKACIJI HIDROMETALURŠKOG POSTROJENJA U GABROVNICI KOD KALNE

Marija LEKIĆ, Nevena ZDJELAREVIĆ, Nataša LAZAREVIĆ,  
Ivana MAKSIMOVIĆ i Dalibor ARBUTINA

Javno preduzeće „Nuklearni objekti Srbije”, Beograd, Srbija,  
[marija.lekic@nuklearniobjekti.rs](mailto:marija.lekic@nuklearniobjekti.rs), [nevena.zdjelarevic@nuklearniobjekti.rs](mailto:nevena.zdjelarevic@nuklearniobjekti.rs),  
[natasa.lazarevic@nuklearniobjekti.rs](mailto:natasa.lazarevic@nuklearniobjekti.rs), [ivana.maksimovic@nuklearniobjekti.rs](mailto:ivana.maksimovic@nuklearniobjekti.rs),  
[dalibor.arbutina@nuklearniobjekti.rs](mailto:dalibor.arbutina@nuklearniobjekti.rs)

### SADRŽAJ

*Hidrometalurško postrojenje u Gabrovnici kod Kalne, koje se nalazi na teritoriji istočne Srbije, na Staroj planini, bilo je prvi rudnik uranijuma u bivšoj Jugoslaviji, koje je bilo u pogonu do 1966. godine, kada je rudnik zatvoren zbog velikih troškova prerade i eksploatacije. Odlukom o osnivanju Javnog preduzeća „Nuklearni objekti Srbije” donetom u julu 2009. godine, postrojenje je prešlo u nadležnost ovog preduzeća. U cilju kontrole radioaktivnosti zemljišta na lokaciji postrojenja vršena su gamaspektrometrijska ispitivanja uzoraka uzetih 2018. godine sa tri različite dubine (površinski uzorak, uzorak sa dubine 0–1 m i uzorak sa dubine 1–2 m) sa tri lokacije zatvorenog rudnika: van ograde na mestu nekadašnjeg jezera, na livadi desno od ulaza u rudnik i kod prvog jalovišta na livadi ispod okna rudnika. U ovom radu prikazani su i diskutovani rezultati dobijenih specifičnih aktivnosti prirodnih radionuklida ( $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{235}\text{U}$  i  $^{238}\text{U}$ ), kao i proizvedenog  $^{137}\text{Cs}$ . Na osnovu dobijenih vrednosti uočava se trend povećanja specifičnih aktivnosti  $^{238}\text{U}$  i  $^{226}\text{Ra}$  sa dubinom. Od svih ispitivanih uzoraka, jedino uzorci sa lokacije prvog jalovišta pokazuju povišenu radioaktivnost prirodnih radionuklida na sve tri dubine.*

### 1. Uvod

Hidrometalurško postrojenje u Gabrovnici kod Kalne (zatvoreni rudnik uranijuma) nalazi se na teritoriji istočne Srbije, na Staroj Planini. Rudnik uranijuma je počeo sa radom 1963. godine (slika 1). Po količini uranijuma u rudi, ovaj rudnik je spadao u rudnike sa siromašnim sadržajem uranijuma. Tokom eksploatacije u rudniku je proizvedena mala količina uranijuma, oko 400 kg metalnog uranijuma i oko 900 kg  $\text{UO}_2$ . Zbog ekonomske neisplativosti, rudnik je ubrzo zatvoren (1966. godine). Odlukom o osnivanju Javnog preduzeća „Nuklearni objekti Srbije” donetom u julu 2009. godine, postrojenje je prešlo u nadležnost ovog preduzeća, od kada se neprekidno odvija monitoring radioaktivnosti na ovoj lokaciji, kao i u njegovoj okolini.

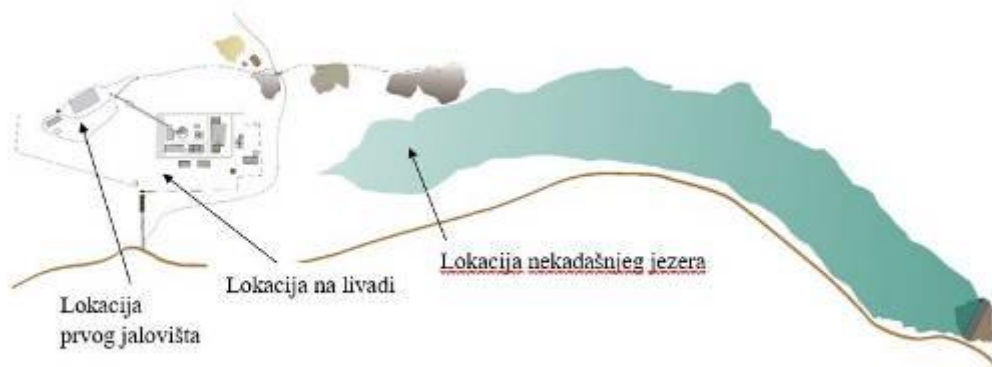
U sklopu projekta „Katastar rudarskog otpada Republike Srbije”, Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor je 2018. godine obavio prospekciju terena i uzorokovanje zemljišta na lokaciji Hidrometalurškog postrojenja u Gabrovnici kod Kalne. Institut je obezbedio mehanizaciju za kopanje do 2 metra dubine, te je u našoj studiji iskorišćena jedinstvena mogućnost sakupljanja dubinskih uzoraka zemljišta. Uzorci su uzeti sa tri lokacije: van



ograde sa lokacije nekadašnjeg jezera, sa lokacije na livadi desno od ulaza u rudnik i sa lokacije prvog jalovišta na livadi ispod okna rudnika (slika 2). Na svakoj lokaciji uzeti su uzorci sa tri dubine: površinski uzorak (0–5 cm), uzorak sa dubine 0–1 m i dubine 1–2 m. Kopanje je vršeno tako da se materijal do 1 m dubine odvajao na jednu gomilu, a od 1–2 m na drugu gomilu. Sa svake gomile uziman je materijal sa više različitih mesta za jedan uzorak (slika 3).



**Slika 1. Hidrometalurško postrojenje u Gabrovnici kod Kalne tokom eksploatacije (1963-1966).**



**Slika 2. Lokacije u Hidrometalurškom postrojenju u Gabrovnici kod Kalne sa kojih su uzeti uzorci.**

## 2. Materijal i metode

Vegetacija i kamenčići su mehanički uklonjeni iz uzoraka koji su zatim usitnjeni i prosejani do veličine čestica finije od 0,2 mm, kako bi se osigurala homogenost potrebna za spektrometrijska merenja. Da bi se otklonile masnoće, uzorci zemlje su potom ispirani u metanolu. Potrebne količine uzoraka su 24 h sušene u sušnici na 105 °C i nakon toga ponovo prosejane, shodno preporukama Međunarodne agencija za atomsku energiju (IAEA) za pripremu uzoraka [1].

Ovako pripremljeni uzorci zemlje stavljeni su u Marineli posude zapremine 0,5 l i zatopljeni pčelinjim voskom, nakon čega su ostavljeni 40 dana kako bi se uspostavila radioaktivna ravnoteža između  $^{226}\text{Ra}$  i  $^{222}\text{Rn}$  i njihovih potomaka [1]. Uzorci zemlje su imali masu između 699,17 g i 861,91 g.

Gamaspektrometrijska analiza uzoraka zemlje je izvršena na HPGe ORTEC GEM 50 detektoru relativne efikasnosti 50% i energetske rezolucije (FWHM) od 1,67 keV na energiji 1,33 MeV ( $^{60}\text{Co}$ ). Kalibracija detektora urađena je referentnim radioaktivnim materijalom, matriksa silikonske smole, Czech Metrological Institute Praha, 1035–SE–40517–17, tip MBSS 2, ukupne aktivnosti 59,4 kBq na dan 1.9.2017. Korišćeni referentni materijal je sadržao sledeće radionuklide:  $^{214}\text{Am}$ ,  $^{109}\text{Cd}$ ,  $^{139}\text{Ce}$ ,  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{113}\text{Sn}$ ,  $^{85}\text{Sr}$ ,  $^{88}\text{Y}$  i  $^{51}\text{Cr}$ . Energije gama linija ovih radionuklida su pogodne za kalibraciju jer pokrivaju opseg energija od interesa, tj. od 50 do 3000 keV. Vreme merenja uzoraka i referentnog materijala je bilo 86 000 s, a merenja fona 260 000 s.

U uzorcima zemlje su određeni prirodni radionuklidi  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$ , kao i proizvedeni  $^{137}\text{Cs}$ . Karakteristične gama linije [2] korišćene za određivanje aktivnosti ovih radionuklida u uzorcima zemlje prikazane su u tabeli 1.



**Slika 3. Razdvajanje materijala u dve gomile prilikom eskavacije na prvom jalovištu.**

Određivanje aktivnosti  $^{235}\text{U}$  vršeno je korišćenjem gama linije na 185,70 keV, uz korekciju površine pika za doprinos  $^{226}\text{Ra}$  na enegiji 186,21 keV sa prinosom od 3,64%. Specifična aktivnost  $^{235}\text{U}$  [ $^{235}\text{U}$ ] u uzorcima dobijena je korišćenjem sledeće formule:

$$\left[ ^{235}\text{U} \right] = \frac{\frac{CR_{187}}{\varepsilon} - \left[ ^{226}\text{Ra} \right] \cdot p_{226\text{Ra}}}{p_{235\text{U}}} \quad (1)$$

gde je  $CR_{187}$  brzina odbroja pika, a  $\varepsilon$  efikasnost detektora na na energiji 185,70 keV,  $m$  masa uzorka zemlje u kg,  $p_{226\text{Ra}}$  i  $p_{235\text{U}}$  prinosi  $^{226}\text{Ra}$ , odnosno  $^{235}\text{U}$ , [ $^{226}\text{Ra}$ ] specifična aktivnost  $^{226}\text{Ra}$  u uzorku u Bq/kg, dobijena analizom  $^{214}\text{Bi}$  i  $^{214}\text{Pb}$  [3].

Prikupljanje gama spektara, korekcija na radioaktivni raspad i fon, kao i analiza rezultata rađena je korišćenjem softvera ORTEC Gamma Vision 32 Model A66-B32 Vrsion 6.01 (Oak Ridge, TN, USA). Sve merne nesigurnosti su prikazane na nivou tačnosti 95%.

**Tabela 1. Karakteristične gama linije korišćene za određivanje aktivnosti radionuklida u uzorcima zemlje.**

Radionuklid	Gama emiter	Energija (keV)	Prinos (%)
$^{238}\text{U}$	$^{234\text{m}}\text{Pa}$	1001,03	84,20
$^{226}\text{Ra}$	$^{214}\text{Pb}$	295,22	18,42
		351,93	35,60
	$^{214}\text{Bi}$	609,32 1120,29	45,49 14,92
$^{235}\text{U}$	$^{235}\text{U}$	185,70	57,00
$^{232}\text{Th}$	$^{228}\text{Ac}$	911,20	25,80
		968,97	15,80
$^{40}\text{K}$	$^{40}\text{K}$	1460,82	10,66
$^{137\text{m}}\text{Cs}$	$^{137\text{m}}\text{Ba}$	661,66	85,10

### 3. Rezultati i diskusija

Izmerene specifične aktivnosti prirodnih radionuklida  $^{40}\text{K}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  i proizvedenog  $^{137}\text{Cs}$  u ispitivanim uzorcima zemlje prikazane su u tabeli 2.

**Tabela 2. Specifične aktivnosti radionuklida u ispitivanim uzorcima zemlje.**

Uzorak	Specifična aktivnost [Bq/kg]					
	$^{40}\text{K}$	$^{137}\text{Cs}$	$^{232}\text{Th}$	$^{238}\text{U}$	$^{235}\text{U}$	$^{226}\text{Ra}$
jezero 0–5 cm	496±40	0,69±0,06	60,3±2,8	55,7±4,5	3,65±0,29	49,1±1,9
jezero 0–1 m	499±40	0,63±0,05	60,5±2,8	85,0±6,8	3,57±0,29	51,1±2,0
jezero 1–2 m	523±42	< 0,4	60,0±2,8	95,3±7,6	3,34±0,27	52,0±2,1
livada 0–5 cm	621±50	1,21±0,10	54,3±2,5	84,2±6,7	3,98±0,32	80,6±3,2
livada 0–1 m	728±58	0,60±0,05	57,3±2,6	69,2±5,5	4,10±0,33	38,0±1,5
livada 1–2 m	632±51	< 0,4	53,3±2,5	107,4±8,6	6,14±0,49	66,0±2,6
prvo jalovište 0–5 cm	819±66	2,58±0,21	80,9±3,7	180±14	20,2±1,6	647±26
prvo jalovište 0–1 m	900±72	15,6±1,2	100,5±4,6	258±21	26,5±2,1	1054±42
prvo jalovište 1–2 m	1010±81	< 0,4	95,9±4,4	340±27	47,3±3,8	1197±47

Distribucija radionuklida po profilu zemljišta nije homogena. Dobijene vrednosti za specifične aktivnosti  $^{40}\text{K}$  u analiziranim uzorcima zemlje kretale su se u opsegu 496–1010 Bq/kg i poklapaju se sa srednjim specifičnim aktivnostima  $^{40}\text{K}$  koje su ranije publikovane [4, 5].

U analiziranim uzorcima, osim  $^{137}\text{Cs}$ , nije primećeno prisustvo ni jednog drugog veštačkog radionuklida. U većini uzoraka je detektovano prisustvo  $^{137}\text{Cs}$  u tragovima: dobijene vrednosti  $^{137}\text{Cs}$  su u tri uzorka bile manje od 0,4 Bq/kg, a u ostalim u opsegu 0,63–15,6 Bq/kg, što je nešto niže od vrednosti dobijenih za zemljišta sa područje Kalne [5] i grada Beograda [6] koje su prezentovane u drugim radovima, ranijih godina.

Vrednosti specifičnih aktivnosti prirodnih radionuklida  $^{232}\text{Th}$  i  $^{226}\text{Ra}$  kretale su se u opsegu 53,3–100,5 Bq/kg i 38,0–1197 Bq/kg, respektivno. Odnos dobijenih specifičnih aktivnosti  $^{235}\text{U}$  i  $^{238}\text{U}$  za uzorake sa nekadašnjeg jezera i sa livade, bio je u opsegu 0,035–0,066 što približno odgovara odnosu u prirodnom uranijumu (~ 0,046). U uzorcima sa prvog jalovišta sa sve tri dubine, udeo  $^{235}\text{U}$  u odnosu na  $^{238}\text{U}$  bio je blago povišen i u opsegu 0,103–0,140.

Na osnovu dobijenih vrednosti (tabela 2) uočava se trend povećanja specifičnih aktivnosti  $^{238}\text{U}$  i  $^{226}\text{Ra}$  sa dubinom, na osnovu čega se može zaključiti da postoji višedecenijski proces transporta navedenih radionuklida u dublje slojeve zemljišta. Usled prisustva ostataka materijala nastalog kao posledica prerade rude i oksidacionih uslova uslovljenih prolaskom kiseonika kroz zemljište, stvarana je pogodna kiselost sredine koja je dovela do prelaska nerastvornog  $\text{U}^{4+}$  jona u rastvorni  $\text{UO}_2^{6+}$  jon, rastvorljiv u vodi, koji lako difunduje u dublje slojeve zemljišta [7]. U slučaju  $^{226}\text{Ra}$ , koji se lako adsorbuje i taloži u zemljištu i obično ostaje u neutralizacionoj zoni, u ovom slučaju moguće da je došlo do transporta  $^{226}\text{Ra}$  u dublje slojeve, usled postizanja pogodnih oksidacionih uslova visoke kiselosti, mikrobiološke aktivnosti i složenih geohemijskih procesa [7, 8].

#### 4. Zaključak

Od devet ispitivanih uzoraka zemlje sa tri lokacije, na tri dubine, u okviru Hidrometalurškog postrojenja u Gabrovnici kod Kalne, jedino uzorci sa lokacije prvog jalovišta pokazuju povišenu radioaktivnost prirodnih radionuklida na sve tri dubine. Specifična aktivnost  $^{226}\text{Ra}$  u ovim uzorcima kretala se u opsegu 647–1197 Bq/kg,  $^{235}\text{U}$  u opsegu 20,2–47,3 Bq/kg i  $^{238}\text{U}$  u opsegu 180–340 Bq/kg. Uzorci uzeti sa lokacija pored ulazne kapije i sa lokacije nekadašnjeg jezera imaju specifične aktivnosti prirodnih i veštačkih radionuklida na nivou prosečnih vrednosti u zemljištu. Ovo je očekivan rezultat s obzirom na to da se na tim lokacijama nije vršila prerada i transport rude, niti odlaganje jalovine.

#### 5. Literatura

- [1] Measurement of Radionuclides in Food and the Environment, *IAEA Technical Report Series No.295*. IAEA, Vienna, 1989.
- [2] Nuclear Data Sheets, NuDat 2.7, National Nuclear Data Centre, Brookhaven National Laboratory, Upton NY, 2016.
- [3] B. Powell, L. Hughes, A. Soreefan, D. Falta, M.Wall, T. DeVol, Elevated concentrations of primordial radionuclides in sediment from Reedy River and

- surrounding creeks in Simpsonville, south Carolina, *J. Environ. Radioac.* 94, 2007, 121–128.
- [4] M. Tanić, M. Momčilović, J. Kovačević, S. Dragović i G. Bačić, Assessment of radiation exposure around abandoned uranium mining area of Stara Planina MT., Serbia, *Nucl. Technol. Radiat. Prot.* 29 (2014), 58–66.
- [5] J. Nikolov, S. Forkapić, J. Hansman, U. Kozmidis-Luburić, I. Bikit, M. Vesković, M. Krmar, N. Todorović, D. Mrđa i K. Bikit, Prirodna radioaktivnost u okolini bivšeg rudnika urana Gabrovnica, *Zbornik radova XXVII Simpozijum Društva za zaštitu od zračenja Srbije i Crne Gore*, 2–4.октобар 2013, Vrnjačka Banja, 2013, 92–96.
- [6] J. Petrović, M. Čujić, M. Dornević, R. Dragović, B. Gajić, Š. Miljanić i S. Dragović, Spatial distribution and vertical migration of  $^{137}\text{Cs}$  in soils of Belgrade (Serbia) 25 years after Chernobyl accident, *Environ. Sci-Proc. Imp.* 15, 2013, 1279–1289.
- [7] S.A. Cumberland, G. Douglas, K. Grice, J.W. Moreau, Uranium mobility in organic matter-rich sediments: A review of geological and geochemical processes, *Earth-Science Reviews*, 159, 2016, 160-185.
- [8] A. Abdelouas, Uranium Mill Tailings: Geochemistry, Mineralogy and Environmental Impact, *Elements* 2, 2006, 335–341.

## RADIOACTIVITY IN SOIL SAMPLES FROM HYDROMETALLURGICAL FACILITY IN GABROVNICA NEAR KALNA

**Marija LEKIĆ, Nevena ZDJELAREVIĆ, Nataša LAZAREVIĆ,  
Ivana MAKSIMOVIĆ and Dalibor ARBUTINA**

*Public Company "Nuclear Facilities of Serbia", Belgrade, Serbia,  
[marija.lekic@nuklearniobjekti.rs](mailto:marija.lekic@nuklearniobjekti.rs), [nevena.zdjelarevic@nuklearniobjekti.rs](mailto:nevena.zdjelarevic@nuklearniobjekti.rs),  
[natasa.lazarevic@nuklearniobjekti.rs](mailto:natasa.lazarevic@nuklearniobjekti.rs), [ivana.maksimovic@nuklearniobjekti.rs](mailto:ivana.maksimovic@nuklearniobjekti.rs),  
[dalibor.arbutina@nuklearniobjekti.rs](mailto:dalibor.arbutina@nuklearniobjekti.rs)*

### ABSTRACT

The Hydrometallurgical facility in Gabrovnica near Kalna was the first uranium mine in the former Yugoslavia. It was in operation between 1963 and 1966, when it was closed due to high costs of processing and exploitation. The Public Company "Nuclear Facilities of Serbia" was established by Law in 2009, and the Gabrovnica mine fell under the jurisdiction of this Company. For the purpose of control of the radioactivity of the soil at the facility site, gamma-spectrometric measurements of the soil samples were done for the samples taken in 2018. from three different depths (surface sample, depth 0–1 m and depth 1–2 m) at three locations within the mine: outside the fence at the site of the former lake, on the meadow to the right of the entrance to the mine and at the first tailing at the meadow below the window of the mine. In this paper, the results of the obtained specific activities of natural radionuclides ( $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{235}\text{U}$  and  $^{238}\text{U}$ ), as well as artificial  $^{137}\text{Cs}$ , are presented and discussed. The obtained values show a trend of increase in the specific activities of  $^{238}\text{U}$  and  $^{226}\text{Ra}$  with depth. Of all the tested samples, only samples taken from the location of the first tailing show increased radioactivity of natural radionuclides at all three depths.



## РАДИОАКТИВНОСТ РАДНЕ И ЖИВОТНЕ СРЕДИНЕ ТЕРМОЕЛЕКТРАНЕ „МОРАВА“ У ПЕРИОДУ 2015 – 2018. ГОДИНЕ

Сузана БОГОЈЕВИЋ, Ирена ТАНАСКОВИЋ, Весна АРСИЋ и Јована ИЛИЋ  
*Институт за медицину рада Србије "Др Драгомир Карајовић", Београд,  
Србија, [suzana.bogojevic@institutkarajovic.rs](mailto:suzana.bogojevic@institutkarajovic.rs),  
[irena.tanaskovic@institutkarajovic.rs](mailto:irena.tanaskovic@institutkarajovic.rs), [vesna.arsic@institutkarajovic.rs](mailto:vesna.arsic@institutkarajovic.rs),  
[jovana.ilic@institutkarajovic.rs](mailto:jovana.ilic@institutkarajovic.rs)*

### САДРЖАЈ

Фосилна горива која се користе у термоелектранама садрже минерале са траговима природних радионуклида. Сагоревање угља, у процесу производње електричне енергије у термоелектранама, доводи до обогаћења шљаке и пепела природним радионуклидима, што представља опасност за околину. Резултати систематског праћења радиоактивности у радној и животној средини термоелектране "Морава", у близини Свилајнца, у периоду 2015 – 2018. године, су приказани у овом раду. Испитани су узорци угља, шљаке, земљишта, пепела са депонија, биљних култура и узорци и отпадне воде и воде за пиће. Концентрације природних радионуклида су одређене гама-спектрометријски. За узорке воде су урађена су додатна мерења укупне алфа и укупне бета активности. Резултати су показали да су концентрације радионуклида у пепелу и шљаци веће од одговарајућих концентрација у земљишту, али не и довољно велике да значајно утичу унутрашњу и спољашњу експозицију запослених лица и становништва. Истовремено са узимањем узорака, на свим локацијама за узорковање, вршено је мерење јачине апсорбоване дозе гама зрачења у ваздуху и измерене вредности су се кретале у границама природног фона.

### 1. Увод

У процесу производње електричне енергије у електранама, угљ сагорева на 1200-1700°C са вишком кисеоника. Минерали у угљу садрже микро количине природних радионуклида из уранијумове и торијумове серије као и <sup>40</sup>К. Ови радионуклиди се у процесу сагоревања редистрибуирају и концентришу у шљаци и пепелу. Изотопи калијума, радијума и торијума се са алумосиликатима топе и падају на дно. У зависности од врсте једињења, уранијум остаје у витрификованом пепелу или испарава и кондензује на честицама летећег пепела. Врло мали део укупног пепела (1%) испушта се кроз димњак. Остатак се испира водом и одлаже на депоније шљаке.

Од 1990. године Институт за медицину рада Србије "Др Драгомир Карајовић" бави се систематском контролом радиоактивности радне и животне средине термоелектрана у Србији. Циљ дугорочне контроле радиоактивности радне и животне средине термоелектрана је процена повећања радиоактивности изнад



природног фона, као и идентификовање потенцијалних локалних извора радио-активности.

Резултати обухватају мерења у периоду 2015-2018 [1,2,3,4]. Испитивани су следећи типови узорака: угаљ, шљака, пепео из процеса производње, шљака и пепео са депонија, пољопривредно земљиште (обрадиво и необрадиво) у близини електране, биљне културе са адекватног земљишта, отпадне воде и вода за пиће.

### 2. Материјал и методе

Узорковање се врши једном годишње. За узорковање и припрему узорака за мерење примењују се стандардне ИСО и МААЕ методе [5,6,7].

Мерење укупне алфа и укупне бета активности вода се обавља помоћу аутоматског нискофонског, поропорционалног, проточног гасног алфа-бета бројача, „PIC-WPC-9550“ произвођача „Protean Instrument Corporation“. Ниво основног алфа зрачења је 0,1 imp/min, а бета зрачења 0,4 imp/min. Пречник планшете је 5 cm. Ефикасност бројача за бета зрачење износи 42%, и одређена је помоћу сертификованог референтног материјала  $^{90}\text{Sr}$ . Ефикасност бројача за алфа зрачење одређена је помоћу сертификованог референтног материјала  $^{241}\text{Am}$  и износи 30%. У процесу мерења се користи рачунарски програм *Vista 2000* набављен од произвођача уређаја.

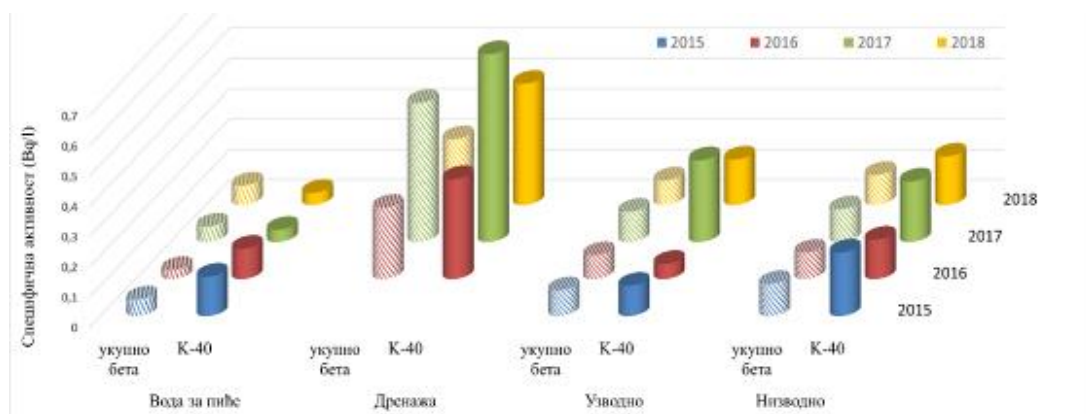
Гамаспектрометријска мерења су извршена помоћу три ORTEC –HPGe детектора релативне ефикасности 25%, 25% и 40% и резолуције на 1332 keV од 1,95 keV; 1,85 keV и 1,85 keV, респективно. Релативна грешка припреме узорка је  $\pm 10\%$  и урачуната је у неодређеност резултата мерења. Енергетска калибрација и калибрација ефикасности детектора врши се помоћу секундарних радиоактивних стандарда, формираних за различите геометрије мерења, од сертификованих референтних материјала [8,9]. Време мерења једног узорка било је од 10000s до 60000s, а основног зрачења 60000s. За обраду енергетских спектра користи се програм *GammaVision*.

За мерење јачине амбијенталног дозног еквивалента коришћен је ручни монитор зрачења МКС-А03. Уређај је калибрисан тачкастим стандардом  $^{232}\text{Th}$  уграђеним у конзолу за пуњење батерије. Мерна несигурност овог уређаја износила је  $\pm 20\%$ .

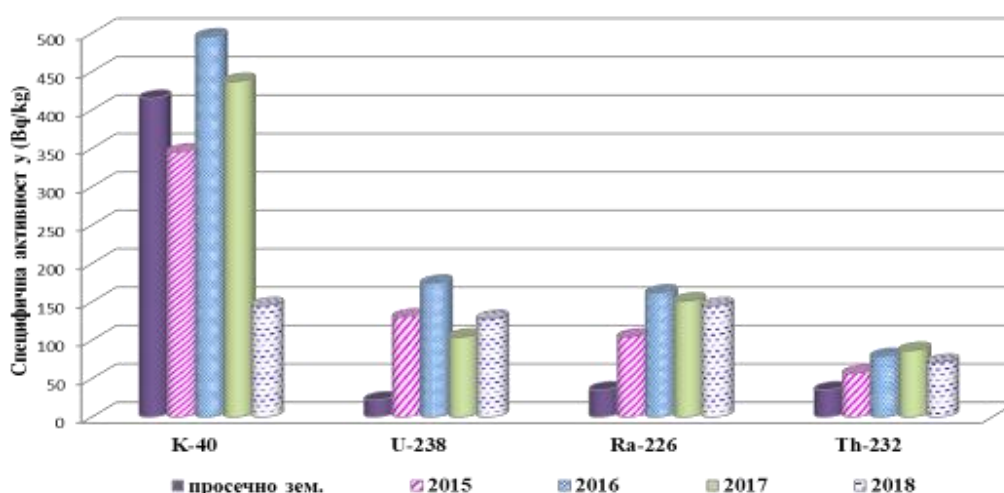
### 3. Резултати и дискусија

Укупна  $\alpha$  активност свих узорака воде била је испод минималне границе детекције. Гамаспектрометријска мерења су показала да су активности  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  и вештачког,  $^{137}\text{Cs}$  такође биле испод минималне границе детекције. Поређењем вредности укупне  $\beta$  активности и специфичне активности  $^{40}\text{K}$ , одређене гама- спектрометријски, у истим узорцима вода, (график 1) видимо да је укупна бета активност нешто мања од специфичне активности  $^{40}\text{K}$ , што је разумљиво, са обзиром да је мерење укупне  $\alpha$  и  $\beta$  активности скрининг метода, мање прецизна у односу на гамаспектрометријску методу. Како се 89,25% од укупног  $^{40}\text{K}$  распада емисијом  $\beta$  честица, када се коригују вредности за активност добијену гамаспектрометријски, разлика између добијених вредности за специфичну активност  $^{40}\text{K}$  и укупне  $\beta$  активности, је реда величине мерне несигурности, тако да можемо закључити да измерена  $\beta$  активност потиче од  $^{40}\text{K}$  и креће се у дозвољеним границама [10].

У табели 1 приказани су резултати гамаспектрометријских мерења узорка угља, пепела, шљаке. Резултати мерења специфичних активности радионуклида у узорцима земљишта, приказане су на графику 4, а у табели 2 дате су средње вредности са минималним и максималним вредностима. Активност  $^{137}\text{Cs}$  је била изнад минималне границе детекције само у узорцима земљишта, док је у узорцима угља, пепела, шљаке била испод минималне границе детекције. Измерене вредности специфичних активности радионуклида у земљишту одговарају просечним вредностима у републици Србији [11,12]. Специфичне концентрације природних радионуклида на пасивним и активним касетама ТЕ Морава у периоду 2015-2018. године у поређењу са вредностима у просечном земљишту приказане су на графицима 2 и 3, одакле се види да су концентрације природних радионуклида на депонијама повећане, али не у мери која би битно допринела повећању екстерног и интерног озрачивања запослених лица и становништва [10,11,12].



**График 1. Специфичне концентрације  $^{40}\text{K}$  у поређењу са укупном бета активношћу узорка воде за пиће и отпадних вода из ТЕ Морава, периоду 2015-2018.**



**График 2. Специфичне концентрације природних радионуклида на пасивним касетама ТЕ Морава у периоду 2015-2018. године у поређењу са вредностима у просечном земљишту.**

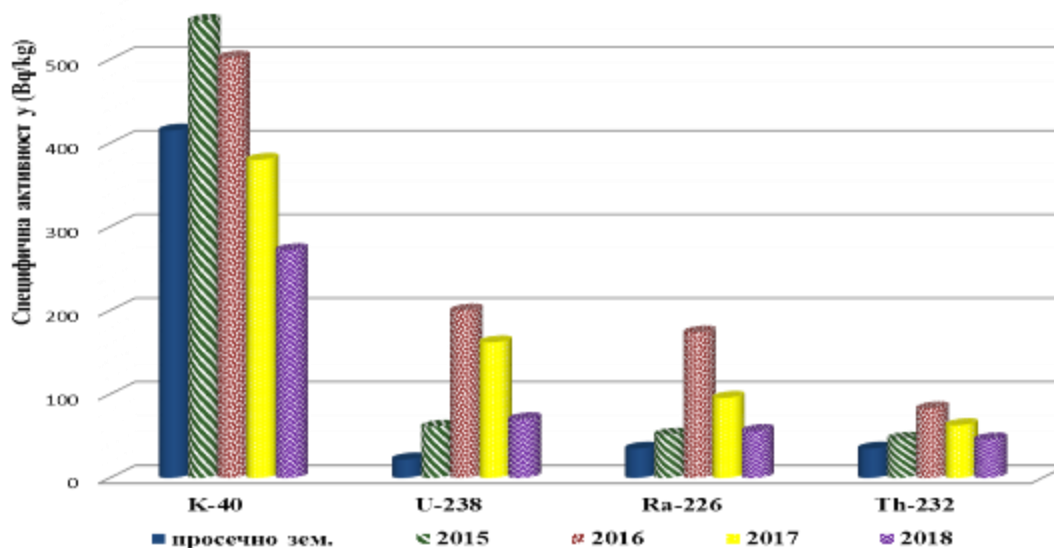


График 3. Специфичне концентрације природних радионуклида на активним касетама ТЕ Морава у периоду 2015-2018. године у поређењу са вредностима у просечном земљишту.

Табела 1. Средње вредности специфичних активности радионуклида у узорцима угља, пепела и шљаке са минималним и максималним вредностима.

Врста узорка и место узорковања	<sup>226</sup> Ra (Bq/kg)	<sup>232</sup> Th (Bq/kg)	<sup>40</sup> K (Bq/kg)	<sup>238</sup> U (Bq/kg)	<sup>235</sup> U (Bq/kg)
Угаљ са додавача	32 ± 20* 12 - 51**	29 ± 10 18 - 37	157 ± 58,3 90,0 - 191	33 ± 26 17 - 63	2,0 ± 0,7 1,5 - 2,8
Шљака испод крацера	69 ± 29 36 - 89	51 ± 18 30 - 61	286 ± 89 184 - 343	93 ± 27 62 - 111	3,4 ± 1,4 1,8 - 4,5
Електрофилтерски пепео	104 ± 33 72 - 138	76 ± 12 63 - 86	395 ± 65 323 - 450	118 ± 41 90 - 165	4,6 ± 2,2 3,3 - 7,2
Пепео са депоније пепела и шљаке - активна касета	94 ± 57 52 - 174	60 ± 18 46 - 83	425 ± 124 271 - 546	123 ± 69 61 - 200	4,8 ± 2,8 2,1 - 8,4
Пепео са депоније пепела и шљаке - пасивна касета	140 ± 25 104 - 161	73 ± 13 56 - 87	420 ± 63 345 - 495	134 ± 29 104 - 174	6,5 ± 1,7 4,4 - 8,1

\* Средња вредност ± стандардна девијација;

\*\* Минимална и максимална вредност.

**Табела 2. Средње вредности специфичних активности радионуклида у узорцима земљишта, са минималним и максималним вредностима.**

Место узорковања земљишта	<sup>226</sup> Ra (Bq/kg)	<sup>232</sup> Th (Bq/kg)	<sup>40</sup> K (Bq/kg)	<sup>238</sup> U (Bq/kg)	<sup>235</sup> U (Bq/kg)	<sup>137</sup> Cs (Bq/kg)
У близини депоније 1	41 ± 5* 34-45**	47 ± 8 4-58	601 ± 121 464-757	61 ± 11 52-77	2,7 ± 1,0 1,7 – 4,0	11 ± 7 2-19
У близини депоније 2	43 ± 19 30-71	47 ± 7 41-55	572 ± 85 481-686	65 ± 16 48-85	2,7 ± 0,8 2,2-3,8	12 ± 15 2 - 33
Даље од депоније Црквенац 1	39 ± 8 28-47	52 ± 8 41 - 60	570 ± 48 443-747	48 ± 2 14-76	2,0 ± 0,3 1,8-2,4	16 ± 4 10 - 19
Даље од депоније Црквенац 2	39 ± 7 31-48	57 ± 8 31 - 48	618 ± 67 549-682	45 ± 22 14-62	2,0 ± 0,6 1,4-2,7	17 ± 4 13 - 22
Даље од депоније Свилајнац 1	47 ± 18 28-71	44 ± 12 30 - 59	503 ± 166 322-645	56 ± 28 19-82	2,0 ± 0,2 1,9-2,2	28 ± 32 7-76
Даље од депоније Свилајнац 2	30 ± 4 25 - 34	39 ± 18 30-48	482 ± 67 429 - 578	37 ± 14 17 - 48	2,0 ± 0,3 1,7 – 2,4	7,9 ± 0,3 3 - 12
Даље од депоније Свилајнац 3	43 ± 10 30 - 51	52 ± 8 41 - 62	647 ± 143 492 - 795	58 ± 12 42 - 71	2,2 ± 0,3 2,0 – 2,7	17 ± 6 11 - 23
Даље од депоније Свилајнац 4	37 ± 4 32 - 42	55 ± 9 45 - 63	479 ± 298 55 - 702	55 ± 27 22 - 85	2,1 ± 0,5 1,5 – 2,7	5 ± 5 1 - 10
Даље од депоније Ловачки дом 1	37 ± 8 28 - 44	52 ± 11 42 - 63	698 ± 150 563 - 842	52 ± 24 25 - 78	2,2 ± 0,5 1,5 – 2,6	16 ± 3 14 - 21
Даље од депоније Ловачки дом 2	39 ± 10 26 - 51	54 ± 16 41 - 73	719 ± 151 576 - 892	46 ± 15 27 - 63	2,3 ± 0,5 1,8 – 2,9	20 ± 5 14 - 24

\* Средња вредност ± стандардна девијација;

\*\* Минимална и максимална вредност.

У узорцима биљних култура, поред <sup>137</sup>Cs, испод минималне границе детекције биле су и специфичне активности <sup>235</sup>U. Специфичне активности <sup>226</sup>Ra, <sup>232</sup>Th, <sup>40</sup>K и <sup>238</sup>U измерене у узорцима биљних култура (табела 3), имале су ниске вредности (график 5), које одговарају просечним вредностима у околини термоелектрана у Србији [13].

**Табела 3. Опсег вредности(минималне -максималне) специфичних активности радионуклида у узорцима биљних култура.**

Место узорковања биљне културе	<sup>226</sup> Ra (Bq/kg)	<sup>232</sup> Th (Bq/kg)	<sup>40</sup> K (Bq/kg)	<sup>238</sup> U (Bq/kg)
Са пасивне касете	0,5 – 10,3	0,6 – 5,0	86 – 195	2,1 – 8,8
Са насипа пасивне касете	0,3 – 8,1	0,5 – 1,7	46 – 284	1,5 – 6,2
Са насипа активне касете	0,3 – 6,0	0,5 – 3,9	37 – 308	2,3 – 3,6
Са земљишта у близини депоније	0,3 – 4,6	0,4 – 2,0	32 – 235	2,6 – 3,7
Са земљишта даље од депоније	0,3 – 2,5	0,6 – 2,7	101 – 288	1,2 – 4,1

Истовремено са узимањем узорака, вршено је мерење јачине амбијенталног дозног еквивалента на 1 метар изнад површине земљишта. Добијени резултати мерења, са свих локација на којима је вршено узорковање, крећу се у опсегу од 0,08 – 0,10 μSv/h што је у границама варијације природног фона.

Јачина апсорбоване дозе гама зрачења, која потиче од активности радионуклида у земљишту израчуната је на основу једначине 1 [14]:

$$\dot{D} = 0,462A_{Ra} + 0,604A_{Th} + 0,417A_K \quad (1)$$

Где су:  $\dot{D}$  јачина апсорбоване дозе у (nGy/h),  $A_{Ra}$ ,  $A_{Th}$  и  $A_K$  у (Bq/kg) средње вредности специфичних активности  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и  $^{40}\text{K}$ , респективно. На основу ове релације може се одредити годишња ефективна доза гама зрачења коришћењем једначине 2 [14]:

$$D_E(\text{mSv/god}) = \dot{D}(\text{nGy/h}) \cdot 24\text{h} \cdot 365\text{d} \cdot 0,7(\text{Sv/Gy}) \cdot 0,2 \cdot 10^{-6} \quad (2)$$

Где је  $D_E(\text{mSv/god})$  годишња ефективна доза гама зрачења,  $0,7(\text{Sv/Gy})$  конверзиони фактор, d -дани и h-сати. Уз претпоставку да становништво проводи у просеку 20% времена на отвореном, годишња ефективна доза се креће у опсегу 0,05 – 0,14 (mSv/god) са средњом вредношћу од 0,09 (mSv/god) што одговара просечним вредностима у Србији: 0,02-0,11 (mSv/god) [12]; 0,06-0,15 (mSv/god) [14].

#### 4. Закључак

Здравствени ризик особа које живе и/или раде у околини термоелектране „Морава“, процењена је на основу приказаних резултата мерења.

Мерењем јачине амбијенталног дозног еквивалента утврђено је да боравак и рад од осам часова дневно за 260 радних дана у години на депонијама термоелектране не доприноси битно повећању екстерне и интерне експозиције запослених лица.

Резултати мониторинга радиоактивности радне и животне средине термоелектране „Морава“ у периоду 2015 - 2018. година, показују да предузете мере заштите функционишу у спречавању повећања контаминације природним радионуклидима пореклом од рада термоелектране. Измерене вредности указују да отпадне воде не утичу на повећање нивоа радиоактивности речне воде, што се могло и очекивати, јер радионуклиди углавном остају у нерастворљивом пепелу и шљаци. Активност  $^{137}\text{Cs}$ , детектованог само у узорцима земљишта, у врло ниским концентрацијама, потиче од чернобилског фолата и не представља опасност по здравље. При садашњим условима, радиоактивност измерена на депонијама, не представља здравствени ризик како за запослене у термоелектрани тако и за становништво у околини.

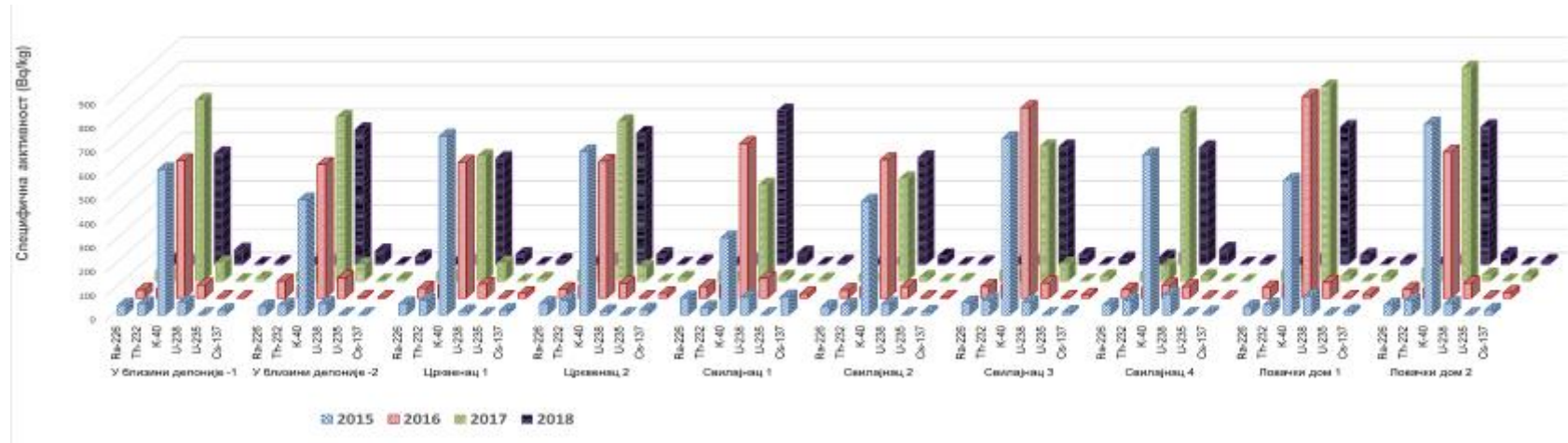


График 4. Специфичне концентрације  $^{137}\text{Cs}$  и природних радионуклида у узорцима земљишта у околини ТЕ Морава у периоду 2015-2018. године.

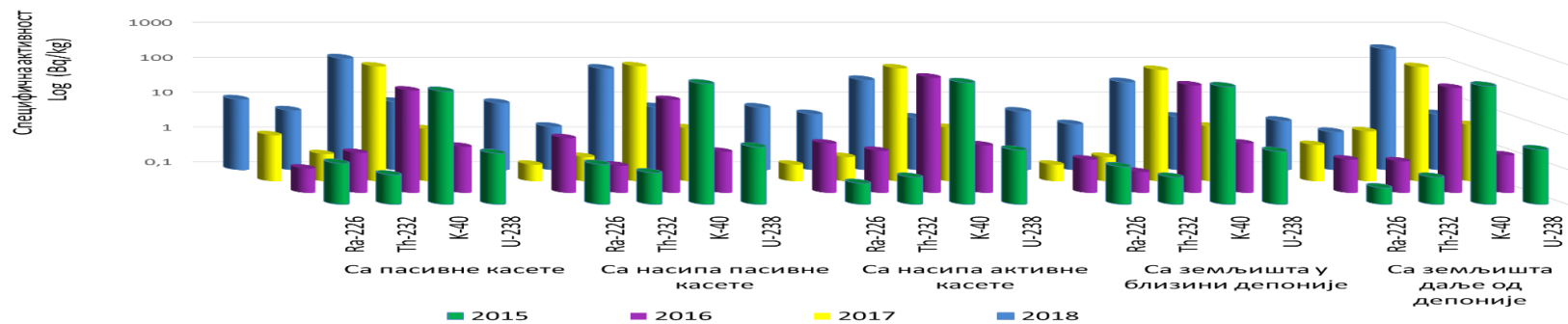


График 5. Специфичне концентрације природних радионуклида у узорцима биљних култура у околини ТЕ Морава у периоду 2015-2018. године (логаритамска скала активности).



### 5. Литература

- [1] С. Богојевић, И. Танасковић, В. Арсић, Ј. Илић, *Контрола радиоактивности у радној и животној средини термоелектране „Морава“ у 2015. години*, Елаборат Института за медицину рада Србије "Др Драгомир Карајовић", Београд, новембар 2015. године.
- [2] С. Богојевић, И. Танасковић, В. Арсић, Ј. Илић, *Контрола радиоактивности у радној и животној средини термоелектране „Морава“ у 2016. години*, Елаборат Института за медицину рада Србије "Др Драгомир Карајовић", Београд, јануар 2017. године.
- [3] С. Богојевић, И. Танасковић, В. Арсић, Ј. Илић, *Контрола радиоактивности у радној и животној средини термоелектране „Морава“ у 2017. години*, Елаборат Института за медицину рада Србије "Др Драгомир Карајовић", Београд, децембар 2017. године.
- [4] С. Богојевић, И. Танасковић, В. Арсић, Ј. Илић, *Контрола радиоактивности у радној и животној средини термоелектране „Морава“ у 2018. години*, Елаборат Института за медицину рада Србије "Др Драгомир Карајовић", Београд, фебруар 2019. године.
- [5] "Water quality – Measurement of gross alpha activity in non-saline water – Thick source method", ISO9696:1992.
- [6] "Water quality – Measurement of gross beta activity in non-saline water", ISO9697:1992.
- [7] "Measurement of Radionuclides in Food and the Environment", *Technical Reports Series No. 295*, IAEA Vienna, 1989.
- [8] Pantelić G. Gamma spectrometer calibration with natural radioactive materials. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* 369, 1996, 572-573.
- [9] Пантелић Г.К., Трајић И.М.: "Одређивање криве ефикасности германијумских детектора за различите густине и геометрије узорака", *Зборник радова XVII Југословенског симпозијума за заштиту од зрачења*, Београд, 1993, 199-202.
- [10] Правилник о границама радиоактивне контаминације лица, радне и животне средине и начину спровођења деконтаминације (Сл. Гласник РС. 38/2011).
- [11] G. Pantelić, M. Eremić-Savković, G. Vitorović, V. Vuletić, I. Tanasković, Lj. Javorina, „Radionuclides activity concentration in soil in Serbia“, *Third European IRPA Congress*, 14-16 June 2010, Helsinki, Finland, Book of Abstracts, 261.
- [12] „Извештај о систематском испитивању садржаја радионуклида у земљишту – 2015“ Институт за нуклеарне науке Винча, Институт за медицину рада „др Драгомир Карајовић“, ПМФ Нови Сад - Депертман за физику, Београд, 2015.
- [13] Љ. Јаворина, Г. Пантелић, В. Вулетић, М. Еремић Савковић, И. Танасковић, Радиоактивност биљних култура у околини ТЕНТ А и Б у периоду од 1990 до 2002. године, *Зборник радова, Прво саветовање о депонијама пепела и шљаке термоелектрана*, Обреновац, 24-26.5.2005; 179-182.



- [14] J. Илић, M. Еремић Савковић, В. Арсић, С. Богојевић, И. Танасковић, Садржај природних радионуклида и процена радијационог ризика у околини термоелектрана у Србији, *Зборник радова XXVII Симпозијум ДЗЗ СЦГ*, Врњачка Бања, 2-4. октобар 2013, 83-87.

### **RADIOACTIVITY OF THE WORKING AND ENVIRONMENT OF THE MORAVA THERMAL POWER PLANT IN THE PERIOD FROM 2015 TO 2018**

**Suzana BOGOJEVIĆ, Irena TANASKOVIĆ, Vesna ARSIĆ and Jovana ILIĆ**  
*Institute of Occupational Health of Serbia "Dr Dragomir Karajović", Belgrade, Serbia, [suzana.bogojevic@institutkarajovic.rs](mailto:suzana.bogojevic@institutkarajovic.rs), [irena.tanaskovic@institutkarajovic.rs](mailto:irena.tanaskovic@institutkarajovic.rs), [vesna.arsic@institutkarajovic.rs](mailto:vesna.arsic@institutkarajovic.rs), [jovana.ilic@institutkarajovic.rs](mailto:jovana.ilic@institutkarajovic.rs)*

#### **ABSTRACT**

Coal burning, in the process of producing electricity in thermal power plants, leads to enrichment of slag and ash with natural radionuclides, since minerals found in coal contain traces natural radionuclides. This poses a threat to the environment. The results of the systematic monitoring of radioactivity in the working and living environment of the Morava Thermal Power Plant, near Svilajnac, in the period from 2015 to 2018, are presented in this paper. Samples of coal, slag, soil, ash from landfills, plant crops and samples of drinking and wastewater, were tested. The concentrations of natural radionuclides  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  and anthropogenic  $^{137}\text{Cs}$ , are determined by gamma spectrometry. Additional measurements of gross alpha and gross beta activity were made for water samples. The results showed that the concentrations of radionuclides in ash and slag are higher than the corresponding concentrations in the soil, but not large enough to significantly affect the internal and external exposure of employed persons and the population. Simultaneously with the sampling, at all the sampling locations, measurements of the absorbed dose of gamma radiation in air were made and the measured values were within the limits of natural background.

## ISPITIVANJE KONTAMINACIJE ŽIVOTNE SREDINE OSIROMAŠENIM URANIJUMOM U SRBIJI, 20 GODINA KASNIJE

**Mirjana RADENKOVIĆ, Marija JANKOVIĆ, Nataša SARAP, Dragana  
TODOROVIĆ, Jelena KRNETA NIKOLIĆ, Milica RAJAČIĆ,  
Ivana VUKANAC i Gordana PANTELIĆ**

*Univerzitet u Beogradu, Institut za nuklearne nauke Vinča, Beograd, Srbija,  
mirar@vinca.rs, marijam@vinca.rs, natasas@vinca.rs, beba@vinca.rs,  
jnikolic@vinca.rs, milica100@vinca.rs, vukanac@vinca.rs, pantelic@vinca.rs*

### SADRŽAJ

*U radu su prikazane mogućnosti za ispitivanje kontaminacije životne sredine, do koje je došlo 1999. godine tokom dejstava NATO avijacije osiromašenim uranijumom na nekoliko lokaliteta u južnoj Srbiji. S obzirom na proteklo vreme, imajući u vidu da je izvršena sanacija kontaminiranih područja i da rezultati monitoringa ne pokazuju značajna odstupanja od prirodnih varijacija, za sva dalja istraživanja bi bilo potrebno razmotriti unapredjivanje i uvođenje osetljivijih metoda i tehnika za određivanje niskih koncentracija uranijuma i njegovih izotopa u složenim matriksima iz životne sredine i biološkim materijalima. Dosadašnja istraživanja su obuhvatila radiohemijsku karakterizaciju projektila, ispitivanje sadržaja, distribucije i migracije OU kroz različite segmente životne sredine, mobilnost i veze sa prirodnim supstratima u zemljištu. Za analizu su korišćene radiohemijske analitičke procedure i tehnike kao što su separacija primenom jonske hromatografije, primena trasera, elektrodepozicija, višestepene sekvencijalne ekstrakcije, fluorimetrijska, alfa spektrometrijska i gamaspektrometrijska merenja. Dalja ispitivanja bi se mogla vršiti u pravcu specijacije OU, analize njegove kinetike i termodinamike u fizičko-hemijskim procesima u životnoj sredini uz primenu komplementarnih analitičkih procedura i tehnika visoke osetljivosti i tehnika pogodnih za mikroanalizu čestica i karakterizaciju materijala, kao što su HR ICP-MS, LSC, SIMS,  $\mu$ -XANES itd.*

### 1. Uvod

Tokom dejstava NATO avijacije 1999. godine na teritoriji južne Srbije, došlo je do kontaminacije životne sredine osiromašenim uranijumom (OU), a nedavno je pokrenuta inicijativa da se utvrde posledice ovog događaja na zdravlje ljudi. S obzirom na proteklo vreme, činjenicu da je izvršena sanacija nekoliko kontaminiranih lokaliteta i da rezultati nacionalnog monitoringa radioaktivnosti ne pokazuju bitna odstupanja od varijacija sadržaja prirodnog uranijuma na ovim područjima, u životnoj sredini se ne očekuju značajne koncentracije zaostalog OU [1]. Zato bi odabir odgovarajuće analitičke tehnike određivanja koncentracije OU kao kontrolne metode za ispitivanje zaostale kontaminacije, mobilnosti ili ugradjivanja OU u različite neorganske ili organske susprate bio odlučujući za planiranje svakog narednog istraživanja. Ispitivanjem kontaminacije životne sredine osiromašenim uranijumom bavilo se više

истраживачких група u Srbiji, uglavnom u okviru naučno-istraživačkih projekata koje je finansiralo Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja, kao i tokom projekata sanacije lokaliteta u južnoj Srbiji, a ostvarena je i međunarodna saradnja u ovoj oblasti. Od 2011. godine, u okviru programa nacionalnog monitoringa radioaktivnosti je propisana kontrola radioaktivnosti uzoraka iz životne sredine na područjima, gde je dejstvovano municijom sa OU [2]. Rezultati ovih analiza ne ukazuju na značajna odstupanja od prirodnih varijacija sadržaja i odnosa izotopa uranijuma, te bi se za dodatna ispitivanja morale razmatrati analitičke tehnike sa većom osetljivošću, kao što je masena spektrometrija visoke rezolucije, ali i druge naprednije fizičko-hemijske tehnike, zavisno od potreba istraživanja, koje bi se moglo kretati u smeru ispitivanja specijacije i mobilnosti osiromašenog uranijuma u životnoj sredini. Istraživanja vezana za uticaj na zdravlje, neće biti razmatrana.

### 2. Rezultati dosadašnjih ispitivanja

Prva ispitivanja su se odnosila na radiohemijsku karakterizaciju projektila i proveru prisustva i nivoa kontaminacije na različitim lokalitetima. Rezultati alfa-spektrometrijske analize projektila su pokazali prisustvo izotopa prirodnog porekla (u Bq/kg):  $11,4 \times 10^6$   $^{238}\text{U}$ ;  $1,4 \times 10^6$   $^{234}\text{U}$ ;  $1,14 \times 10^5$   $^{235}\text{U}$  ali i  $7,70 \times 10^4$   $^{236}\text{U}$ ,  $76$   $^{239,240}\text{Pu}$ ; kao i tragove  $^{237}\text{Np}$  nastalih u nuklearnim reakcijama [2]. Uzorci iz životne sredine koji su analizirani pre sanacije terena bili su kontaminirani OU zavisno od lokaliteta i medijuma od 0 do preko 90%, u odnosu na ukupni uranijum. Za utvrđivanje udela OU i prirodnog uranijuma korišćen je odnos izotopa  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  i  $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$  za šta su neophodne merne tehnike koje mogu da odrede pojedinačne izotope uranijuma. Pokazalo se da je najpogodnija skrining metoda za uzorke iz životne sredine gama spektrometrija, zbog svoje jednostavnosti i pouzdanosti pri određivanju  $^{238}\text{U}$  i  $^{235}\text{U}$ , ali da je za niske koncentracije OU u uzorcima voda, vazduha i biološkom materijalu pogodnija alfa spektrometrija, kojom se mogu odrediti sva tri izotopa uranijuma i njihovi odnosi. Najveći nedostatak alfa spektrometrije je svakako dugotrajna procedura radiohemijske separacije uranijuma, koja uprkos visokom radiohemijskom prinosu, obuhvata veliki broj sukcesivnih postupaka (totalno razaranje uzorka, jonska hromatografija, ekstrakcija, uparavanje, koprecipitacija, elektroliza itd.) kao i višednevno merenje na ovaj način pripremljenog alfa-izvora. S druge strane, minimalna detektabilna koncentracija (MDL) je veoma niska, te je u nekim slučajevima (vazduh, urini) ova tehnika nezamenljiva. Pored pomenutih, korišćene su i tehnike za određivanje ukupnog uranijuma (fluorimetrija, fotometrija), koje se takodje mogu koristi kao grube skrining metode, jer povišena koncentracija uranijuma u odnosu na prosečnu za određenu vrstu uzoraka, obično ukazuje na prisustvo kontaminacije pa se mogu preduzeti dalje analize. U periodu do 2007. je uradjena sanacija kontaminiranih područja u južnoj Srbiji (bez Kosova i Metohije), prikupljeni su i analizirani projektili i kontaminirano zemljište do dubine oko 1-2 m. Kontrolna merenja kao i višegodišnji rezultati nacionalnog monitoringa radioaktivnosti na ovim lokalitetima nisu pokazali bitnije varijacije koncentracija uranijuma od prirodno prisutnih, niti odnos izotopa koji značajnije odstupa od prirodnog te bi se moglo zaključiti da osiromašeni uranijum ovde više ne predstavlja značajan izvor širenja kontaminacije (tabela 1) [3]. S druge strane, ne može se isključiti mogućnost da su čestice OU malog aerodinamičkog prečnika, transportovane vazдушnim strujama mogle stići na velike udaljenosti. Analiza uzoraka

vazduha uzetih tokom sanacije terena je pokazala visoke procenete kontaminacije usled resuspenzije [2].

Istraživanja mobilnosti i geo-frakcionacije OU u zemljištu su pokazala da, u uslovima visoke kontaminacije, OU može biti veoma mobilan i jonska izmena sa okolinom je veoma izražena. Primenom postupka višestepenih sekvencijalnih ekstrakcija po Tessieru, pokazano je da frakcionacija u različitim supstratima zavisi pre svega od tipa zemljišta, dominantna je veza sa oksidima Fe i Mn kao i sa karbonatnim supstratima u zemljištu, ali ne i vezivanje za organsku fazu, što je značajan podatak za predviđanje mobilnosti i potencijalne biodostupnosti pojedinih hemijskih oblika OU [4].

**Tabela 1. Opseg koncentracija i odnosa izotopa uranijuma u zemljištu na lokalitetima u južnoj Srbiji, određeni 2017. godine.**

Lokalitet	<sup>238</sup> U (Bq/kg)		<sup>235</sup> U (Bq/kg)		<sup>235</sup> U/ <sup>238</sup> U (Bq/Bq)
	min	Max	min	max	
Bratospelce	91 ± 8	130 ± 10	5,0 ± 0,4	7 ± 1	0,050 - 0,071
Reljan	28 ± 5	60 ± 6	1,7 ± 0,3	3,6 ± 0,3	0,043 - 0,073
Pljačkovica	21 ± 3	65 ± 6	1,1 ± 0,1	2,6 ± 0,2	0,040 - 0,063
Borovac	14 ± 2	20 ± 3	0,61 ± 0,09	1,1 ± 0,1	0,045 - 0,072

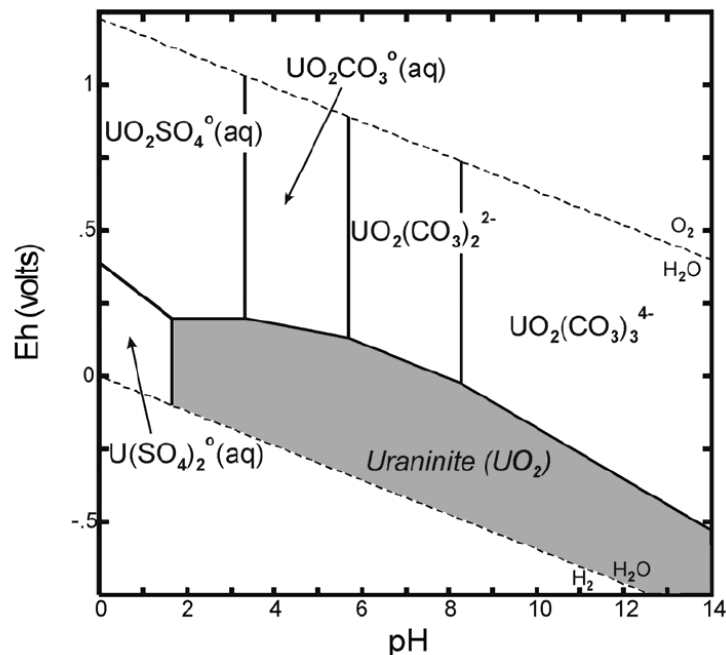
Od velike važnosti za tumačenje rezultata je i vreme kada je sprovedeno ovo istraživanje, u odnosu na trenutak pojave odnosno sanacije kontaminacije OU.

### 3. Napredne metode i tehnike za ispitivanje kontaminacije uranijumom

Analiza dosadašnjih rezultata ispitivanja kontaminacije životne sredine OU u Srbiji, pokazuje da su razvijeni komplementarni postupci i procedure koji u potpunosti mogu da reše problem određivanja niskih koncentracija uranijuma u različitim matriksima. Ako razmišljamo o sadašnjem trenutku, prvi problem sa kojim se suočavamo je protok vremena i mogućnost detekcije potencijalno niskih koncentracija OU, ali i uzimanje reprezentativnih uzoraka. Analitička određivanja bi morala biti unapredjena, vreme izvođenja procedura skraćeno, a osetljivost poboljšana uvođenjem savremenijih materijala, opreme i merne tehnike koja ima višu efikasnost, bolju rezoluciju, itd. Kao prvi izbor se nameće metoda induktivno spregnute plazme sa masenom spektrometrijom (ICP MS), koja u modu visoke rezolucije i uz radiohemijsku separaciju uranijuma, može da postigne dovoljnu osetljivost i selektivnost za određivanje svih izotopa uranijuma sa minimalnom količinom uzorka a može se uspešno primenjivati i za analizu bioloških materijala. Osim toga, za određivanje izotopa uranijuma ili ukupnog uranijuma mogu se koristiti: spektrofotometrija, laserska fluorimetrija (LF), tečna scintilaciona tehnika (LSC), energetski disperzivna fluorescencija x zračenja (EDRF), neutronska aktivaciona analiza sa izotopskim razblaženjem (ID NAA), adsorptivna stripping-voltometrija (ASV), itd.

Drugi pravac istraživanja bi trebalo da se odnosi na ispitivanje specijacije OU, njegove mobilnosti i biodostupnosti ali i razumevanje kinetike i termodinamike fizičko-hemijskih procesa u životnoj sredini. Ukoliko tokom sanacije lokaliteta nisu uklonjeni svi projektili iz zemljišta, oni su verovatno korodirali i potencijalno mobilni ili vezani za supstrate u zemljištu, a pod određenim fizičko-hemijskim uslovima, promenama pH, jonske jačine i oksidoredukcionih potencijala, mogu postati rastvorljivi u vodi i

biodostupni. Na dijagramu (slika 1) se može videti da kombinacija Eh/pH određuje ponašanje uranijuma u nekoj sredini i da veoma male razlike mogu biti odlučujuće i izazvati fiksaciju ili mobilnost u nekoj fazi ili na granicama faza [5]. Za ovu vrstu istraživanja se osim pomenutih mogu koristiti i različite sinhlotronske tehnike karakterizacije materijala i mikroanalize čestica, kao što su SIMS, TXRF-XANES,  $\mu$ -XANES,  $\mu$ -XRD i  $\mu$ -XRF, kojima se mogu odrediti oksidaciona stanja OU i kristalografske osobine čestica OU u različitim sredinama, itd. [5-8]. Pored značaja za ispitivanje pomenutih procesa, ove metode su bitne i za procenu hemijske i radiotoksičnosti uranijuma koja je direktna funkcija morfologije, hemijskog oblika i rastvorljivosti malih čestica uranijuma koje kroz životnu sredinu stižu do živih organizama.



**Slika 1. Dijagram Eh/pH vrednosti uranijuma u kondenzovanoj materiji.**

Svaka od navedenih metoda i tehnika ima određene prednosti i ograničenja (nedostatke) koji se moraju uzeti u obzir pri odabiru, zavisno od mogućnosti i konkretnog cilja istraživanja. Međutim, s obzirom na mobilnost istraživača i dostupnost istraživačke opreme kakva danas postoji, izvesno je da se i tehnike koje trenutno nisu prisutne u Srbiji, mogu koristiti uspostavljanjem međunarodne tehničke saradnje. Teorijska razmatranja i primena modeliranja mogu značajno doprineti rasvetljavanju procesa koji su se već odigrali u životnoj sredini, predikciji njihovog daljeg razvoja kao i adekvatnoj proceni uticaja kontaminacije OU na životnu sredinu i zdravlje ljudi [9-10].

#### 4. Zaključak

Na osnovu izloženih rezultata može se zaključiti da ispitivanja posledica prisustva osiromašenog uranijuma u životnoj sredini u Srbiji, koja bi se mogla sprovesti u ovom trenutku, podrazumevaju odabir analitičkih tehnika visoke osetljivosti ali i komplementarnih metoda za ispitivanje specijacije, kinetike i termodinamike uranijuma u životnoj sredini kao i odgovarajuće procene primenom modeliranja.

### 5. Zahvalnica

Autori su zahvalni MPNTR za podršku u kroz finansiranje projekta III43009.

### 6. Literatura

- [1] Direktorat za radijacionu i nuklearnu sigurnost i bezbednost Srbije, Ispitivanje sadržaja radionuklida u životnoj sredini u 2017. godini na lokacijama na kojima je dejstvovano osiromašenim uranijumom, <http://www.srbatom.gov.rs/srbatom/monitoring-radioaktivnosti.htm>.
- [2] Pravilnik o utvrdjivanju programa sistematskog ispitivanja radioaktivnosti u životnoj sredini Sl. glasnik br. 100/10, 2010.
- [3] M. Radenković, *Uticaj kontaminacije uranijumom na radiološke i hemijske karakteristike ekosistema*, doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Fakultet za fizičku hemiju, 2008.
- [4] M. Radenković, S. Cupać, J. Joksić J, D. Todorović. Depleted uranium mobility and fractionation in contaminated soil (Southern Serbia), *Env. Sci. Poll. Res.* 15(1), 2008, 61-67.
- [5] D. Langmuir: Uranium Solution- Mineral equilibria at low temperatures with applications to sedimentary ore deposits, *Geo. Cosmochim. Acta.* 42, 1978, 547-569.
- [6] K. Sanyal, A. Khooha, G. Das, M. Tiwari and N. L. Misra. Direct determination of oxidation states of uranium in mixed-valent uranium oxides using total reflection X-ray fluorescence X-ray absorption near-edge spectroscopy, *Anal. Chem.* 89, 2017, 871–876
- [7] S. Torok, J. Osana, L. Vincze, S. Kurunczi, G. Tamborini, and M. Betti. Characterization and speciation of depleted uranium in individual soil particles using microanalytical methods, *Spectrochim. Acta.* 59, 2004, 689–699.
- [8] K. Elena L. Mühr-Ebert, F. Wagner, C. Walther. Speciation of uranium: Compilation of a thermodynamic database and its experimental evaluation using different analytical techniques, *Appl. Geochem.* 100, 2019, 213–222.
- [9] *An introduction to the chemometric evaluation of environmental monitoring data using PMF* Sara Comero, Luisa Capitani and Bernd Manfred Gawlik, EC JRC Ed. Institute for Environment and Sustainability, Ispra, 2009.
- [10] A new version of the ERICA tool to facilitate impact assessments of radioactivity on wild plants and animals J.E. Brown, B. Alfonso, R. Avila, N.A. Beresford, D. Coplestone, A. Hossein, *J. Environ. Rad.* 152, 2016, 141-148.



**STUDY ON THE ENVIRONMENTAL CONTAMINATION BY  
DEPLETED URANIUM IN SERBIA, 20 YEARS LATER**

**Mirjana RADENKOVIĆ, Marija JANKOVIĆ, Nataša SARAP,  
Dragana TODOROVIĆ, Jelena KRNETA NIKOLIĆ, Milica RAJAČIĆ,  
Ivana VUKANAC and Gordana PANTELIĆ**

*University of Belgrade, Vinča Institute of Nuclear Sciences, Belgrade, Serbia,  
[mirar@vinca.rs](mailto:mirar@vinca.rs), [marijam@vinca.rs](mailto:marijam@vinca.rs), [natasas@vinca.rs](mailto:natasas@vinca.rs), [beba@vinca.rs](mailto:beba@vinca.rs),  
[jnikolic@vinca.rs](mailto:jnikolic@vinca.rs), [milica100@vinca.rs](mailto:milica100@vinca.rs), [vukanac@vinca.rs](mailto:vukanac@vinca.rs), [pantelic@vinca.rs](mailto:pantelic@vinca.rs)*

**ABSTRACT**

The capabilities of study on environmental contamination caused 1999 by NATO air strikes using depleted uranium at several locations in southern Serbia. Having in mind passed time, implemented clean up activities in contaminated areas and no indication of significant deviations from natural levels within the monitoring assessment, for any further studies on low level uranium and its isotopes concentrations in complex environmental and biological samples, the advanced and more sensitive methods and techniques should be involved. Up to now, the studies on the radiochemical characterization of the projectile, depleted uranium contents, distribution and migration through the environmental departments and on ingress into natural substrates, have been conducted using the radiochemical analytical procedures and techniques like ion chromatography separations, application of tracers, electrodeposition, multi-step sequential extractions, fluorometric, alpha spectrometric and gama spectrometric measurements. The topic of further studies may be depleted uranium speciation, kinetic and thermodynamic analysis of its behaviour in environmental physicochemical processes so that complementary highly sensitive analytical procedures and techniques as well as techniques suitable for particles microanalysis and materials characterization, like HR ICP-MS, LSC, SIMS,  $\mu$ -XANES, etc, should be considered.



## EMPIR PROJECT 16ENV04 PREPAREDNESS – MAIN GOALS AND RESEARCH DIRECTIONS

Miloš ŽIVANOVIĆ<sup>1</sup>, Stefan NEUMAIER<sup>2</sup>, Olivera CIRAJ BJELAC<sup>1</sup>,  
Gordana PANTELIĆ<sup>1</sup>, Miloš DAVIDOVIĆ<sup>1</sup>, Nikola KRŽANOVIĆ<sup>1</sup>  
and Jelena STANKOVIĆ PETROVIĆ<sup>1</sup>

- 1) Vinca Institute of Nuclear Sciences (VINS), University of Belgrade, Belgrade, Serbia,  
[milosz@vinca.rs](mailto:milosz@vinca.rs), [ciraj@vinca.rs](mailto:ciraj@vinca.rs), [pantelic@vinca.rs](mailto:pantelic@vinca.rs), [davidovic@vinca.rs](mailto:davidovic@vinca.rs),  
[krzanovic@vinca.rs](mailto:krzanovic@vinca.rs), [jelena.stankovic@vinca.rs](mailto:jelena.stankovic@vinca.rs)
- 2) Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Braunschweig, Germany,  
[stefan.neumaier@ptb.de](mailto:stefan.neumaier@ptb.de)

### ABSTRACT

*16ENV04 Preparedness is a research project within the EMPIR 2016 environment call. The main project goal is to increase the preparedness for nuclear and radiological incidents and accidents that might occur in the future. The preparedness will be increased by pursuing several directions of research: use of unmanned aerial vehicles for radiological measurements, use of transportable air-sampling systems, investigating the crowd sourced radiological data for possible official uses and investigating the use of passive dosimetry systems for ambient monitoring. Another aspect of preparedness is to try to reduce the possibility of unwarranted panic caused by the data disseminated by citizen networks and other sources and to increase confidence in official data. To realize the project goals, communication with stakeholders and dissemination of results are of greatest importance.*

### 1. Introduction

The European Metrology Programme for Innovation and Research (EMPIR) is a programme aimed at metrology research, supporting and developing the SI system. One of the aims of the programme is to address the big challenges that exceed the budgets and possibilities of individual National Metrology Institutes (NMI) and Designated Institutes (DI) by providing additional funding and bringing several NMIs and DIs together. Another aim is to consolidate European research to make it more competitive globally. The programme also has capacity building projects which are intended to help emerging NMIs and DIs develop to the point where they can contribute to European science and take part in other EMPIR calls. EMPIR calls cover several different areas: health, environment, energy, industry, fundamental metrology, standardisation, research potential (capacity building) and dissemination (following successful projects from other calls).

“16ENV04 Preparedness, Metrology for mobile detection of ionising radiation following a nuclear or radiological incident” (in the following text – Preparedness), is a joint research project from the 2016 environment call. The project has brought together 17 partners in total – 3 NMIs, 3 DIs and 11 externally funded partners – the European Commission Joint Research Centre, universities, testing laboratories etc.

The project has 4 work packages dealing with different research topics. Vinca Institute of Nuclear Sciences (VINS) is involved in work packages 1, 2 and 4, with a total of twenty researcher months.

### **2. Project overview**

Nuclear and radiological accidents and incidents may cause exposure of the public to ionising radiation and radioactive contamination. Possible events include terrorist attacks. During such events, thousands or even millions of people may be affected. In some cases, large scale decontamination is not possible so there is a need for long-term measurements in affected and contaminated areas. The need for preparedness, i.e. for fast and reliable response and for exchange of information is stated in several International Atomic Energy Agency and European Commission documents, among others [1, 2, 3].

Dealing with nuclear and radiological events requires reliable and metrologically sound data. New and improved measurement methods as well as measurement instruments are needed to improve the capabilities for quickly gathering relevant data for large areas. Advances in autonomous vehicles, especially unmanned aerial vehicles (UAV), provide new possibilities for quick and safe measurements in contaminated or inaccessible areas. Proliferation of low-cost instruments within citizen networks also provides possibilities to gather huge amount of data, but the metrological relevance of such data is questionable and will be investigated within the project [4].

The project has five main objectives:

1. Development of Unmanned Aerial Measurement Systems (UAMS), along with the novel methods and procedures for their use
2. Development of transportable air sampling systems
3. Investigation of the relevance of the data provided by citizen networks and development of instruments suitable for citizen networks
4. Harmonization of the use of passive dosimeters for ambient monitoring and creating new procedures
5. Facilitating the uptake of the project's results by the various stakeholders [4].

### **3. Unmanned aerial detection of radiological data – work package 1**

Unmanned aerial vehicles provide a means of fast response during a radiological or nuclear event. UAVs can be combined with measuring devices and ground control to create Unmanned Aerial Measurement Systems. Such measurement systems have several advantages over conventional equipment: data can be acquired faster, measurements can be performed in areas that are inaccessible or unsafe for emergency teams and larger areas can be covered. This technique is also very useful for mapping the contaminated area.

First step in investigating the use of UAMSs and UAVs within Preparedness is the survey of the current legislation regarding the UAVs and the current state of the art regarding both UAMSs and UAVs. Within this task, existing on-board acquisition and transmission protocols are investigated, as well as data format protocols. Air traffic regulations are an important part of this task, because they are different in different European countries, which significantly complicate the possible use of UAMSs in emergency situations.

Other tasks regarding the UAMSs deal with building and characterizing systems based on different spectrometers. The desired features for such systems are a long flight time and hence a long measurement time, high accuracy, electromagnetic compatibility, among others. Due to the limited payload of the available UAVs, spectrometry systems need to be compact. Characterization of UAMSs is performed by running different Monte Carlo codes.

New software will be written and existing software improved regarding data acquisition, processing, transmission and analysis. A procedure for on-board radionuclide concentration calculation will be developed too, so the quantity of data transmitted can be optimized. Additional software will be developed that is capable of calculating dose rate based on the low, medium and high resolution gamma spectra. If possible, the UAMSs will be automated to find hotspots, fly to them and measure radionuclide concentrations.

Finally, protocols will be developed to test and calibrate UAMSs and the field tests will be conducted in accordance with those protocols.

#### **4. Transportable air-sampling systems – work package 2**

Another aspect of preparedness for nuclear and radiological events is the capability of measuring radioactive contamination in the air. Air sampling systems should be transportable so that they can be deployed at the appropriate sites and the deployment should be rapid so the data can be acquired quickly. Automation of the measurements and remote transmission of data are also necessary to improve the response in emergency situations.

Within the Preparedness project, several air sampling systems will be developed and field-tested, alongside the existing commercial systems. Additionally, rapid radiochemical separation procedures will be developed for the measurement of the activities of alpha and beta emitters collected by air sampling systems.

#### **5. Non-governmental networks – work package 3**

Non-governmental networks for ionizing radiation monitoring are in expansion, especially since the Fukushima accident. These networks provide quasi real time data, usually on the levels of the natural ambient dose equivalent rate. On the one hand, the huge amount of data generated by such networks could possibly be used by governmental agencies for better evaluation of the situation and making decisions. On the other hand, the data is available to the general public and could possibly cause unjustified panic or could cause the public to lose confidence in official information. Although some research is already available, especially on the SAFECAST network [5, 6, 7], a comprehensive study (as recently started within the Preparedness project, including intercomparison exercises) has not yet been conducted.

The key point in using data generated by non-governmental networks is the metrological background of such data, i.e. whether or not the data are metrologically sound. Within Preparedness, web and literature surveys of non-governmental networks are conducted. As a result of the surveys, 16 types of measuring instruments used in non-governmental networks (MINN) are selected, sourced and commissioned. Finally, the selected MINNs will be tested for inherent background, linearity, energy dependence and the overall performance will be evaluated.

Possible use of CMOS sensors as dosimeters will also be investigated. The CMOS sensors are widely used in mobile phone cameras, and there are several existing applications purportedly measuring dose rates based on the CMOS readings. New types of low-cost instruments will be developed. The new devices will be suitable for official and non-governmental use.

The investigation of the non-governmental networks will also have the additional goal to evaluate the possible use of the crowd sourced data for the European Data Exchange Platform – EURDEP [8].

### **6. Use of passive dosimetry systems for emergency situations – work package 4**

Passive dosimeters, including TL (thermo-luminescence), OSL (optically stimulated luminescence), RPL (radio-photoluminescence) and film dosimeters are currently used for environmental monitoring, i.e. the measurement of ambient dose equivalent in the environment. The advantage of such systems is that they can be used for long term measurements, they can be deployed in large numbers, they don't require power to operate, and they are small, robust and cheap. The possible applications of passive dosimeters in the aftermath of a nuclear or radiological event are very important. However, passive dosimetry procedures are not harmonized within Europe, which could make it difficult to compare results obtained by different services and to reach conclusions regarding the radiological situation.

Within the Preparedness project, comprehensive surveys on the existing standards and the literature data on the use of passive dosimeters in emergency situations will be undertaken. A large comparison of passive dosimetry systems was undertaken and at least 10 existing systems will be tested extensively for linearity, angular dependence and energy dependence. The use of electrets as ambient passive dosimeters will also be investigated. Finally, the harmonization of procedures for measurements using passive dosimeters at European level will be attempted.

### **7. Conclusions**

The research planned within the Preparedness project will help the radiation protection community in Europe and worldwide to deal with radiological and nuclear accidents in the future. The results will be used to protect the public against the dangers caused by ionising radiation, but also to reduce the effects on the environment. One of the key desired outcomes of the project is the strengthening of the public confidence in the official information and the lessening of the possibility of unjustified panic caused by disseminating non-reliable data. Good communication with all stakeholders and the dissemination of the project results are of critical importance for the realisation of the project goals.

### **8. Acknowledgement**

The research presented in this paper was realized within 16ENV04 Preparedness project. This project has received funding from the EMPIR programme co-financed by the Participating States and from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme.

### 9. Literature

- [1] Preparedness and response for a nuclear or radiological emergency: general safety requirements, IAEA safety standards series, no. GSR part 7, STI/PUB/1708. IAEA, Vienna, 2015.
- [2] Council Directive 2013/59/Euratom, laying down basic safety standards for protection against the dangers arising from exposure to ionising radiation. European Council, *Official Journal of European Union* L13, 2014, 1-73.
- [3] Convention on Early Notification of a Nuclear Accident, IAEA- INFCIRC/335. IAEA, Vienna, 1986.
- [4] 16ENV04 Preparedness, Publishable Summary for 16ENV04 Preparedness Metrology for mobile detection of ionising radiation following a nuclear or radiological incident, February 2018, [http://www.preparedness-empir.eu/wp-content/uploads/16ENV04\\_Publishable\\_Summary-Feb-18.pdf](http://www.preparedness-empir.eu/wp-content/uploads/16ENV04_Publishable_Summary-Feb-18.pdf).
- [5] SAFecast, <https://blog.safecast.org/>, accessed on 22.03.2019.
- [6] M. Coletti, C. Hultquist, W.G. Kennedy, G. Cervone. Validating Safecast data by comparisons to a U. S. Department of Energy Fukushima Prefecture aerial survey. *J. Environ. Radioact.* 171, 2017, 9-20.
- [7] G. Cervone, C. Hultquist. Calibration of Safecast dose rate measurements. *J. Environ. Radioact.* 190–191, 2018, 51-65.
- [8] EURDEP (EUropean Radiological Data Exchange Platform). Website: <https://eurdep.jrc.ec.europa.eu/Entry/Default.aspx>, accessed on 22.03.2019.

**EMPIR PROJEKAT 16ENV04 PREPAREDNESS – GLAVNI  
CILJEVI I PRAVCI ISTRAŽIVANJA**

**Miloš ŽIVANOVIĆ<sup>1</sup>, Stefan NEUMAIER<sup>2</sup>, Olivera CIRAJ BJELAC<sup>1</sup>,  
Gordana PANTELIĆ<sup>1</sup>, Miloš DAVIDOVIĆ<sup>1</sup>, Nikola KRŽANOVIĆ<sup>1</sup>  
i Jelena STANKOVIĆ PETROVIĆ<sup>1</sup>**

- 1) *Institut za nuklearne nauke Vinča (VINS), Univerzitet u Beogradu, Beograd, Srbija,  
[milosz@vinca.rs](mailto:milosz@vinca.rs), [ciraj@vinca.rs](mailto:ciraj@vinca.rs), [pantelic@vinca.rs](mailto:pantelic@vinca.rs), [davidovic@vinca.rs](mailto:davidovic@vinca.rs),  
[krzanovic@vinca.rs](mailto:krzanovic@vinca.rs), [jelena.stankovic@vinca.rs](mailto:jelena.stankovic@vinca.rs)*
- 2) *Fizičko-tehnička državna ustanova (PTB), Braunšvajg, Nemačka,  
[stefan.neumaier@ptb.de](mailto:stefan.neumaier@ptb.de)*

**SADRŽAJ**

16ENV04 Preparedness je projekat iz poziva EMPIR 2016 za zaštitu životne sredine. Glavni cilj projekta je poboljšanje pripravnosti za nuklearne i radiološke incidente i akcidente, koji bi mogli da se dogode u budućnosti. Pripravnost će biti poboljšana tako što će se izvršiti istraživanja u nekoliko pravaca: upotreba bespilotnih letelica za radiološka merenja, upotreba mobilnih sistema za uzorkovanje vazduha, istraživanje mogućnosti korišćenja radioloških podataka iz nevladinih mreža i korišćenje sistema pasivnih dozimetara za monitoring okoline. Još jedan od načina za poboljšanje pripravnosti je smanjenje mogućnosti bezrazložne panike koja bi mogla da bude izazvana diseminacijom merenja iz nevladinih mreža i drugih izvora, što bi moglo da izazove i smanjenje poverenja u zvanične podatke. U cilju realizacije projekta, od velikog značaja su diseminacija rezultata i komunikacija sa svim zainteresovanim stranama.

## MEĐUNARODNA INTERKOMPARACIJA GAMASPEKTROMETRIJSKE ANALIZE I UKUPNE ALFA I UKUPNE BETA AKTIVNOSTI VODA

**Irena TANASKOVIĆ, Jovana ILIĆ, Suzana BOGOJEVIĆ i Vesna ARSIĆ**  
*Institut za medicinu rada Srbije "Dr Dragomir Karajović", Srbija,*  
*[irena.tanaskovic@institutkarajovic.rs](mailto:irena.tanaskovic@institutkarajovic.rs), [jovana.ilic@institutkarajovic.rs](mailto:jovana.ilic@institutkarajovic.rs),*  
*[suzana.bogojevic@institutkarajovic.rs](mailto:suzana.bogojevic@institutkarajovic.rs), [vesna.arsic@institutkarajovic.rs](mailto:vesna.arsic@institutkarajovic.rs)*

### SADRŽAJ

*U 2017. i 2018. godini Institut za medicinu rada Srbije "Dr Dragomir Karajović" je učestvovao u ispitivanju gama emitera i ukupne alfa i ukupne beta aktivnosti u uzorcima voda u okviru aktivnosti Međunarodne agencije za atomsku energiju preko programa Mreže analitičkih laboratorija za merenje radioaktivnosti u životnoj sredini ALMERA. Prikazani su rezultati gamaspektrometrijske analize i ukupne alfa i ukupne beta aktivnosti uzoraka voda. Gamaspektrometrijska merenja vršena su na HPGe detektorima, a merenje ukupne alfa i ukupne beta aktivnosti vršeno je na niskofonskom alfa-beta proporcionalnom gasnom brojaču PIC-WPC-9550. Analizirana je voda u kojoj je mešavina svežih fisionih produkata, razblažena voda za primarno hlađenje nuklearnog reaktora i voda u kojoj je mešavina prirodnih i veštačkih radionuklida ( $^{89}\text{Sr}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{210}\text{Po}$ ). Većina rezultata je bila prihvaćena u potpunosti. Rezultati za aktivnosti  $^{133}\text{Ba}$ ,  $^{136}\text{Cs}$  i  $^{99}\text{Mo}$  su bili uslovno prihvaćeni, a rezultati aktivnosti  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{140}\text{Ba}$  i  $^{124}\text{Sb}$  nisu bili prihvaćeni. Urađena je interna kontrola kvaliteta laboratorijskog sertifikovanog referentnog materijala  $^{241}\text{Am}$ , korišćenjem referentnih materijala iste geometrije, filter papir na kome su ravnomerno nakapani alfa emiteri, koje je poslala MAAE. Potvrđeno je višegodišnje pravilno rukovanje sertifikovanim referentnim materijalom  $^{241}\text{Am}$ .*

### 1. Uvod

Jedan od zahteva koje akreditovana laboratorija treba da ispuni je da učestvuje u međulaboratorijskim poređenjima i programima za ispitivanje osposobljenosti (proficiency test-PT) [1, 2]. U 2017. i 2018. godini Odeljenje za radioekologiju je učestvovalo u međunarodnoj interkomparaciji različitih uzoraka iz životne sredine, koju je organizovala Međunarodna agencija za atomsku energiju (MAAE). U uzorcima voda je rađena gamaspektrometrijska analiza i ispitivanje ukupne alfa i ukupne beta aktivnosti. Sva oprema koja se koristi za ispitivanje treba da bude etalonirana, čime se obezbeđuje tačnost i preciznost rezultata ispitivanja. Kontrolisanje i održavanje referentnih materijala koji se koriste kao etaloni, obaveza su svake akreditovane laboratorije [3]. Urađena je interna kontrola kvaliteta laboratorijskog sertifikovanog referentnog materijala  $^{241}\text{Am}$ , korišćenjem referentnih materijala iste geometrije, filter papir na kome su ravnomerno nakapani alfa emiteri, koje je poslala MAAE u okviru međunarodne interkomparacije.



## 2. Materijal i metode

Analizirana je voda u kojoj je mešavina svežih fisijonih produkata u kojoj su prisutni radionuklidi koji podležu tranzitnoj ravnoteži ( $^{95}\text{Zr}/^{95}\text{Nb}$ ,  $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ ,  $^{140}\text{Ba}/^{140}\text{La}$ ) i sekularnoj ravnoteži ( $^{137}\text{Cs}/^{137\text{m}}\text{Ba}$ ), razblažena voda za primarno hlađenje nuklearnog reaktora i voda u kojoj je mešavina prirodnih i veštačkih radionuklida. U 2017. godini za analizu ukupne alfa i beta aktivnosti poslali su filter papiri na kojima su ravnomerno nakapani alfa i beta emiteri. Ovi referentni materijali su iskorišćeni za internu kontrolu kvaliteta sertifikovanog referentnog materijala  $^{241}\text{Am}$ , koji se koristi za kalibraciju alfa beta brojača.

Gamaspektrometrijska merenja vršena su na HPGe detektorima, rezolucije 1,95 keV, odnosno 1,85 keV, relativne efikasnosti 25% odnosno 40% na 1,332 MeV firme "ORTEC". Energetska kalibracija, kao i kalibracija efikasnosti detektora obavlja se sertifikovanim referentnim materijalima mešavinom radionuklida u Marineli od 0,5 l gustine 0,985 g/cm<sup>3</sup> (Czech Metrological Institute). Uzorci voda mereni su u geometriji Marineli 0,5 l više puta na 60000 s [4].

Organizator interkomparacije je za svaki radionuklid dao referentnu vrednost koncentracije aktivnosti i njoj pridruženu kombinovanu mernu nesigurnost. Da bi bio zadovoljen kriterijum prihvatljivosti za tačnost koji je preuzet od MAAE relativno odstupanje ( $\text{BIAS}_{\text{rel}}$ ) mora biti manje ili jednako od maksimalno dozvoljenog relativnog odstupanja (MARB) koje se kreće od 15% do 40% zavisno od radionuklida. Kriterijum prihvatljivosti:  $z_{\text{score}} \leq 2$ .

Merenje ukupne alfa i ukupne beta aktivnosti vršeno je na niskofonskom alfa-beta proporcionalnom gasnom brojaču PIC-WPC-9550, efikasnosti 30% za alfa i 42% za beta zračenje, proizvođača Protean Instrument Corporation. Za kalibraciju se koriste sertifikovani referentni materijali  $^{241}\text{Am}$  i  $^{90}\text{Sr}$  nanešeni na metalne planšete prečnika 4,85 cm (Czech Metrological Institute). У процесу мерења се користи софтвер „VISTA 2000“ [5,6].

## 3. Rezultati i diskusija

U tabelama 1 i 2 su prikazani rezultata gamaspektrometrijske analize voda u 2017. 2018. god. i ocena rezultata u poređenju sa aktivnostima radionuklida MAAE. Rezultati su dati u Bq/kg. Pri ocenjivanju rezultata organizator je koristio standardne parametre uzimajući u obzir i tačnost i preciznost dobijenih laboratorijskih rezultata. Ako je laboratorijski rezultat zadovoljio oba kriterijuma rezultati su ocenjeni sa A, ako nije prihvaćena preciznost laboratorijskog rezultata prihvatljiv je rezultat sa upozorenjem (W), ako nije prihvaćena tačnost i preciznos laboratorijskog rezultata onda je takav rezultat obeležen kao neprihvatljiv (N).

U tabeli 1 za uzorak vode broj 2 aktivnost  $^{140}\text{Ba}$  od  $51,2 \pm 2,8$  Bq/kg nije prihvaćena. Veća vrednost od referentne vrednosti je posledica srednje vrednosti merenja na HPGe-detektorima, ako se izostavi najveća izmerena vrednost dobijen rezultat od 48,0 Bq/kg zadovoljava kriterijume prihvatljivosti (MARB < 30%). U tabeli 2 za uzorak vode broj 1 aktivnost  $^{210}\text{Pb}$  od  $74 \pm 14$  Bq/kg nije prihvaćena. Poznato je da kalibracija gama detektora korišćenjem referentnog materijala koji u mešavini radionuklida sadrži  $^{241}\text{Am}$ , čiji je pik na samom početku spektra gama linija energije prelaza 59,5 keV, nije pogodan za kalibraciju kada je u pitanju izračunavanje aktivnosti  $^{210}\text{Pb}$ , pošto je i njegov pik na samom početku spektra gama linije enetgije prelaza 46,5 keV. Takođe je poznato da efikasnost mnogih gama detektora ispod 100 keV brzo opada. Laboratorija

planira nabavku referentnog materijala koji sadrži  $^{210}\text{Pb}$ , da bi mogla dobiti tačnije rezultate za prirodni radionuklid  $^{210}\text{Pb}$ . U uzorku vode br. 2 nije prihvaćena vrednost za aktivnost  $^{124}\text{Sb}$ . Ponovnom analizom gamaspektra uočeno je da je pik na gama liniji energije prelaza 602,7 keV koji pripada  $^{124}\text{Sb}$ , povučen od strane mnogo većeg pika na gama liniji energije prelaza 604,7 keV koji pripada  $^{134}\text{Cs}$ . Do lošeg očitavanja neta na 602,7 keV apsolutnog intenziteta tj., broja emitovanih gama-kvanata po raspadu jezgra od 97,8% došlo je zbog vrlo visoke aktivnosti  $^{134}\text{Cs}$  od 3010 Bq/kg. Posledica ovoga je dobijena niža aktivnost  $^{124}\text{Sb}$  od 12,6 Bq/kg. Korišćenjem nove biblioteke, u kojoj je izostavljena gama linija na 602,7 keV, dobijena aktivnost  $^{124}\text{Sb}$  od 32,4 Bq/kg zadovoljava kriterijum ispod 30% za maksimalnu prihvatljivu relativnu grešku u odnosu na referentnu vrednost od 33,5 Bq/kg.

**Tabela 1. Ocena rezultata gamaspektrometrijske analize Instituta za medicinu rada Srbije (IMRS) u poređenju sa aktivnostima MAAE u 2017. godini.**

Uzorak vode broj 1 (IAEA-TEL-2017-04)				Uzorak vode broj 2 (IAEA-TEL-2017-04)			
Radio.	MAAE	IMRS	Prihva.	Radio.	MAAE	IMRS	Prihva.
$^{133}\text{Ba}$	16,9±0,5	16,8±0,3	A	$^{140}\text{Ba}$	37,1±1,1	51,2±2,8	N
$^{137}\text{Cs}$	13,1±0,4	12,8±0,4	A	$^{141}\text{Ce}$	15,7±0,4	19,8±1,0	W
-	-	-	-	$^{143}\text{Ce}$	48±4	45,5±2,1	A
-	-	-	-	$^{99}\text{Mo}$	55,9±1,9	62,1±8,4	A
-	-	-	-	$^{147}\text{Nd}$	15±0,5	16,1±1,9	A
-	-	-	-	$^{239}\text{Np}$	3100±70	3000±97	A
-	-	-	-	$^{103}\text{Ru}$	3,94±0,12	4,5±0,4	A
-	-	-	-	$^{95}\text{Zr}$	8,0±0,2	8,1±0,3	A

**Tabela 2. Ocena rezultata gamaspektrometrijske analize Instituta za medicinu rada Srbije (IMRS) u poređenju sa aktivnostima MAAE u 2018. godini.**

Uzorak vode broj 1 (IAEA-TEL-2018-04)				Uzorak vode broj 2 (IAEA-TEL-2018-04)			
Radio.	MAAE	IMRS	Prihva.	Radio.	MAAE	IMRS	Prihva.
$^{241}\text{Am}$	29,3±0,2	28,4±1,3	A	$^7\text{Be}$	440±12	450±12	A
$^{133}\text{Ba}$	28,6±0,2	25,6±0,8	W	$^{58}\text{Co}$	15,5±1,2	16,9±0,6	A
$^{60}\text{Co}$	97,6±0,8	93,8±2,6	A	$^{60}\text{Co}$	14,3±0,6	15,0±0,5	A
$^{134}\text{Cs}$	58,2±0,3	57,4±0,3	A	$^{134}\text{Cs}$	3010±60	3056±76	A
$^{137}\text{Cs}$	29±0,2	28,6±0,8	A	$^{136}\text{Cs}$	29,2±0,7	25,8±0,9	W
$^{210}\text{Pb}$	95,6±0,9	74±14	N	$^{137}\text{Cs}$	2010±40	2037±58	A
-	-	-	-	$^{131}\text{I}$	241±7	239±7	A
-	-	-	-	$^{54}\text{Mn}$	61,3±1,4	65,2±1,8	A
-	-	-	-	$^{99}\text{Mo}$	470±15	381±11	W
-	-	-	-	$^{86}\text{Rb}$	240±7	251±8	A
-	-	-	-	$^{124}\text{Sb}$	33,5±0,7	12,6±1,6	N

U tabeli 3 su prikazani rezultati ukupne alfa aktivnosti filter papira na kome su nakapani alfa emiteri u 2017. god. i relativno odstupanje rezultata u poređenju sa aktivnostima MAAE. Rezultati su prikazani u Bq/filter papiru. U tabeli 4 su prikazani rezultati ukupne alfa i ukupne beta aktivnosti vode u 2018. god. i ocena rezultata u poređenju sa aktivnostima MAAE. Rezultati su prikazani u Bq/kg.

**Tabela 3. Relativno odstupanje rezultata ukupne alfa aktivnosti filter papira Instituta za medicinu rada Srbije (IMRS) u poređenju sa aktivnostima MAAE u 2017. godini.**

Broj filter papira tj., alfa emitera	IAEA-TEL-2017-04			
	Ukupna aktivnost	Ukupna aktivnost (Bq/uzorku) Laboratorija-RE	Ukupna aktivnost (Bq/uzorku) MAAE	Relativno odstupanje ukupne alfa aktivnosti Bias <sub>rel</sub> (%)
7	Alfa aktivnost	10,1 ± 0,2	10 ± 3,2	1
8	Alfa aktivnost	14,7 ± 0,2	13,8 ± 4,3	6

**Tabela 4. Ocena rezultata ukupne alfa i ukupne beta aktivnosti vode Instituta za medicinu rada Srbije (IMRS) u poređenju sa aktivnostima MAAE u 2018. godini.**

Broj vode	IAEA-TEL-2018-03			Prihvatljivost rez.
1	Alfa aktivnost	104±34	87±2	A
	Beta aktivnost	242±76	181±3	A

Provera aktivnosti setifikovanog referentnog materijala <sup>241</sup>Am, urađena je korišćenjem referentnog materijala MAAE iste geometrije tj., površine od 18,5 cm<sup>2</sup>, filter papira na kome su naneti alfa emiteri. Uzorci filter papira direktno su mereni na alfa-beta brojaču. Na osnovu laboratorijskih rezultata prikazanih u tabeli 3 i relativnog odstupanja ukupne alfa aktivnost do 6% od zadate vrednosti MAAE, potvrđena je pouzdanost korišćenja aktivnosti laboratorijskog sertifikovanog materijala <sup>241</sup>Am, za izračunavanje efikasnosti alfa beta brojača. Rezultati ukupne alfa i ukupne beta aktivnosti vode prikazani u tabeli 4 su prihvaćeni od strane MAAE.

#### 4. Zaključak

Odeljenje za radioekologiju je u 2017. i 2018. godini postiglo dobre rezultate u okviru međunarodne interkomparacije, čime je potvrđena osposobljenost Laboratorije, kompetentnost zaposlenih stručnjaka i održanje akreditacije Laboratorije. Potvrđeno je i višegodišnje pravilno rukovanje sertifikovanim referentnim materijalom <sup>241</sup>Am, u smislu da nije došlo do bilo kakvog oštećenja koje bi moglo da dovede do uticaja na aktivnost <sup>241</sup>Am.

#### 5. Literatura

- [1] SRPS ISO/IEC 17025:2016, tačka 5.9.1.
- [2] PA-02 Pravilnik o učešću međulaboratorijskim poređenjima i programima za ispitivanje osposobljenosti, ATS, 2011.
- [3] SRPS ISO/IEC 17025:2016, tačka 5.6.1.
- [4] Technical Report Series No.295, IAEA, Vienna, 1989.
- [5] ISO 9696 Water quality-Measurement of gross alpha activity in non-saline water Thich source method, 1992.
- [6] ISO 9697 Water quality-Measurement of gross beta activity in non-saline water, 1992.

**INTERNATIONAL INTERCOMPARISON OF  
GAMMASPECTROMETRY ANALYSIS AND TOTAL ALPHA AND  
TOTAL BETA ACTIVITY OF WATER**

**Irena TANASKOVIĆ, Jovana ILIĆ, Suzana BOGOJEVIĆ and Vesna ARSIĆ**  
*Institute of Occupational Health of Serbia "Dr Dragomir Karajović", Belgrade,  
Serbia, [irena.tanaskovic@institutkarajovic.rs](mailto:irena.tanaskovic@institutkarajovic.rs), [jovana.ilic@institutkarajovic.rs](mailto:jovana.ilic@institutkarajovic.rs),  
[suzana.bogojevic@institutkarajovic.rs](mailto:suzana.bogojevic@institutkarajovic.rs), [vesna.arsic@institutkarajovic.rs](mailto:vesna.arsic@institutkarajovic.rs)*

**ABSTRACT**

In 2017 and 2018, the Institute of Occupational Health of Serbia "Dr. Dragomir Karajović" participated in the intercomparison of gamma emitters measurements and total alpha and total beta activity determination in water samples, organized by the International Atomic Energy Agency through the ALMERA Network (Analytical Laboratories for the Measurement of Environmental Radioactivity). The results of gamaspectrometric analysis and total alpha and total beta activities of water samples, are presented. Gamaspectrometry was done by HPGe detector and measurement of total alpha and beta activity was carried out by alpha-beta, low-background, proportional, gas counter-PIC WPC-9550. Analysis were done for samples of water spiked with a mixture of fresh fission products, diluted primary coolant of nuclear power reactor, containing short lived anthropogenic gamma emitters and water spiked with antropogenic and natural gamma emitters  $^{89}\text{Sr}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  and  $^{210}\text{Po}$ . Most of the results were fully accepted. Results for the activities of  $^{133}\text{Ba}$ ,  $^{136}\text{Cs}$  and  $^{99}\text{Mo}$  were conditionally accepted and the results for  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{140}\text{Ba}$  and  $^{124}\text{Sb}$  activities were not accepted. Samples of simulated paper filters, on which alpha emitters were loaded, were used for an internal quality control of the certified reference material  $^{241}\text{Am}$ .

## RADIJACIONI ASPEKTI PRIMENE FOSFOGIPSA U GRAĐEVINARSTVU

**Predrag KUZMANOVIĆ<sup>1,2</sup>, Nataša TODOROVIĆ<sup>1</sup>, Sofija FORKAPIĆ<sup>1</sup>,  
Leposava FILIPOVIĆ PETROVIĆ<sup>2</sup>, Jovana KNEŽEVIĆ<sup>1</sup>, Jovana NIKOLOV<sup>1</sup>,  
Jan HANSMAN<sup>1</sup>, Andrej VRANIČAR<sup>1</sup> i Bojan MILJEVIĆ<sup>3</sup>**

- 1) Univerzitet u Novom Sadu, Prirodno-matematički fakultet, Departman za fiziku, Novi Sad, Srbija, [predrag.kuzmanovic@df.uns.ac.rs](mailto:predrag.kuzmanovic@df.uns.ac.rs), [natasa.todorovic@df.uns.ac.rs](mailto:natasa.todorovic@df.uns.ac.rs), [sofija@df.uns.ac.rs](mailto:sofija@df.uns.ac.rs), [jovana.nikolov@df.uns.ac.rs](mailto:jovana.nikolov@df.uns.ac.rs), [jovana.knezevic@df.uns.ac.rs](mailto:jovana.knezevic@df.uns.ac.rs), [jan.hansman@df.uns.ac.rs](mailto:jan.hansman@df.uns.ac.rs), [andrej.vranicar@df.uns.ac.rs](mailto:andrej.vranicar@df.uns.ac.rs)
- 2) Visoka medicinska i poslovno-tehnološka škola strukovnih studija, Laboratorija za fiziku, Šabac, Srbija, [predrag.kuzmanovic@vmpts.edu.rs](mailto:predrag.kuzmanovic@vmpts.edu.rs), [leposavafp@gmail.com](mailto:leposavafp@gmail.com)
- 3) Univerzitet u Novom Sadu, Tehnološku fakultet, Katedra za inženjerstvo materijala, Novi Sad, Srbija, [miljevic@uns.ac.rs](mailto:miljevic@uns.ac.rs)

### SADRŽAJ

U ovom radu razmatrani su radijacioni aspekti potencijalne primene fosfogipsa u građevinarstvu za proizvodnju gips-karton ploča. Izmerene vrednosti koncentracija aktivnosti <sup>226</sup>Ra za 8 uzoraka fosfogipsa prelaze dozvoljenu granicu od 370 Bq kg<sup>-1</sup> da bi se mogli koristiti u građevinarstvu. Zbog ove činjenice, fosfogips je mešan sa prirodnim gipsom, u masenom udelu od 1 – 50%, kako bi se nivo radioaktivnosti sveo na prihvatljiv nivo. Određeni su, gama indeksi ( $I_\gamma$ ), jačina apsorbovane doze zračenja ( $D$ ) i godišnje efektivne doze ( $E$ ) za uzorke fosfogipsa, prirodnog gipsa, smeša prirodnog gipsa i fosfogipsa, kao i za komercijalne gips-karton ploče. Sve dobijene vrednosti upoređene su sa dozvoljenim vrednostima za građevinske materijale u Srbiji i Evropskoj Uniji.

### 1. Uvod

Fosfogips (PG od eng. *Phosphogypsum*) je materijal koji nastaje kao nus-proizvod pri proizvodnji fosforne kiseline ( $H_3PO_4$ ) koja se koristi za proizvodnju veštačkih đubriva [1]. Prema svom sastavu fosfogips je uglavnom u obliku kalcijum sulfata dihidrata ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ , 96%). Pri proizvodnji jedne tone fosforne kiseline nastane oko 5 tona fosfogipsa [2]. Nastali fosfogips se razlikuje od prirodnog gipsa (NG od eng. *Natural Gypsum*) po tome što može sadržati u sebi mnoštvo nečistoća: fosfate, sulfate, fluoride, teške metale i metale u tragovima (olovo, arsen, fluorin, kadmijum, cink, hrom, bakar i antimon) [3].

Ovaj materijal obično sadrži povećanu koncentraciju aktivnosti <sup>226</sup>Ra (period poluraspada 1620 godina) od nekoliko do nekoliko stotina puta veću u odnosu na prirodni gips u zavisnosti od sadržaja urana u početnoj rudi ( $Ca_5(PO_4)_3F$  - fluor-apatitu) [4]. U Srbiji se godišnje proizvede oko 810 000 tona otpadnog fosfogipsa [5].

Korišćenje fosfogipsa sa povećanim sadržajem <sup>226</sup>Ra kao građevinskog materijala predstavlja dvostruku opasnost za ljude, kako u pogledu izloženosti gama zračenju, tako i u opasnosti od inhalacije <sup>222</sup>Rn i njegovih produkata raspada [6], zbog čega je njegova

upotreba limitirana.  $^{222}\text{Rn}$  je radioaktivni gas, perioda poluraspada 3,8 dana, veoma je mobilan iz građevinskih materijala sa povećanim sadržajem  $^{226}\text{Ra}$  i predstavlja značajni zdravstveni hazard [6, 7]. Koncentracija aktivnosti  $^{226}\text{Ra}$  u fosfogipsu se može kretati od 200 do 3000  $\text{Bq kg}^{-1}$  [8]. Da bi se fosfogips mogao koristiti za proizvodnju građevinskog materijala koncentracija aktivnosti  $^{226}\text{Ra}$  ne sme biti veća od preporučenih 370  $\text{Bq kg}^{-1}$  [9].

Ovaj rad predstavlja prvo šire radiološko istraživanje o potencijalnoj primeni fosfogipsa proizvedenog u Srbiji u građevinarstvu. Glavni ciljevi ovog rada su: ispitivanje nivoa radioaktivnosti u uzorcima fosfogipsa, prirodnom gipsu i komercijalnim gips-karton pločama i procena radijacionog rizika od potencijalne upotrebe fosfogipsa u građevinarstvu, kao dodatka prirodnom gipsu za proizvodnju gips-karton ploča.

## 2. Materijal i metode

### 2.1. Merenje nivoa radioaktivnosti

Uzorci fosfogipsa su uzeti sa odlagališta jedne od industrija veštačkih đubriva u Srbiji. Korišćeni uzorci prirodnog gipsa su uzeti iz okolnih marketa. Uzorci su sušeni 8 – 10 h na 110 °C, nakon toga samleveni i homogenizovani do finog praha. Za gama spektrometrijska merenja samleveni uzorci su prebačeni u cilindrične plastične posude prečnika 6,7 cm i visine 6,2 cm. Uzorci su mereni 40 dana nakon zatvaranja posuda, da bi se uspostavila sekularna radioaktivna ravnoteža između  $^{222}\text{Rn}$  i  $^{226}\text{Ra}$ .

Na osnovu analize nisko-fonske gama spektrometrije određene su koncentracije aktivnosti  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  i  $^{40}\text{K}$  u uzorcima. Uzorci su uzimani i analizirani IAEA TRS 295 metodom [10]. Tipično vreme merenja uzoraka iznosilo je 68 000 s, a masa pojedinačnog osušenog uzorka iznosila je oko 200 g.

Koncentracija aktivnosti  $^{226}\text{Ra}$  procenjena je iz pika gama zračenja  $^{214}\text{Bi}$  na 609,3 keV i gama pika na 351,9 keV od  $^{214}\text{Pb}$ , dok su za određivanje  $^{232}\text{Th}$  korišćene linije gama zračenja emitovane od  $^{228}\text{Ac}$  na 911,2 i 969,1 keV i  $^{212}\text{Pb}$  emitovane na 238,6 keV. Koncentracija aktivnosti  $^{40}\text{K}$  je određena korišćenjem njegove gama linije na 1460,8 keV [11].

Sadržaj radionuklida u uzorcima je meren korišćenjem HPGe ORTEC GMX gama spektrometra, rezolucije 1,9 keV i nominalne efikasnosti 32%. Zaštita oko detektora je napravljena od olova debljine 12 cm. Gama spektri su prikupljeni i analizirani korišćenjem Canberra Genie 2000 softvera. Sve merne nesigurnosti su date na nivou poverenja od 95% [11].

### 2.2. Radiološka karakterizacija uzoraka

S obzirom da više radionuklida doprinosi ukupnoj dozi zračenja iz građevinskog materijala, uveden je reprezentativni gama indeks ( $I_\gamma$ ) koji služi za radiološku karakterizaciju građevinskih materijala i može se izračunati korišćenjem jednačine (1) [13]:

$$I_\gamma = \frac{C_{Ra}}{300 \text{ Bq kg}^{-1}} + \frac{C_{Th}}{200 \text{ Bq kg}^{-1}} + \frac{C_K}{3000 \text{ Bq kg}^{-1}} \quad (1)$$

Gama indeks je u direktnoj korelaciji sa godišnjom efektivnom dozom. Vrednosti  $I_\gamma \leq 2$  odgovara godišnja efektivna doza od 0,3  $\text{mSv y}^{-1}$ , dok vrednosti  $2 \leq I_\gamma \leq 6$  odgovara godišnja efektivna doza od 1  $\text{mSv y}^{-1}$  [13]. Upotrebu građevinskih materijala sa gama



индексом већим од 6 треба избегавати јер премашују препоручену годишњу ефективну дозу за јавност од  $1 \text{ mSv y}^{-1}$  [14, 15]. Препоручена вредност гاما индекса је  $I_\gamma \leq 1$  [15]. Према стандардном моделу просторије димензија  $4 \text{ m} \times 5 \text{ m} \times 2,8 \text{ m}$ , јаčina апсорбоване дозе ( $D$  у јединицама  $\text{nGy h}^{-1}$ ) која потиче од гاما зрачења из датог грађевинског материјала (гипс-картон плоча) којима су обложени плафон и зидови у просторији услед изложености у затвореном простору може се израчунати коришћењем једначине (2) [13]:

$$D = 0,92 \cdot C_{Ra} + 1,1 \cdot C_{Th} + 0,081 \cdot C_K \quad (2)$$

Вредности 0,92; 1,1 и 0,081 су специфичне брзине дозе изражене у  $\text{nGy h}^{-1}$  по  $\text{Bq kg}^{-1}$  за  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и  $^{40}\text{K}$ , респективно [13]. Просечна вредност брзине апсорбоване дозе гاما зрачења за грађевински материјал у свету износи  $55 \text{ nGy h}^{-1}$  [16].

Годишња ефективна доза ( $E$  у јединицама  $\text{mSv y}^{-1}$ ) услед излагања гاما зрачењу која потиче од  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и  $^{40}\text{K}$  из датог грађевинског материјала, може се израчунати коришћењем једначине (3) [15, 17]:

$$E = D(\text{mGy h}^{-1}) \cdot 0,8 \cdot 8760(\text{h}) \cdot 0,7(\text{Sv Gy}^{-1}) \quad (3)$$

где је  $D$  јаčina апсорбоване дозе гاما зрачења у јединицама  $\text{mGy h}^{-1}$ , 0,80 је окупациони фактор, односно 80% времена у једној години (8760 h) током ког је појединец изложен гاما зрачењу у затвореној просторији, а  $0,7 \text{ Sv Gy}^{-1}$  је конверзиони фактор дозе [15, 18]. Дозволјена годишња ефективна доза за појединца која потиче од грађевинских материјала уз изложеност из других извора у Србији износи  $1 \text{ mSv y}^{-1}$  [14].

### 3. Резултати и дискусија

Измерене концентрације активности  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и  $^{40}\text{K}$  у узорцима природног гипса (NG) и комерцијалних гипсаних плоча (GB) дати су у табели 1. Просечне вредности за  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и  $^{40}\text{K}$  износе  $6,7 \pm 0,6 \text{ Bq kg}^{-1}$  за  $^{226}\text{Ra}$ ,  $2,8 \pm 0,6 \text{ Bq kg}^{-1}$  за  $^{232}\text{Th}$  и  $93 \pm 36 \text{ Bq kg}^{-1}$  за  $^{40}\text{K}$ . Све добијене вредности су испод просечних вредности за  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и  $^{40}\text{K}$  у грађевинским материјалима у свету ( $50 \text{ Bq kg}^{-1}$  за  $^{226}\text{Ra}$ ,  $50 \text{ Bq kg}^{-1}$  за  $^{232}\text{Th}$  и  $500 \text{ Bq kg}^{-1}$  за  $^{40}\text{K}$ ) [18].

Измерене концентрације активности  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и  $^{40}\text{K}$  за 8 узорака фосфогипса (PG) произведеног у Србији дате су у табели 1. Просечне вредности за  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и  $^{40}\text{K}$  износе  $600 \pm 28 \text{ Bq kg}^{-1}$  за  $^{226}\text{Ra}$ ,  $3,2 \pm 0,3 \text{ Bq kg}^{-1}$  за  $^{232}\text{Th}$  и  $47 \pm 16 \text{ Bq kg}^{-1}$  за  $^{40}\text{K}$ . Добијене вредности концентрација активности  $^{226}\text{Ra}$  су изнад просечне вредности за грађевинске материјале у свету од  $50 \text{ Bq kg}^{-1}$ , док су концентрације активности  $^{232}\text{Th}$  и  $^{40}\text{K}$  испод просечних вредности за грађевинске материјале у свету [18]. Добијене вредности концентрација активности  $^{226}\text{Ra}$  код свих узорака фосфогипса су изнад границе од дозвољених  $370 \text{ Bq kg}^{-1}$  за коришћење у грађевинској индустрији [9].

Због повећаног садржаја  $^{226}\text{Ra}$  у узорцима фосфогипса, у поређењу са дозвољеном вредношћу од  $370 \text{ Bq kg}^{-1}$  [9], фосфогипс је додан природном гипсу у различитим масеним процентима, након чега је ниво радиоактивности добијених смећа даље праћен. Направљено је 10 смећа од природног гипса (узорак NG2 из табеле 1) и фосфогипса (узорак PG4 из Table 1) са масеним уделом фосфогипса од 1% до 50%. Добијене вредности концентрација активности  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и  $^{40}\text{K}$  у смећама дате су у табели 2. Концентрација активности  $^{226}\text{Ra}$  у свим смећама је испод  $370 \text{ Bq kg}^{-1}$  [9] и креће се у



rasponu od  $8,4 \pm 0,2 \text{ Bq kg}^{-1}$  (1% fosfogipsa u smeši) do  $264 \pm 3 \text{ Bq kg}^{-1}$  (50% fosfogipsa u smeši).

**Tabela 1. Koncentracije aktivnosti  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  i  $^{40}\text{K}$ , gama indeksi ( $I_\gamma$ ), brzine apsorbovanih doza ( $D$ ) i godišnje efektivne doze ( $E$ ) za NG, GB i PG uzorke.**

Uzorak	Koncentracije aktivnosti ( $\text{Bq kg}^{-1}$ )			$I_\gamma$	$D$ ( $\text{nGy h}^{-1}$ )	$E$ ( $\text{mSv y}^{-1}$ )
	$^{226}\text{Ra}$	$^{232}\text{Th}$	$^{40}\text{K}$			
<b>Prirodni gips (NG) i komercijalne gips-karton ploče (GB)</b>						
NG1	$7,1 \pm 0,5$	$2,3 \pm 0,3$	$19 \pm 4$	$0,042 \pm 0,003$	$10,60 \pm 0,08$	$0,0520 \pm 0,0004$
NG2	$8,4 \pm 0,2$	$1,5 \pm 0,4$	$160 \pm 4$	$0,089 \pm 0,003$	$22,37 \pm 0,07$	$0,1097 \pm 0,0004$
GB1	$6,2 \pm 1,0$	$2,1 \pm 0,6$	$23 \pm 7$	$0,039 \pm 0,005$	$9,9 \pm 0,2$	$0,0485 \pm 0,0008$
GB2	$5,1 \pm 1,0$	$5,2 \pm 0,7$	$169 \pm 9$	$0,099 \pm 0,006$	$24,1 \pm 0,2$	$0,1182 \pm 0,0009$
Opseg	5,1–8,4	1,5–5,2	23–169	<b>0,039 – 0,099</b>	<b>9,9 – 24,1</b>	<b>0,0485 – 0,1182</b>
<b>Sr. vr. <math>\pm</math> SD</b>	<b><math>6,7 \pm 0,6</math></b>	<b><math>2,8 \pm 0,6</math></b>	<b><math>93 \pm 36</math></b>	<b><math>0,067 \pm 0,014</math></b>	<b><math>16,7 \pm 3,3</math></b>	<b><math>0,08 \pm 0,02</math></b>
<b>Fosfogips (PG)</b>						
PG1	$488 \pm 15$	$2,8 \pm 1,0$	$< 12$	$1,64 \pm 0,05$	$453 \pm 2$	$2,222 \pm 0,009$
PG2	$520 \pm 11$	$3,4 \pm 1,0$	$< 10$	$1,75 \pm 0,04$	$483 \pm 1$	$2,369 \pm 0,007$
PG3	$737 \pm 8$	$3,3 \pm 1,0$	$12 \pm 6$	$2,48 \pm 0,03$	$683 \pm 1$	$3,349 \pm 0,005$
PG4	$512 \pm 5$	$4,5 \pm 0,9$	$< 5$	$1,73 \pm 0,02$	$476,4 \pm 0,6$	$2,337 \pm 0,003$
PG5	$626 \pm 14$	$2,3 \pm 0,9$	$117 \pm 7$	$2,14 \pm 0,05$	$588 \pm 2$	$2,884 \pm 0,008$
PG6	$649 \pm 9$	$2,1 \pm 0,8$	$< 17$	$2,18 \pm 0,03$	$601 \pm 1$	$2,947 \pm 0,005$
PG7	$609 \pm 4$	$3,9 \pm 0,8$	$105 \pm 6$	$2,07 \pm 0,02$	$570,3 \pm 0,5$	$2,798 \pm 0,002$
PG8	$656 \pm 4$	$3,1 \pm 0,9$	$101 \pm 6$	$2,24 \pm 0,02$	$615,1 \pm 0,5$	$3,017 \pm 0,002$
Opseg	488–737	2,1–004,5	$< 5$ –117	<b>1,6 – 2,5</b>	<b>453 – 683</b>	<b>2,2 – 3,4</b>
<b>Sr. vr. <math>\pm</math> SD</b>	<b><math>600 \pm 28</math></b>	<b><math>3,2 \pm 0,3</math></b>	<b><math>47 \pm 16</math></b>	<b><math>2,03 \pm 0,10</math></b>	<b><math>559 \pm 27</math></b>	<b><math>2,74 \pm 0,13</math></b>
Preporučena granica ili svetski prosek	50 [18]	50 [18]	500 [18]	$\leq 1$ [15]	55 [16]	$\leq 1$ [14]

**Tabela 2. Koncentracije aktivnosti  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  i  $^{40}\text{K}$ , gama indeksi ( $I_\gamma$ ), brzine apsorbovane doze ( $D$ ) i godišnje efektivne doze ( $E$ ) za smeše prirodnog gipsa i fosfogipsa u rasponu od 1-50%.**

Uzorak	% fosfogipsa u smeši	Koncentracija aktivnosti ( $\text{Bq kg}^{-1}$ )			$I_\gamma$	$D$ ( $\text{nGy h}^{-1}$ )	$E$ ( $\text{mSv y}^{-1}$ )
		$^{226}\text{Ra}$	$^{232}\text{Th}$	$^{40}\text{K}$			
M1	1	$13,5 \pm 0,3$	$2,8 \pm 0,2$	$159 \pm 8$	$0,112 \pm 0,003$	$28,27 \pm 0,09$	$0,1387 \pm 0,0004$
M2	2	$17,2 \pm 0,3$	$2,9 \pm 0,2$	$156 \pm 7$	$0,124 \pm 0,003$	$31,64 \pm 0,08$	$0,1552 \pm 0,0004$
M3	2,5	$20,8 \pm 0,5$	$3,2 \pm 0,5$	$159 \pm 8$	$0,138 \pm 0,004$	$35,54 \pm 0,12$	$0,1743 \pm 0,0006$
M4	5	$35,1 \pm 0,4$	$2,6 \pm 0,2$	$149 \pm 4$	$0,179 \pm 0,002$	$47,18 \pm 0,07$	$0,2314 \pm 0,0003$
M5	10	$58,7 \pm 0,7$	$3,1 \pm 0,2$	$151 \pm 7$	$0,261 \pm 0,004$	$69,62 \pm 0,11$	$0,3415 \pm 0,0006$
M6	20	$108 \pm 2$	$4,0 \pm 0,4$	$146 \pm 7$	$0,429 \pm 0,006$	$115,6 \pm 0,2$	$0,567 \pm 0,001$
M7	25	$132 \pm 1$	$3,6 \pm 0,3$	$142 \pm 7$	$0,506 \pm 0,005$	$137,2 \pm 0,2$	$0,673 \pm 0,001$
M8	50	$264 \pm 3$	$3,7 \pm 0,4$	$133 \pm 7$	$0,95 \pm 0,01$	$260,0 \pm 0,4$	$1,276 \pm 0,002$

Dobijene vrednosti gama indeksa ( $I_\gamma$ ), jačine apsorbovanih doza ( $D$ ) i godišnje efektivne doze ( $E$ ) za sve uzorke date su u tabelama 1 i 2.

Vrednosti gama indeksa su ispod preporučene vrednosti od  $I_\gamma \leq 1$  [15] za sve NG, GB i uzorke mešavina, dok su gama indeksi kod svih PG uzoraka iznad ove vrednosti (tabele 1 i 2). Jačina apsorbovane doze je ispod prosečne vrednosti za građevinske materijale u svetu od  $55 \text{ nGy h}^{-1}$  [16] kod svih NG i GB uzoraka, dok su vrednosti kod svih PG uzoraka iznad ove vrednosti, a vrednosti kod uzoraka mešavina M5-M8 (udeo

fosfogipsa 10-50%) prelaze ovu vrednost. Godišnje efektivne doze za sve NG i GB uzorke su ispod preporučenih  $1 \text{ mSv y}^{-1}$  [14], dok su kod PG uzoraka kao i mešavine M8 (udeo fosfogipsa 50%) iznad ove vrednosti.

#### 4. Zaključak

U ovom radu ispitivani su nivoi radioaktivnosti fosfogipsa proizvedenog u Srbiji, kao i radijacioni aspekti njegove primene za proizvodnju gips-karton ploča. Fosfogips ispitivan u ovom radu se može upotrebljavati isključivo kao dodatak prirodnom gipsu, jer njegovo samostalno korišćenje u građevinarstvu može dovesti do značajne izloženosti ljudi jonizujućem zračenju. Dobijeni rezultati ukazuju da dodatak fosfogipsa (sa koncentracijom aktivnosti  $^{226}\text{Ra}$  od oko  $520 \text{ Bq kg}^{-1}$ ) sa masenim udelom do 25% prirodnom gipsu ne daje značajnu izloženost jonizujućem zračenju.

Ovakvim načinom recikliranja otpadnog fosfogipsa bi se smanjile ili bi potpuno nestale deponije fosfogipsa, što bi imalo ekološku i ekonomski korist, i pospešio bi se dalji razvoj hemijske industrije fosforne kiseline.

#### 5. Zahvalnica

Ovaj rad je finansiran sredstvima Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije u okviru projekata broj 171002, 43002 i 45008..

#### 6. Literatura

- [1] A. A. Cuadri, F. J. Navarro, M. García-Morales, J.P. Bolívar. Valorization of phosphogypsum waste as asphaltic bitumen modifier. *J. Hazard. Mater.* 279, 2014, 11–16.
- [2] C. Papastefanou, S. Stoulos, A. Ioannidou, M. Manolopoulou. The application of phosphogypsum in agriculture and the radiological impact. *J. Environ. Radioactiv.* 89, 2006, 188-198.
- [3] D. Nizevičiene, D. Vaičiukyniene, B. Michalik, M. Bonczyk, V. Vaitkevucius, V. Jusas. The treatment of phosphogypsum with zeolite to use it in binding material. *Constr. Build. Mater.* 180, 2018, 134–142.
- [4] Extent of Environmental Contamination by Naturally Occurring Radioactive Material (NORM) and Technological Options for Mitigation. Technical Reports Series No. 419, IAEA Vienna, Austria, 2003.
- [5] Nacrt Regionalnog plana upravljanja otpadom za grad Zaječar i opštine Boljevac, Bor, Kladovo, Majdanpek, Negotin, i Knjaževac, RARIS i FTN, 2016. [https://www.raris.org/download/Regionalni%20plan%20Halovo\\_08-06.pdf](https://www.raris.org/download/Regionalni%20plan%20Halovo_08-06.pdf) (17. 05. 2019.).
- [6] M. F. Maduar, M. P. Campos, B. P. Mazzilli, F. L. Villaverde. Assessment of external gamma exposure and radon levels in a dwelling constructed with phosphogypsum plates. *J. Hazard. Mater.* 190, 2011, 1063–1067.
- [7] K. Gijbels, R. I. Iacobescu, Y. Pontikes, N. Vandevenne, S. Schreurs, W. Schroyers. Radon immobilization potential of alkali-activated materials

- containing ground granulated blast furnace slag and phosphogypsum. *Constr. Build. Mater.* 184, 2018, 68–75.
- [8] Report to Congress on Special Wastes from Mineral Processing: Summary and Findings, United States Environmental Protection Agency (U.S. EPA), Washington, 1990.
- [9] National emission standards for hazardous air pollutants subpart R. Environmental Protection Agency. USEPA, U.S., 2002.
- [10] Measurement of Radionuclides in Food and the Environment, Technical Reports Series No. 295., International Atomic Energy Agency. Vienna, Austria, 1989.
- [11] N. Todorovic, S. Forkapic, I. Bikit, D. Mrdja, M. Veskovic, S. Todorovic. Monitoring for exposures to TENORM Sources in Vojvodina region. *Radiat. Prot. Dosim.* 144, 2011, 655–658.
- [12] Radiological protection principles concerning the natural radioactivity of building materials, Radiation Protection 112. Directorate-General Environment, Nuclear Safety and Civil Protection, European Commission, 1999.
- [13] Pravilnik o granicama sadržaja radionuklida u vodi za piće, životnim namirnicama, stočnoj hrani, lekovima, premetima opšte upotrebe, građevinskom materijalu i drugoj robi koja se stavlja u promet. *Sl. glasnik RS*, br. 36, 2018.
- [14] Sources and effects of ionizing radiation. Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, United Nations New York, 2000.
- [15] Sources and effects of ionizing radiation, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Annex A and B, United Nations, New York, 2008.
- [16] Nuclear Energy Agency. Exposure to radiation from natural radioactivity in building materials. Report by NEA Group of Experts, OECD, Paris, 1979.
- [17] Sources, Effects and risks of ionizing radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, United Nations New York, 1993.

## RADIATION ASPECTS OF APPLICATION OF PHOSPHOGYPSUM IN BUILDINGS

**Predrag KUZMANOVIĆ<sup>1,2</sup>, Nataša TODOROVIĆ<sup>1</sup>, Sofija FORKAPIĆ<sup>1</sup>,  
Leposava FILIPOVIĆ PETROVIĆ<sup>2</sup>, Jovana KNEŽEVIĆ<sup>1</sup>, Jovana NIKOLOV<sup>1</sup>,  
Jan HANSMAN<sup>1</sup>, Andrej VRANIČAR<sup>1</sup> and Bojan MILJEVIĆ<sup>3</sup>**

- 1) *University of Novi Sad, Faculty of Sciences, Department of Physics, Novi Sad, Serbia, [predrag.kuzmanovic@df.uns.ac.rs](mailto:predrag.kuzmanovic@df.uns.ac.rs), [natasa.todorovic@df.uns.ac.rs](mailto:natasa.todorovic@df.uns.ac.rs), [sofija@df.uns.ac.rs](mailto:sofija@df.uns.ac.rs), [jovana.nikolov@df.uns.ac.rs](mailto:jovana.nikolov@df.uns.ac.rs), [jovana.knezevic@df.uns.ac.rs](mailto:jovana.knezevic@df.uns.ac.rs), [jan.hansman@df.uns.ac.rs](mailto:jan.hansman@df.uns.ac.rs), [andrej.vranicar@df.uns.ac.rs](mailto:andrej.vranicar@df.uns.ac.rs)*
- 2) *Higher medical and business-technological school of applied studies in Šabac, Laboratory for Physics, Šabac, Srbija, [predrag.kuzmanovic@vmpts.edu.rs](mailto:predrag.kuzmanovic@vmpts.edu.rs), [leposavafp@gmail.com](mailto:leposavafp@gmail.com)*
- 3) *University of Novi Sad, Faculty of Technology, Department of Materials Engineering, Novi Sad, Serbia, [miljevic@uns.ac.rs](mailto:miljevic@uns.ac.rs)*

### ABSTRACT

In the production of phosphoric acid, large amounts of waste phosphogypsum are produced, which is, according to its characteristics, very similar to a natural gypsum, and as such can be used in construction. In this paper, the radiation aspects of the phosphogypsum potentially used in the construction industry for the production of plasterboard, was considered. The measured activity concentration of <sup>226</sup>Ra for 8 samples of phosphogypsum exceeded the allowed limit of 370 Bq kg<sup>-1</sup> for use in buildings. Due to this fact, phosphogypsum was mixed with natural gypsum, ranging from 1% - 50%, in order to achieve an acceptable level of radioactivity. Gamma indices (I<sub>γ</sub>), absorbed gamma dose rate (D), and annual effective dose (E) were determined for samples of phosphogypsum, natural gypsum, mixture of natural gypsum and phosphogypsum, as well as for commercial gypsum board. All obtained values were compared with the allowed values for building materials in Serbia and in European Union.

## PRIRODNI RADIONUKLIDI U GRAĐEVINSKOM MATERIJALU U SRBIJI

Ljiljana JANKOVIĆ MANDIĆ<sup>1</sup>, Snežana DRAGOVIĆ<sup>1</sup>, Mirjana ČUJIĆ<sup>1</sup>,  
Jelena PETROVIĆ<sup>1</sup> i Antonije ONJIA<sup>2</sup>

- 1) Univerzitet u Beogradu, Institut za nuklearne nauke Vinča, PO Box 522, 11351  
Beograd, Srbija, [ljmandic@vin.bg.ac.rs](mailto:ljmandic@vin.bg.ac.rs), [sdragovic@vin.bg.ac.rs](mailto:sdragovic@vin.bg.ac.rs),  
[cujicm@vin.bg.ac.rs](mailto:cujicm@vin.bg.ac.rs), [petrovicj@vin.bg.ac.rs](mailto:petrovicj@vin.bg.ac.rs)
- 2) Univerzitet u Beogradu, Tehnološki-metalurški fakultet, Karnegijeva 4, 11000  
Beograd, Srbija, [onjia@tmf.bg.ac.rs](mailto:onjia@tmf.bg.ac.rs)

### SADRŽAJ

*Određivanje sadržaja radionuklida u materijalima koji se koriste u građevinarstvu veoma je važno u cilju procene radiološkog uticaja na zdravlje ljudi. U radu su prikazani rezultati gamaspektrometrijskog merenja prirodnih radionuklida u 94 uzorka građevinskog materijala (drvo, pesak, šljunak, opeka, mermer, granit, beton, staklo) koji je u upotrebi u Srbiji. Uzorci su analizirani u periodu 2016 - 2019. godine i opseg izmerenih aktivnosti radionuklida bio je:  $^{226}\text{Ra}$  (5-180) Bq/kg,  $^{232}\text{Th}$  (8-260) Bq/kg  $^{40}\text{K}$ , (20-1480) Bq/kg. Za sve materijale određen je gama indeks i rezultati su upoređeni sa relevantnim podacima iz literature i propisa.*

### 1. Uvod

Savremena građevinska industrija mora da zadovolji niz standarda koji odgovaraju utvrđenim međunarodnim propisima. Građevinski materijali sadrže prirodne radionuklide, a zračenje poreklom od građevinskih materijala neophodno je kontrolisati, posebno u urbanim sredinama gde stanovništvo provodi i do 80% vremena u zatvorenim prostorijama [1]. Zbog toga je procena radijacionog rizika neophodna, posebno kod materijala koji mogu sadržati povećane koncentracije  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  i  $^{40}\text{K}$ .

U građevinskoj industriji u upotrebi su prirodni i veštački materijali. Prirodni građevinski materijali koriste se bez prethodne tehnološke prerade, kao što su drvo, kamen, pesak, šljunak, glina. Veštački materijali, kao što su: kreč, gips, cement, malter, beton, se proizvode posebnim tehnološkim postupcima.

*Drvo* je najstariji prirodni građevinski materijal, koje ima veliku čvrstoću, a malu težinu, nisku toplotnu provodljivost, lako se obrađuje i lako je i zapaljivo. Koristi se kao: obla, tesana i rezana građa. U građevinarstvu se koriste i prerađevine od drveta: furnir, šperploča, panel-ploča, iverica, lesanit ploča.

*Kamen* je najzastupljeniji i najtrajniji građevinski materijal. Koristi se obrađen i neobrađen. Najpoznatije vrste kamena su: granit, krečnjak, pešćar, mermer.

*Pesak i šljunak* su delovi nevezanih sedimentnih stena, veličine zrna peska od 0,05 do 2 mm, u kome preovlađuju minerali kvarca, granita, cirkona, apatita, turmalina i drugih koji se koriste u proizvodnji betona, cigli, maltera.

*Beton* se dobija se mešanjem vezivnog materijala (cementa), agregata (šljunka, peska, tucanog kamena) i vode. Koristi se za izgradnju puteva, temelja, zgrada, mostova, kamenih blokova.

*Glina* je osnovna sirovina od koje se dobijaju pečeni glineni materijali, odnosno opekarski i keramički proizvodi. Nastaje raspadanjem sedimentnih stena koje sadrže minerale alumosilikate. Najzastupljeniji minerali su kaolinit, hidroliskun, monmorionit, ali sadrži druge sastojke kao što su kvarc, kalcit, feldspat, muskovit, pirit.

*Opeka* se dobija mlevenjem, mešanjem, uobličavanjem, sušenjem i pečenjem gline. Za proizvodnju cigli, blokova i crepa koriste se gline sa većim sadržajem krečnjaka i peska. Koriste se za gradnju zidova i imaju veliku čvrstoću na pritisak. Mogu biti napravljene kao pune i šuplje, različitog kvaliteta i cene. Pored keramičkih blokova, napravljenih pečenjem gline, koriste se i betonski i laki blokovi.

*Staklo* je homogeni amorfnu tvrdi providni materijal. Sadrži oko 75% silicijum dioksida, natrijum oksida, kalcijum oksida i malo aditiva. Kvarcno staklo je napravljeno od čistog silicijum dioksida. Koristi se za prozore, pregradne zidove.

U ovom radu određen je sadržaj prirodnih radionuklida u građevinskom materijalu koji se koristi u Srbiji i na osnovu dobijenih rezultata izračunat je gama indeks sa ciljem procene radijacionog rizika.

## 2. Materijal i metoda

U periodu 2016-2019. godine analizirano je 8 grupa građevinskog materijala (ukupno 94 uzorka) sakupljenog na teritoriji Srbije.

Uzorci građevinskog materijala su usitnjeni i upakovani u Marinelli posude zapremine 0,5 L, koje su hermetički zatvorene i ostavljene da stoje 40 dana radi uspostavljanja ravnoteže između  $^{238}\text{U}$  i  $^{232}\text{Th}$  i njihovih potomaka. Nakon toga uzorci su mereni gamaspektrometrijski na poluprovodničkom HPGe ORTEC – AMETEK detektoru rezolucije 1,85 i relativne efikasnosti 47% na 1,33 MeV za  $^{60}\text{Co}$  prema standardnoj metodi IAEA [2]. Energetska kalibracija i kalibracija efikasnosti detektora određena je koristeći radioaktivni standard AMERSHAM. Vreme merenja uzorka bilo je 60000s, dok je osnovno zračenje mereno 250000s. Obrada spektara izvršena je pomoću softverskog paketa Gamma Vision.

Na osnovu izmerenih sadržaja prirodnih radionuklida  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  i  $^{40}\text{K}$  izračunat je gama indeks prema jedanačini:

$$I = C_{\text{Ra}}/300 + C_{\text{Th}}/200 + C_{\text{K}}/3000 \quad (1)$$

gde su:

$C_{\text{Ra}}$  – koncentracija aktivnosti radijuma ( $^{226}\text{Ra}$ ) u Bq/kg;

$C_{\text{Th}}$  - koncentracija aktivnosti torijuma ( $^{232}\text{Th}$ ) u Bq/kg;

$C_{\text{K}}$  - koncentracija aktivnosti kalijuma ( $^{40}\text{K}$ ) u Bq/kg; .

Gama indeks se odnosi na dozu gama zračenja, iznad uobičajenog izlaganja zračenju na otvorenom, u zgradi izgrađenoj od građevinskog materijala za koji se računa indeks. Indeks se primenjuje na građevinski materijal, a ne na njegove komponente, osim u slučaju kada te komponente i same predstavljaju građevinske materijale i posebno se procenjuju kao takve. Prema zakonskoj regulativi Republike Srbije svi materijali čiji je gama indeks manji od 1 smatraju se radiološki pouzdanim [3].



## 3. Rezultati i diskusija

U tabeli 1 predstavljeni su opsezi koncentracija aktivnosti  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  i  $^{40}\text{K}$  u uzorcima građevinskog materijala koji potiču ili se koriste u Srbiji.

**Tabela 1. Koncentracije aktivnosti  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  i  $^{40}\text{K}$  u uzorcima građevinskog materijala.**

Uzorak	Broj uzoraka	$^{226}\text{Ra}$ (Bq/kg)		$^{232}\text{Th}$ (Bq/kg)		$^{40}\text{K}$ (Bq/kg)		I
		min	max	min	max	min	max	
Drvo	10	10±1	35±4	8±1	36±4	25±2	440±50	0,08-0,44
Pesak	12	12±1	44±5	15±1	35±4	32±3	320±30	0,12-0,43
Šljunak	15	10±1	55±6	13±1	33±4	40±4	410±40	0,11-0,48
Opeka	18	22±2	56±6	29±3	77±8	250±25	880±90	0,30-0,86
Beton	10	21±2	72±7	18±2	55±6	25±3	1050±100	0,17-0,87
Mermer	9	10±1	62±6	14±1	74±7	48±5	780±80	0,12-0,84
Granit	12	82±8	180±20	47±5	260±30	810±75	1480±170	0,78-2,40
Staklo	8	5±1	42±4	12±1	47±5	20±2	88±10	0,12-0,40
<b>Opseg</b>	<b>94</b>	<b>5±1</b>	<b>180±20</b>	<b>8±1</b>	<b>260±30</b>	<b>20±2</b>	<b>1480±170</b>	<b>0,08-2,40</b>

Dobijeni rezultati ukazuju na to da se najveće koncentracije radionuklida nalaze u granitu, a najmanje u drvetu i staklu. Dobijeni podaci mogu se uporediti sa istraživanjima sadržaja prirodnih radionuklida u građevinskom materijalu u svetu (tabela 2). Koncentracije aktivnosti  $^{232}\text{Th}$  i  $^{40}\text{K}$  u drvetu poreklom sa Kube [4] su višestruko manje nego u Srbiji, gde su izmerene vrednosti u opsegu od (10-35) Bq/kg za  $^{226}\text{Ra}$ , (8-36) Bq/kg za  $^{232}\text{Th}$  i (25-440) Bq/kg za  $^{40}\text{K}$ . Drvo ima gama indeks od 0,08-0,44, a staklo od 0,12-0,40.

Gama indeks u Srbiji, za pesak je u opsegu od 0,12-0,43, a šljunak od 0,11-0,48 i ove vrednosti se nalaze se u opsegu uobičajenih vrednosti za pesak i šljunak u svetu.

Gama indeks za uzorke opeke iznosio je od 0,30-0,86, a za beton od 0,17-0,87, ove vrednosti su u skladu sa vrednostima za ove materijale u svetu.

Svi analizirani uzorci mermera u Srbiji su bili radiološki ispravni, a njihov gama indeks bio je ispod jedan, u opsegu od 0,12-0,84.

U ovom radu analizirano je 12 uzoraka granita, od kojih su četiri imala gama indeks veći od 1. U uzorcima granita izmerene vrednosti bile su u opsegu (82-180) Bq/kg za  $^{226}\text{Ra}$ , (47-260) Bq/kg za  $^{232}\text{Th}$  i (810-1480) Bq/kg za  $^{40}\text{K}$ , a gama indeks od 0,8-2,40. Upotreba granita u zatvorenom prostoru može dovesti do dugotrajnog izlaganja stanovništva štetnom uticaju jonizujućeg zračenja. Referentni nivo za spoljašnje zračenje u zatvorenom prostoru, koje potiče od gama emitera iz građevinskog materijala ne uključujući spoljašnje zračenje na otvorenom prostoru, je 1 mSv godišnje [3]. Maksimalna vrednost doze jednog analiziranog uzorka granita je 2,8 mSv godišnje, što je oko tri puta veće od referentnog nivoa i može dovesti do značajnog povećanja doze kod stanovništva koje bi ga koristilo. Upotreba svih uzoraka čiji je gama indeks veći od 1 je ograničena.

Prema podacima istraživanja u svetu gama indeks veći od 1 imali su uzorci mermera iz Kine – 1,8 [11] i uzorci granita iz Egipta- 2,1 [10] i Holandije – 3,5 [12].



## Радиоэкологја и излагање становништва

**Tabela 2. Koncentracije aktivnosti  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  i  $^{40}\text{K}$  u uzorcima građevinskog materijala u svetu.**

	$^{226}\text{Ra}$ (Bq/kg)	$^{232}\text{Th}$ (Bq/kg)	$^{40}\text{K}$ (Bq/kg)	I
<b>Drvo</b>				
Kuba [4]	6	1	9	0,03
<i>Ovaj rad</i>	<i>10-35</i>	<i>8-36</i>	<i>25-440</i>	<i>0,08-0,44</i>
<b>Pesak</b>				
Australija [5]	3	40	44	0,22
Izrael [6]	12	4	51	0,08
Jemen [7]	21	28	1118	0,58
Kina [8]	39	47	573	0,56
Kuba [4]	17	16	208	0,21
Srbija [9]	26	30	210	0,31
	<b>3-39</b>	<b>4-47</b>	<b>44-1118</b>	<b>0,08-0,58</b>
<i>Ovaj rad</i>	<i>12-44</i>	<i>15-35</i>	<i>32-320</i>	<i>0,12-0,43</i>
<b>Šljunak</b>				
Izrael [6]	15	3	50	0,08
Jemen [7]	22	16	410	0,30
Kuba [4]	20	13	134	0,18
	<b>15-22</b>	<b>3-16</b>	<b>50-410</b>	<b>0,08-0,30</b>
<i>Ovaj rad</i>	<i>10-55</i>	<i>13-33</i>	<i>40-410</i>	<i>0,11-0,48</i>
<b>Opeka</b>				
Australija [5]	41	89	681	0,81
Egipat [10]	33	34	316	0,39
Jemen [7]	55	37	1256	0,79
Kina [8]	41	52	717	0,63
Kuba [1]	57	12	857	0,54
	<b>33-41</b>	<b>12-89</b>	<b>316-681</b>	<b>0,39-0,81</b>
<i>Ovaj rad</i>	<i>22-56</i>	<i>29-77</i>	<i>250-880</i>	<i>0,30-0,86</i>
<b>Beton</b>				
Egipat [10]	32	25	289	0,33
Jemen [7]	37	32	734	0,53
Kuba [4]	25	12	595	0,34
	<b>25-37</b>	<b>12-32</b>	<b>289-595</b>	<b>0,33-0,53</b>
<i>Ovaj rad</i>	<i>21-72</i>	<i>18-55</i>	<i>25-1050</i>	<i>0,17-0,87</i>
<b>Mermer</b>				
Kina [11]	8-157	6-166	44-1353	0,07-1,8
Pakistan [11]	4-63	9-40	7-105	0,06-0,4
Turska [11]	10-92	4-122	28-676	0,06-1,1
	<b>4-157</b>	<b>4-166</b>	<b>7-1353</b>	<b>0,06-1,8</b>
<i>Ovaj rad</i>	<i>10-62</i>	<i>14-74</i>	<i>48-780</i>	<i>0,12-0,84</i>
<b>Granit</b>				
Egipat [10]	56	54	4819	2,1
Grčka [11]	77	91	929	1,0
Holandija [12]	162	490	1540	3,5
Italija [11]	64	91	1206	1,0
	<b>56-162</b>	<b>54-490</b>	<b>929-4819</b>	<b>1,0-3,5</b>
<i>Ovaj rad</i>	<i>82-180</i>	<i>47-260</i>	<i>810-1480</i>	<i>0,78-2,40</i>

### 4. Zaključak

Koncentracije aktivnosti radionuklida  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  i  $^{40}\text{K}$  koje su izmerene u građevinskom materijalu, nalazi se u širokom opsegu vrednosti i u materijalima iste vrste i uzorcima koji potiču iz različitih delova sveta. Svi analizirani uzorci u Srbiji sem granita su imali gama indeks ispod jedan i bili su radiološki ispravni.

U cilju smanjivanja radijacionog rizika potrebno je odrediti sadržaj prirodnih radionuklida pre upotrebe građevinskog materijala, odnosno pre početka izgradnje objekata.

### 5. Zahvalnica

Rad je finasiran sredstvima Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije (projekat III 43009).

### 6. Literatura

- [1] UNSCEAR, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation, Annex B. Exposure from Natural Sources of Radiation, Unated Nations, New York, 2000.
- [2] IAEA (International Atomic Energy Agency), Measurement of Radionuclides in Food and the Environment; Technical Report Series 295, Vienna, 1989.
- [3] Pravilnik o granicama sadržaja radionuklida u vodi za piće, životnim namirnicama, stočnoj hrani, lekovima, predmetima opšte upotrebe, građevinskom materijalu i drugoj robi koja se stavlja u promet, Sluzbeni Glasnik Srbije 36/2018.
- [4] O.Brigido Flores, A.Montalvan Estrada, R.Rosa Suarez, J.Tomas Zerquera,A. Hernandez Perez. Natural radionuclide content in building materials anad gamma dose rate in dwellings in Cuba. *J. Environ. Radioact.* 99, 2008, 1834-1837.
- [5] J.Beretka, P.J.Mathew. Natural radioactivity of Australian building materials, industrial waste and by-products. *Healht Phys.* 48,1985,87-95.
- [6] K.Kovler, G.haquin, V.Manasherov, E.Neeman, N.Lavi. Natural radionuclides in building materials available in Israel. *Build Environ.* 37, 2002, 531-537.
- [7] A.I.A.El-Mageed, M.El-AzadFarid, E.E.Saleh, M.Mansour, A.K.Mohammed. Natural radioactivity and radiological hazards of some building materials of Aden,Yemen. *J.Geochem.Explor.* 140, 2014, 41-45.
- [8] P.Ziqiang, Y.Yin, G.Mingqiang. Natural radiation and radioactivity in China. *Radiat. Prot.Dosim.* 24, 1988, 88-99.
- [9] G. Pantelić, D. Todorović, J. Nikolić, M. Rajačić, M. Janković, N. Sarap. Measurement of radiactivity in building materials in Serbia, *J.Radioanal. Nucl.Chem.* 303, 2015, 2517-2522.
- [10] B.M. Moharram, M.N. Suliman, N.F. Zahran, S.E. Shennawy, A.R.El. Sayed. External exposure doses due to gamma emitting natural radionuclides in some Egiptain building materials, *Appl. Radiat. Isot.* 70, 2012, 241-248.
- [11] R.I. Mahamed, S.K. Algamdi, N.S.Al-Shamani, Evaluation of radionuclide

concentration and associated radiological hazard in marble indices and granite used as materials in Al-Madinah Al-Munawarah, *JTUSCI*,10, 2016, 369-374.

- [12] M. Tzortzis, H. Tsertos, S. Christofides, G. Christodoulides,. Gamma radiation measurements and dose rate in commercially-used natural tiling rocks(granites). *J. Environ. Radioact.* 70, 2003, 223–235.

### NATURAL RADIONUCLIDES IN BUILDING MATERIALS IN SERBIA

**Ljiljana JANKOVIĆ MANDIĆ<sup>1</sup>, Snežana DRAGOVIĆ<sup>1</sup>, Mirjana ČUJIĆ<sup>1</sup>,  
Jelena PETROVIĆ<sup>1</sup> and Antonije ONJIA<sup>2</sup>**

*1)University of Belgrade, Vinča Institute of Nuclear Sciences, PO Box 522, 11351 Belgrade, Serbia, [ljmandic@vin.bg.ac.rs](mailto:ljmandic@vin.bg.ac.rs),[sdragovic@vin.bg.ac.rs](mailto:sdragovic@vin.bg.ac.rs),[cujicm@vin.bg.ac.rs](mailto:cujicm@vin.bg.ac.rs),  
[petrovicj@vin.bg.ac.rs](mailto:petrovicj@vin.bg.ac.rs)*

*2)University of Belgrade, Faculty of Technology and Metallurgy, Karnegijeva 4, Belgrade, Serbia, [onjia@tmf.bg.ac.rs](mailto:onjia@tmf.bg.ac.rs)*

#### ABSTRACT

Determination of radionuclides in building materials is very important in order to assess the radiological impact on human health. The paper presents the results of gamma ray spectrometry measurement of natural radionuclides in 94 samples of building materials (wood, sand, gravel, brick, concrete, marble, granite, glass) collected from the territory of Serbia in the period from 2016 to 2019. The activity concentrations for <sup>226</sup>Ra, <sup>232</sup>Th and <sup>40</sup>K from the building materials ranged from (5-180) Bq/kg, (8-260) Bq/kg, (20-1480) Bq/kg, respectively. For all materials, a gamma index was determined and the results are compared with the relevant literature and regulation data.

## RADIOAKTIVNOST NUS-PROIZVODA HEMIJSKE INDUSTRIJE

**Predrag KUZMANOVIĆ<sup>1,2</sup>, Nataša TODOROVIĆ<sup>1</sup>,  
Leposava FILIPOVIĆ PETROVIĆ<sup>2</sup>, Bojan MILJEVIĆ<sup>3</sup>, Jovana KNEŽEVIĆ<sup>1</sup>  
i Jovana NIKOLOV<sup>1</sup>**

1) Univerzitet u Novom Sadu, Prirodno-matematički fakultet, Departman za fiziku,  
Novi Sad, Srbija, [predrag.kuzmanovic@df.uns.ac.rs](mailto:predrag.kuzmanovic@df.uns.ac.rs), [natasa.todorovic@df.uns.ac.rs](mailto:natasa.todorovic@df.uns.ac.rs),  
[jovana.nikolov@df.uns.ac.rs](mailto:jovana.nikolov@df.uns.ac.rs), [jovana.knezevic@df.uns.ac.rs](mailto:jovana.knezevic@df.uns.ac.rs)

2) Visoka medicinska i poslovno-tehnološka škola strukovnih studija, Laboratorija za  
fiziku, Šabac, Srbija, [predrag.kuzmanovic@vmpts.edu.rs](mailto:predrag.kuzmanovic@vmpts.edu.rs), [leposavafp@gmail.com](mailto:leposavafp@gmail.com)

3) Univerzitet u Novom Sadu, Tehnološku fakultet, Katedra za inženjerstvo  
materijala, Novi Sad, Srbija  
[miljevic@uns.ac.rs](mailto:miljevic@uns.ac.rs)

### SADRŽAJ

*Nus-proizvodi hemijske industrije predstavljaju potencijalnu radiološku opasnost za stanovništvo i životnu sredinu, kao i za radnike koji su njima izloženi, usled povećanog sadržaja prirodnih radionuklida  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  i  $^{40}\text{K}$ . U ovom radu određen je nivo radioaktivnosti nekih nus-proizvoda hemijskih industrija u Srbiji: fosfogipsa, piritne izgoretine, EMCO mulja i Pb/Ag taloga. Određeni su gama indeksi i izvršena je procena radijacionog rizika pri radu sa ovim materijalima. Dobijene vrednosti su upoređene sa dozvoljenim vrednostima za izloženost radnika.*

### 1. Uvod

Proizvodnja metala i metalurških sirovina predstavlja značajnu oblast privredno-društvenog razvoja jedne zemlje. Tokom proizvodnje metalurških sirovina i prerade metala iz različitih tehnoloških procesa mogu nastati velike količine metalurških šljaka, muljeva i drugih otpadnih materijala, koji se privremeno ili trajno gomilaju obično u blizini hemijskih industrija u kojima nastaju [1].

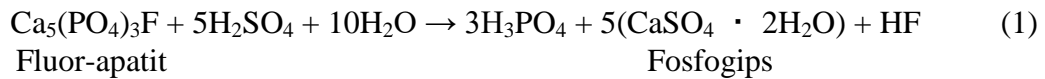
U svetu, iz hemijskih industrija, nastaju velike količine otpadnih materijala koje mogu da ugroze i kontaminiraju zemljište, površinske i podzemne vode i tako nanesu ogromnu ekološku štetu [2]. Ovi otpadni materijali u sebi obično sadrže tragove različitih teških metala, a mogu sadržati i povećane koncentracije aktivnosti nekih radionuklida. Takvi materijali se prema strategiji o upravljanju otpadom Republike Srbije iz 2010. godine klasifikuju kao opasan otpad [3].

Cilj ovog rada je ispitivanje nivoa radioaktivnosti nekih nus-proizvoda iz srpskih hemijskih industrija, kojih ima u velikim količinama. Određene su koncentracije aktivnosti  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  i  $^{40}\text{K}$  u uzorcima fosfogipsa, piritne izgoretine, EMCO mulja i Pb/Ag taloga. Procenjeni su gama indeksi ( $I_\gamma$ ), brzine apsorbovanih doza zračenja ( $D$ ), kao i godišnje efektivne doze ( $D_e$ ) za profesionalnu izloženost pri radu sa ovim materijalima. Ovaj rad predstavlja prvo istraživanje nivoa radioaktivnosti piritne

izgoretine, EMCO mulja i Pb/Ag taloga iz hemijske industrije „Zorka-obojena metalurgija“.

## 2. Opis uzoraka

Fosfogips je nus-proizvod koji nastaje pri proizvodnji fosforne kiseline tzv. „mokrim postupkom“. Nastanak fosfogipsa se može predstaviti pomoću reakcije (1) [4].



Mineralna ruda fluor-apatit reaguje sa sumpornom kiselinom i vodom, pri čemu kao glavni proizvod nastaje fosforna kiselina, fluorovodonik i otpadni fosfogips kojeg nastane 5 puta više nego fosforne kiseline [4]. Prema svom hemijskom sastavu fosfogips je  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , i veoma je sličan prirodnom gipsu. U svom sastavu može imati povećanu koncentraciju  $^{226}\text{Ra}$ , koja je obično u rasponu 200 do 3000 Bq  $\text{kg}^{-1}$  [5]. Izlaganje industrijskih radnika fosfogipsu koji sadrži visoke koncentracije aktivnosti  $^{226}\text{Ra}$  može predstavljati zdravstvenu opasnost, kao posledicu izlaganja gama zračenju i udisanju  $^{222}\text{Rn}$ .

U Srbiji se fosforna kiselina proizvodi u velikim količinama, sa godišnjim prinosom od oko 810 000 tona otpadnog fosfogipsa [6].

Jedan od potencijalno opasnih otpada u Srbiji je i piritna izgoretina, deponovana je u Srbiji bez ikakvih mera zaštite u količini od oko pola miliona tona. Piritna izgoretina nastaje kao nus-proizvod pri proizvodnji sumporne kiseline ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) od pirine rude ( $\text{FeS}_2$ ) [7]. Jeda od glavnih proizvođača piritne izgoretine u Srbiji bila je „Zorka Šabac“. Poslednjih godina veće količine piritne izgoretine iz Šapca i drugih mesta u Srbiji su izvezene u Kinu, tako da je količina od pola miliona tona znatno smanjena.

Pri preradi koncentrata cinka u hemijskoj industriji „Zorka-obojena metalurgija Šabac“ prema starom tehnološkom postupku kao nus-proizvod deponovan je EMCO mulj (talog) koji može da sadrži i više od 20% cinka, kao i gvožđa, zatim olova, kadmijuma i sumpora [1]. Čitava količina proizvedenog EMCO mulja je korišćena za popunjavanje zemljišta i nivelisanje terena u okviru kompleksa „Zorka Šabac“, koji je prethodnih godina otkopavan i izvezen u Kinu. Procene su da je EMCO mulja bilo deponovano u zemlji oko 34 000 tona [8], od čega je izvezeno oko 20 000 tona ovog otpada.

Pb/Ag talog (mulj) predstavlja mešavinu cink jarosita i olovo-srebro taloga koji nastaje kao proizvod iz tehnološkog procesa prerade sulfidnog koncentrata cinka primenom hidrometalurškog postupka. Pb/Ag talog obično u svom sastavu sadrži i tragove cinka, olova, bakra, kadmijuma, kobalta i drugih metala [9]. Jedno od najvećih odlagališta Pb/Ag taloga u Srbiji nalazi se u okvirima kompleksa „Zorke-obojene metalurgije“ u Šapcu. Procene su da ovog nus-proizvoda ima deponovano oko 300 000 tona na otvorenom prostoru [8].

## 3. Materijal i metode

### 3.1. Priprema uzoraka

Uzorci fosfogipsa su uzeti sa deponije jedne od hemijskih industrija fosforne kiseline u Srbiji. Uzorci piritne izgoretine i EMCO mulja su uzeti sa lokacija u Šapcu, gde su se koristili za popunjavanje zemljišta, dok su uzorci Pb/Ag taloga uzeti sa deponije koja se

nalazi u okviru hemijske industrije „Zorka-obojena metalurgija“ u Šapcu. Svi uzorci su sušeni na temperaturi od 105 °C između 6 i 8 h do konstantne mase, nakon čega su homogenizovani do finog praha i prebačeni u cilindrične posude od plastike dimenzija 6,7 cm u prečniku i 6,2 cm visine, nakon čega su zapečaćeni teflon trakom, kako bi se sprečila difuzija  $^{222}\text{Rn}$ . Uzorci su potom mereni nakon minimum mesec dana, pošto je bila uspostavljena sekularna radioaktivna ravnoteža između  $^{222}\text{Rn}$  i  $^{226}\text{Ra}$ .

### 3.2. Merenje radioaktivnosti

Uzorci su analizirani IAEA TRS 295 metodom [10]. Vreme merenja jednog uzorka je bilo oko 60 000 s. Tipična masa uzorka je iznosila oko 300 g. Za određivanje koncentracije aktivnosti  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  i  $^{40}\text{K}$  korišćena je metoda nisko-fonske gama-spektrometrije HPGe detektorom, proizvođača Canberra, relativne efikasnosti 36% i rezolucije od 1,9 keV. Oko detektora je izrađena zaštita od olova debljine 12 cm i bakra debljine 3 mm, kako bi se sprečilo prodiranje X-zračenja iz K-ljuske olova u energijskom opsegu od 75–85 keV [11]. Energije gama zračenja korišćene za procenu koncentracija aktivnosti datih radionuklida su date u tabeli 1 [11]. Gama spektri su prikupljeni i analizirani korišćenjem Canberra Genie 2000 softvera. Sve merne nesigurnosti su date na nivou poverenja od 95%.

Kalibracija detektora je izvršena u cilindričnoj geometriji pomoću referentnog radioaktivnog materijala homogeno distribuiranog u silikonskoj smoli zapremine  $V=250\text{ cm}^3$  (Češkog Instituta za metrologiju br. sertifikata 1035-SE-40001-17). Korišćenjem ANGLE softvera izvršena je korekcija na efekat samoapsorpcije, koji nastaje usled matrica različitih gustina i utiče na efikasnost detekcije [12]. Takva precizna kalibracija je neophodna kako bi se obezbedila mala merna nesigurnost ( $< 10\%$ ) pri određivanju aktivnosti radioizotopa u nisko-energijskom opsegu (ispod 100 keV). Integralna brzina brojanja u opsegu između 30 i 3000 keV iznosila je  $2\text{ counts s}^{-1}$ .

**Tabela 1. Izotopi korišćeni za određivanje  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  i  $^{40}\text{K}$ .**

Prirodni izotop	Energija (keV)	Detektovan nuklid
$^{226}\text{Ra}$	295,2	$^{214}\text{Pb}$
	351,9	$^{214}\text{Pb}$
	609,3	$^{214}\text{Bi}$
$^{232}\text{Th}$	238,6	$^{212}\text{Pb}$
	911,2	$^{228}\text{Ac}$
	969,1	$^{228}\text{Ac}$
$^{40}\text{K}$	1460,8	$^{40}\text{K}$

### 3.3. Procena radijacionog rizika

Gama indeks se koristi za radiološku karakterizaciju specifičnih materijala koji se može izračunati korišćenjem jednačine (2) [13]:

$$I_{\gamma} = \frac{C_{\text{Ra}}}{150} + \frac{C_{\text{Th}}}{100} + \frac{C_{\text{K}}}{1500} \quad (2)$$

где су  $C_{Ra}$ ,  $C_{Th}$  и  $C_K$  концентрације активности  $^{226}Ra$ ,  $^{232}Th$ ,  $^{40}K$  у  $Bq\ kg^{-1}$  респективно. Препоручена вредност гама индекса за дати материјал чијем је зрачењу радник изложен током рада треба да буде мања од 1 [14].

Укупна јаčina апсорбоване дозе у ваздуху ( $D$ ) која потиче од гама зрачења  $^{226}Ra$ ,  $^{232}Th$  и  $^{40}K$  из датог материјала може се израчунати коришћењем једначине (3) [15]:

$$D = 0,429C_{Ra} + 0,666C_{Th} + 0,042C_K \quad (3)$$

где су  $C_{Ra}$ ,  $C_{Th}$  и  $C_K$  концентрације активности  $^{226}Ra$ ,  $^{232}Th$ ,  $^{40}K$  у  $Bq\ kg^{-1}$  респективно, а јаčina апсорбоване дозе изражена у  $nGy\ h^{-1}$ . Просечна вредност јачине апсорбоване дозе гама зрачења за специфичне материјале у свету износи  $59\ nGy\ h^{-1}$  [14].

На основу проценјене брзине апсорбоване дозе дате једначином (6), може се проценити годишња ефективна доза коју прими професионално изложено лице помоћу релације (4) [16]:

$$D_e(mSv\ y^{-1}) = D(mGy\ h^{-1}) \times 8760(h) \times 0,2 \times 0,7 (Sv\ Gy^{-1}) \quad (4)$$

где је  $D$  брзина апсорбоване дозе изражена у  $mGy\ h^{-1}$ ,  $8\ 760\ h$  је време у току једне године (365 дана),  $0,2$  је фактор изложености (20% годишњег времена које радник проведе при раду са датим материјалом) и  $0,7\ Sv\ Gy^{-1}$  је конверzioni фактор дозе гама зрачења [14]. Према Правилнику Републике Србије дозвољена вредност годишње ефективне дозе за професионално изложена лица у Републици Србији износи  $20\ mSv$  на годишњем нивоу, или  $100\ mSv$  за период од 5 година [17].

#### 4. Резултати и дискусија

Измерене вредности концентрација активности  $^{226}Ra$ ,  $^{232}Th$  and  $^{40}K$  у 13 испитиваних узорака нус-производа из хемијских индустрија у Србији (3 узорка фосфогипса, 4 узорка пиритне изгоретине, 4 узорка EMCO муља, и 2 узорка Pb/Ag талоба) дате су у табели 2. Просечне вредности концентрације активности  $^{226}Ra$  износе  $562 \pm 59\ Bq\ kg^{-1}$ ,  $7 \pm 1\ Bq\ kg^{-1}$ ,  $16 \pm 2\ Bq\ kg^{-1}$  и  $45 \pm 3\ Bq\ kg^{-1}$ , за узорке фосфогипса, пиритне изгоретине, EMCO муља и Pb/Ag талоба, респективно. Просечне вредности концентрације активности  $^{232}Th$  износе  $3,2 \pm 0,2\ Bq\ kg^{-1}$ ,  $3,5 \pm 0,3\ Bq\ kg^{-1}$ ,  $5,2 \pm 0,3\ Bq\ kg^{-1}$  и  $5,9 \pm 0,3\ Bq\ kg^{-1}$ , за узорке фосфогипса, пиритне изгоретине, EMCO муља и Pb/Ag талоба, респективно. Просечне вредности концентрације активности  $^{40}K$  износе  $107 \pm 5\ Bq\ kg^{-1}$ ,  $114 \pm 2\ Bq\ kg^{-1}$ ,  $113 \pm 4\ Bq\ kg^{-1}$  и  $140 \pm 4\ Bq\ kg^{-1}$ , за узорке фосфогипса, пиритне изгоретине, EMCO муља и Pb/Ag талоба, респективно.

У поређењу са ранијим истраживањима фосфогипса произведеног у Србији из 2007. године датим у раду аутора Рајковић и сар. [4], просечне вредности  $^{226}Ra$  и  $^{40}K$  у овом раду имају 1,3 и 12,3 пута, респективно, веће вредности, док су вредности измерене за  $^{232}Th$  готово 3 пута ниже.

Израчунате вредности гама индекса, брзина апсорбованих доза и годишње ефективне дозе за свих 13 узорака нус-производа дати су у табели 2.

Просечна вредност гама индекса за 3 узорка фосфогипса износи  $3,9 \pm 0,3$  и прелази препоручену вредност од 1 дефинисану у реф. [14]. Вредности гама индекса за узорке пиритне изгоретине, EMCO муља и Pb/Ag талоба су испод препоручене вредности [14].

Просечна вредност јачине апсорбоване дозе за 3 узорка фосфогипса износи  $251 \pm 22\ nGy\ h^{-1}$  и прелазу просечну вредност у свету од  $59\ nGy\ h^{-1}$  [14]. Просечне



vrednosti brzina apsorbovanih doza za ostale nus-proizvode su ispod prosečne vrednosti od 59 nGy h<sup>-1</sup> [14].

**Tabela 2. Koncentracije aktivnosti <sup>226</sup>Ra, <sup>232</sup>Th i <sup>40</sup>K, gama indeksi ( $I_\gamma$ ), brzine apsorbovanih doza ( $D$ ) i godišnje efektivne doze ( $D_e$ ) zračenja za ispitivane uzorke. (SD = standardna devijacija).**

NAZIV UZORKA	KONCENTRACIJA AKTIVNOSTI (Bq kg <sup>-1</sup> )			$I_\gamma$	$D$ (nGy h <sup>-1</sup> )	$D_e$ (μSv y <sup>-1</sup> )
	<sup>226</sup> RA	<sup>232</sup> TH	<sup>40</sup> K			
<b>FOSFOGIPS</b>						
1	425±4	3,0±0,7	98±6	3,11±0,03	200±2	245±9
2	592±8	2,8±0,6	105±5	4,04±0,05	260±3	319±17
3	668±8	3,7±0,9	118±9	4,57±0,05	294±4	361±17
OPSEG	425-668	2,8-3,7	98-118	3,11-4,57	200-294	245-361
<b>SR. VR.±SD</b>	<b>562±59</b>	<b>3,2±0,2</b>	<b>107±5</b>	<b>3,9±0,3</b>	<b>251±22</b>	<b>308±27</b>
<b>PIRITNA IZGORETINA</b>						
1	7,1±0,2	2,75±0,19	114±3	0,151±0,003	9,7±0,2	11,85±0,99
2	5,3±0,3	4,5±0,3	122±6	0,162±0,005	10,4±0,3	12,8±1,6
3	9,7±0,3	3,2±0,3	109±5	0,170±0,005	10,9±0,3	13,4±1,5
4	5,1±0,3	3,6±0,2	112±5	0,145±0,005	9,3±0,3	11,4±1,4
OPSEG	5,1-9,7	2,8-4,5	109-122	0,15-0,17	9,3-10,9	11,4-13,4
<b>SR. VR.±SD</b>	<b>7±1</b>	<b>3,5±0,3</b>	<b>114±2</b>	<b>0,157±0,005</b>	<b>10,1±0,3</b>	<b>12,3±0,4</b>
<b>EMCO MULJ</b>						
1	13,7±0,3	4,8±0,3	100±5	0,206±0,005	13,3±0,3	16,2±1,5
2	19,1±0,9	5,2±0,4	117±6	0,257±0,008	16,6±0,5	20±3
3	20,9±0,9	6,1±0,3	114±6	0,276±0,008	17,8±0,5	22±3
4	11,8±0,3	4,7±0,3	119±6	0,205±0,005	13,2±0,3	16±2
OPSEG	11,8-20,9	4,7-6,1	100-119	0,21-0,28	13,2-17,8	16-22
<b>SR. VR.±SD</b>	<b>16±2</b>	<b>5,2±0,3</b>	<b>113±4</b>	<b>0,24±0,02</b>	<b>15,2±1,0</b>	<b>18,7±1,2</b>
<b>PB/AG TALOG</b>						
1	40,7±1,4	5,5±0,3	134±7	0,416±0,011	26,8±0,7	33±3
2	50,2±1,8	6,3±0,4	145±9	0,494±0,014	31,8±0,9	39±4
OPSEG	40,7-50,2	5,5-6,3	134-145	0,42-0,49	26,8-31,8	33-39
<b>SR. VR.±SD</b>	<b>45±3</b>	<b>5,9±0,3</b>	<b>140±4</b>	<b>0,46±0,03</b>	<b>29±2</b>	<b>36±2</b>

Procenjene vrednosti godišnjih efektivnih doza su ispod dozvoljene vrednosti za izloženost radnika od 20 mSv y<sup>-1</sup> [17] za sve uzorke nus-proizvoda i prosečne vrednosti se kreću od 12,3±0,4 μSv y<sup>-1</sup> za uzorke piritne izgoretine do 308±27 μSv y<sup>-1</sup> za uzorke fosfogipsa.

## 5. Zaključak

U ovom radu su izvršena merenja nivoa radioaktivnosti i procena radijacionog rizika pri radu sa nekim od nus-produkata koji su proizvedeni u hemijskim industrijama u Republici Srbiji (uzorci fosfogipsa, piritne izgoretine, EMCO mulja i Pb/Ag taloga). Dobijene vrednosti koncentracija aktivnosti <sup>226</sup>Ra, <sup>232</sup>Th i <sup>40</sup>K ukazuju da je najveća koncentracija <sup>226</sup>Ra u uzorcima fosfogipsa i do 130 puta veća u odnosu na ostale uzorke, dok su <sup>232</sup>Th i <sup>40</sup>K prisutni u približno istim koncentracijama u svim uzorcima. Na osnovu dobijenih vrednosti gama indeksa, brzina apsorbovanih doza i godišnjih

efektivnih doza, može se zaključiti da ne postoji naročita radijaciona opasnost od izlaganja izlaganja radnika jonizujućem zračenju pri radu sa ovim materijalima.

### 6. Zahvalnica

Autori se zahvaljuju Ministarstvu prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije na finansijskoj podršci u okviru projekata br. 171002, 43002 i 45008.

### 7. Literatura

- [1] B. Nikolić, V. Nikolić, Ž. Kamberović, D. Marinković, Z. Popović, Prateći ekološko-ekonomski efekti metalurških i rudarskih deponija. *Tehnika-rudarstvo, geologija i metalurgija*. 63, 2012, 57-60.
- [2] M. B. Vojinović Miloradov, M. M. Turk Sekulić, J. R. Radonić, N. B. Milić, Nevena N. Grujić Letić, I. J. Mihajlović, M. Lj. Milanović. Industrijske emergentne hemikalije u životnom okruženju. *Hem. ind.* 68(1), 2014, 51–62.
- [3] Strategija upravljanja otpadom za period 2010-2019. godine "Sl. glasnik RS", br. 29/2010.
- [4] M. B. Rajković, Č. M. Lačnjevac, D. Tošković, D. Stanojević. Ispitivanje mogućnosti primene fosfogipsa za izradu pregradnog zida – elementa montažnog objekta. *Zaštita Materijala*, 48(1), 2007, 41 – 47.
- [5] USEPA, 1990. United States Environmental Protection Agency (U.S. EPA), Report to Congress on Special Wastes from Mineral Processing: Summary and Findings, Washington.
- [6] Nacrt Regionalnog plana upravljanja otpadom za grad Zaječar i opštine Boljevac, Bor, Kladovo, Majdanpek, Negotin, i Knjaževac, RARIS i FTN, 2016.
- [7] N. Tugrul, E. Moroydor Derun, M. Piskin. Utilization of pyrite ash wastes by pelletization process. *Powder Technol.* 176, 2007, 72–76.
- [8] Izveštaj o strateškoj proceni uticaja na životnu sredinu plana detaljne regulacije „Zorka-radna zona istok“ u Šapcu, JUP “Plan” Šabac, 2015.
- [9] D. Stanojević, L. Filipović Petrović, M. Antonijević Nikolić. Distribucija kobalta u procesu hidrometalurške proizvodnje cinka. *Zastita Materijala* 56 (3), 2015, 367 – 372.
- [10] International Atomic Energy Agency, Technical Reports Series No. 295, Measurement of Radionuclides in Food and the Environment, Vienna, Austria, 1989.
- [11] N. Todorovic, S. Forkapic, I. Bikit, D. Mrdja, M. Veskovic, S. Todorovic. Monitoring for exposures to TENORM Sources in Vojvodina region. *Radiat. Prot. Dosim.* 144(1–4), 2011, 655–658.
- [12] L. Moens, J. De Donder, Lin Xi-lei, F. De Corte, A. De Wispelaere, A. Simonitis, J. Hoste. Calculation of the absolute peak efficiency of gamma-ray detectors for different counting geometries. *Nucl. Instr. Methods.* 187, 1981, 451–472.
- [13] G. Viruthagiri, K. Ponnarasi Measurement of natural radioactivity in brick

- samples. *Adv Appl. Sci. Res.* 2(2), 2011, 103–108.
- [14] UNSCEAR. Sources, effects and risks of ionizing radiation. Report of the United Nations scientific committee on the effects of atomic radiation to the general assembly. United Nations, New York, 2000.
- [15] N. K. Ahmed, A. G. M. El-Arabi. Natural radioactivity in farm soil and phosphate fertilizer and its environmental implications in Qena governorate, Upper Egypt. *J. Environ. Radioact.* 84, 2005, 51–64.
- [16] M. S. Hamideen, J. Sharaf. Natural radioactivity investigations in soil samples obtained from phosphate hills in the Russaifa region, Jordan. *Radiat. Phys. Chem.* 81, 2012, 1559–1562.
- [17] Pravilnik o granicama izlaganja jonizujućim zračenjima i merenjima radi procene nivoa izlaganja jonizujućim zračenjima. Sl. Glasnik br. 86/2011 i 50/2018, 2018.

### RADIOACTIVITY OF BY-PRODUCTS IN CHEMICAL INDUSTRY

**Predrag KUZMANOVIĆ<sup>1,2</sup>, Nataša TODOROVIĆ<sup>1</sup>,  
Leposava FILIPOVIĆ PETROVIĆ<sup>2</sup>, Bojan MILJEVIĆ<sup>3</sup>, Jovana KNEŽEVIĆ<sup>1</sup>  
and Jovana NIKOLOV<sup>1</sup>**

1) *University of Novi Sad, Faculty of Sciences, Department of Physics, Novi Sad, Serbia, [predrag.kuzmanovic@df.uns.ac.rs](mailto:predrag.kuzmanovic@df.uns.ac.rs), [natasa.todorovic@df.uns.ac.rs](mailto:natasa.todorovic@df.uns.ac.rs), [jovana.nikolov@df.uns.ac.rs](mailto:jovana.nikolov@df.uns.ac.rs), [jovana.knezevic@df.uns.ac.rs](mailto:jovana.knezevic@df.uns.ac.rs)*

2) *Higher medical and business-technological school of applied studies in Sabac, Laboratory for Physics, Šabac, Srbija, [predrag.kuzmanovic@vmpts.edu.rs](mailto:predrag.kuzmanovic@vmpts.edu.rs), [leposavafp@gmail.com](mailto:leposavafp@gmail.com)*

3) *University of Novi Sad, Faculty of Technology, Department of Materials Engineering, Novi Sad, Serbia, [miljevic@uns.ac.rs](mailto:miljevic@uns.ac.rs)*

#### ABSTRACT

By-products of the chemical industry can pose a potential radiological hazard for the humans and the environment, as well as for workers exposed to them, due to the increased content of natural radionuclides <sup>226</sup>Ra, <sup>232</sup>Th and <sup>40</sup>K. In this paper, the level of radioactivity was determined in some of the by-products of the chemical industries in Serbia: phosphogypsum, pyrite ash waste, EMCO sludge and Pb/Ag sludge. Gamma indices were determined and an assessment of the radiation risk in the work with these materials was performed.

## **РАДОН**



## PREGLED ISTRAŽIVANJA RADONA U PRETHODNIH 29 SIMPOZIJUMA DRUŠTVA ZA ZAŠTITU OD ZRAČENJA SRBIJE I CRNE GORE

Igor ČELIKOVIĆ<sup>1</sup>, Vesna ARSIĆ<sup>2</sup>, Sofija FORKAPIĆ<sup>3</sup>, Vladimir UDOVIČIĆ<sup>4</sup> i Dragoslav NIKEZIĆ<sup>5</sup>

- 1) Univerzitet u Beogradu, Institut za nuklearne nauke „Vinča“, Beograd, Srbija, [icelikovic@vin.bg.ac.rs](mailto:icelikovic@vin.bg.ac.rs)
- 2) Institut za medicinu rada Srbije „Dr Dragomir Karajović“, Beograd, Srbija, [s.vesna.a@gmail.com](mailto:s.vesna.a@gmail.com)
- 3) Univerzitet u Novom Sadu, Prirodno-matematički fakultet, Departman za fiziku, Novi Sad, Srbija, [sofija@df.uns.ac.rs](mailto:sofija@df.uns.ac.rs)
- 4) Univerzitet u Beogradu, Institut za fiziku u Beogradu, Institut od nacionalnog značaja za Republiku Srbiju, Beograd, Srbija, [udovicic@ipb.ac.rs](mailto:udovicic@ipb.ac.rs)
- 5) Univerzitet u Kragujevcu, Prirodno-matematički fakultet, Kragujevac, Srbija, [nikezic@kg.ac.rs](mailto:nikezic@kg.ac.rs)

### SADRŽAJ

Radon je prirodni radioaktivni gas, čije je prisustvo zbog svojih karakteristika nemoguće detektovati ljudskim čulima, već ga je neophodno meriti. Iako je otkriven na početku XX veka, kada su i izmerene visoke koncentracije radona u rudnicima srebra u Češkoj, tek je četiri decenije posle pretpostavljena veza između visoke koncentracije radona i kancera pluća, da bi se desetak godina kasnije ukazalo na radonove potomke kao moguće uzročnike kancera. Brojne epidemiološke studije su pokazale da radon sa svojim potomcima predstavlja drugi uzročnik kancera pluća posle pušenja. Važnost ispitivanja radona i njegovih potomaka je odmah uočena i u Srbiji, tako da je već na prvom skupu, tada Jugoslovenskog društva za radiološku zaštitu, održanom 1963 godine, bilo nekoliko radova posvećenih merenju koncentracije radona u rudnicima i banjama čime se dominantno bavio Institut za medicinu rada, iz Beograda.

U ovoj publikaciji data je kvalitativna analiza „radonskih“ radova sa prethodnih 29 simpozijuma Društva za zaštitu od zračenja. Diskutovana je aktuelnost problematike sa godinama, pregled tema koje su se širile s godinama, kao i pregled korišćenih mernih tehnika i njihov razvoj. Konačno, data je procena daljeg razvoja problematike radona.

### 1. Uvod

Radon je plemeniti gas čiji su svi izotopi radioaktivni. Radon je bez boje ukusa i mirisa, pa je njegovo prisustvo u nekoj sredini nemoguće registrovati čulima, već ga je potrebno meriti. Od 27 do sada identifikovanih izotopa radona, samo 3 su prirodnog porekla:  $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{220}\text{Rn}$  i  $^{219}\text{Rn}$  koji su redom članovi u  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  i  $^{235}\text{U}$  nizu radioaktivnog raspada. Relativna važnost ovih izotopa raste sa povećanjem njihovog perioda poluraspada i njihove abundance. Pa se tako  $^{219}\text{Rn}$  (kolokvijalno: aktinon) sa periodom poluraspada od 3,98 s, u odnosu na  $^{222}\text{Rn}$  (kolokvijalno: radon) sa periodom

poluraspada od 3,82 dana redovno zanemaruje. S druge strane,  $^{220}\text{Rn}$  (kolokvijalno: toron) sa periodom poluraspada od 55,8 s koji je znatno kraći od perioda poluraspada radona, se ne može uvek zanemariti, budući da ima regiona u kojima je koncentracija  $^{232}\text{Th}$  znatno veća od koncentracije  $^{238}\text{U}$ , pa se koncentracije torona ne mogu zanemariti. Više od 50% od ukupne godišnje efektivne doze usled izlaganju jonizujućem zračenju potiče od izlaganju radona i njegovim potomcima [1]. Na osnovu nedavnih epidemioloških studija je utvrđeno da je radon sa svojim potomcima drugi uzročnik kancera pluća, posle pušenja i da je odgovoran za između 3% - 14% svih kancera pluća [2]. Stoga je jasan značaj koji izučavanje radona ima u oblasti zaštite od zračenja, pa time ne iznenađuje činjenica da je problematika radona bila prisutna na svim simpozijumima Jugoslovenskog društva za zaštitu od zračenja, koji je potom promenio ime u Društvo za zaštitu od zračenja Srbije i Crne Gore.

U ovom radu je dat pregled istraživanja radona u prethodnih 29 Simpozijuma društva za zaštitu od zračenja (U daljem tekstu samo: Simpozijum). Nisu navođeni radovi, saradnika Društva koji su objavljivani u drugim zbornicima ili časopisima. S obzirom na pregledni karakter ovog rada, u sledećem poglavlju je dat istorijski pregled istraživanja radona u svetu, a potom slede poglavlja razvrstana po najznačajnijim temama vezana za ispitivanje radona i istorijskom pojavljivanju.

Istraživanje radona prikazano u zbornicima Simpozijuma se mogu podeliti u dve etape. U prvoj dominira ispitivanje radonu profesionalno izloženih lica, prvenstveno u uranskim i metalničnim rudnicima, dok je u drugoj etapi dominantno istraživanje izlaganja stanovništva u stambenim objektima kao i razvoj brojnih metoda merenja radona u vodi, vazduhu i zemlji, i modelovanje njegovog ponašanja. Prvo sledeće poglavlje je stoga radon u rudnicima, pa sledi izlaganje radona na ostalim radnim mestima. Potom sledi poglavlje: izlaganje stanovništva radonu i konačno metode merenja i simulacije radona i potomaka u životnoj sredini.

## 2. Istorijski pregled istraživanja radona

Problem radona datira još od XVI veka kad su Paracelsus i Agricola, pisali o velikoj stopi smrtnosti usled plućnih bolesti kod rudara u rudnicima srebra u Češkoj i Saksoniji [3]. Bolest je krajem XIX veka identifikovana kao kancer pluća, ali se i dalje nije znao njen uzrok. Godinu dana nakon što je Dorn 1900 godine otkrio radon, Elster i Geitel su detektovali visoku koncentraciju radona u rudnicima u Češkoj, mada i dalje radon nije dovođen u vezu sa kancerom pluća [4]. Tek je četiri decenije kasnije, Rajewski pretpostavio da postoji veza između visoke koncentracije radona i kancera pluća [5]. Konačno, 1951 godine, pola veka posle otkrića radona, Bale je ispravno pretpostavio da su radonovi kratkoživeći potomci glavni uzrok kancera pluća [6]. Usledila su brojne kohort studije sprovedene na rudarima u rudnicima urana u Americi i Čehoslovačkoj, na osnovu kojih je Međunarodna agencija za ispitivanje kancera 1988 godine identifikovala radon kao ljudski kancerogen.

S druge strane, ispitivanje radona u zatvorenim prostorijama je prvi put sprovedeno u Švedskoj, gde je od 225 ispitivanih kuća pronađena nekolicina sa veoma visokom koncentracijom [7]. U to vreme, radon u kućama još uvek nije bio shvaćen kao globalni problem, nego su tek posle dvadesetak godina započeta sistematska istraživanja radona u zatvorenim objektima kao i prvi nacionalni programi merenja radona [8]. Na osnovu objedinjenih epidemioloških studija, Svetska zdravstvena organizacija je identifikovala



radon kao drugi uzročnik kancera pluća, posle pušenja, pa ne čudi povećanje interesovanja za ispitivanje radona [2].

### 3. Radon u rudnicima

Kako u svetu, tako i u tadašnjoj Jugoslaviji, problem radona je na početku istraživanja bio vezan samo za rudnike, dok u stambenim objektima nije bio razmatran. Posle drugog svetskog rata, javila se ekspanzija izučavanja nuklearne energije i proizvodnje nuklearnih sirovina što je dovelo do povećanog broja radnika koji su bili izloženi visokim koncentracijama radona u procesima eksploatacije i obrade rude, i procesu proizvodnje nuklearne sirovine.

Različiti aspekti ispitivanja izloženosti rudara radonu i/ili njegovim potomcima su bili dominantno prisutni počev od I do XV Simpozijuma. Tek par tema (radova) nisu imali vezu sa izlaganjem radona u rudnicima. Saradnici Instituta za medicinu rada i radiološku zaštitu „Dr Dragomir Karajović“, Beograd (tj. Instituta za medicinu rada Srbije „Dr Dragomir Karajović“ – IMRS) predvođeni dr Danilom Hajdukovićem su se prvi bavili problematikom radona uopšte, i u prvih pet Simpozijuma jedini su saopštavali bilo kakve rezultate vezane za ispitivanje radona. Od petog Simpozijuma, grupa iz Instituta „Jožef Stefan“ iz Ljubljane predvođena dr Ivanom Kobalom se priključuje istraživanju radona, sa prvim radovima vezanim za izlaganje radonu u rudnicima. Od ukupno 61 rada sa problematikom radona saopštenih na prvih 15 Simpozijuma, čak 39 radova se na neki način tiče ispitivanja radona u rudnicima, od čega su 32 rada potpisali saradnici sa IMRS, a 7 saradnici sa Instituta IJS.

Kontrolna merenja koncentracije radona su vršena kako u uranskim rudnicima (Kalna, Žirovski Vrh i Zletoska Reka) tako i brojnim neuranskim metaličnim rudnicima olova, cinka, bakra, mangana i antimona.

Prva merenja su pokazala vrlo visoke koncentracije radona u rudnicima urana sa opsegom od par desetaka kBq/m<sup>3</sup> do nekoliko stotina kBq/m<sup>3</sup>, što je bila posledica loših uslova rada i slabe ventilacije [9]. IJS je ispitivao uticaj ventilacije na nivo koncentracije radona u različitim tunelima i pokazano je da odgovarajuća ventilacija može da održava nivo radona u tunelu u dozvoljenim granicama [10]. Sa uvođenjem mehaničke ventilacije, pokazano je da su se koncentracije radona smanjile [11]. U istom radu je ispitivano i smanjenje koncentracije radonovih potomaka i faktora ravnoteže u zavisnosti od brzine ventilacije. Takođe, vršilo se i ispitivanje koncentracije radona za svaki od proizvodnih procesa, kao što su: miniranje, bušenje, utovar i transport rude.

U neuranskim rudnicima metaličnih ruda, koncentracije radona su, po pravilu, bile niže i kretale se od sedamdesetak Bq/m<sup>3</sup> do par hiljada Bq/m<sup>3</sup>, mada je u jednom hodniku rudnika Sase, M. Kamenica, koncentracija radona dostigla 354 kBq/m<sup>3</sup>. Zaključeno je da na ovako visoke koncentracije radona utiču sadržaj <sup>226</sup>Ra u stenama i veoma slaba ventilacija [12].

Pored merenja koncentracije radona, od 1969, tj. od IV Simpozijuma se prezentuju i rezultati merenja kratkoživećih potomaka radona. Zanimljivo je da je do tada ispitivanje izloženosti radonu preko potomaka bilo isključivo razmatrano kroz merenje dugoživećeg <sup>210</sup>Po. Određivana je koncentracija <sup>210</sup>Po u urinu, krvi i kosi rudara, a potom i kod zečeva u cilju procene izloženosti radonu [13,14].

Sa razvojem tehnike merenja radona u vodi, kolege iz IJS su ispitivali koncentraciju radona u vodama u okolini rudnika urana Žirovski vrh. Povećane koncentracije su nađene u vodama u blizini Žirovskog vrha u koje su ve ulivale vode iz rudnika, dok su

vode izvan regiona rudnika sadržale veoma niske koncentracije radona [15].

U cilju što efikasnije optimizacije zaštite rudara vršeno je simultano ispitivanje izloženosti brojnim štetnim agensima: koncentraciji radona, radonovih potomaka, CO, CO<sub>2</sub>, broju i tipu čestica prašine u zavisnosti od različitih uslova ventilacije [16]. Vrlo efikasnom zaštitom se pokazalo korišćenje posebno dizajniranih rudarskih šlemova sa ugrađenim ventilatorom i sistemom za ventilaciju. Faktor smanjenja koncentracije radonovih potomaka od spoljne sredine do vazduha pod šlemom koji se udiše je bio od par desetina do par stotina puta [17].

Zbog značaja koji radon ima na razvoj respiratornih bolesti, saradnici instituta IMRS su već od prvog Simpozijuma prezentovali svoja istraživanja na temu zdravstvenog uticaja radona: praćeno je medicinsko stanje ruda urana u Kalni, sa posebnim naglaskom na respiratorne bolesti, ispitivan je uticaj dugoročne inhalacije radonu i potomcima i kvarcne prašine na respiratorni sistem pacova, ispitivan je uticaj prašine i radioaktivnosti na povećanje aktivnosti pluća pri udisanju radona kako kod pacova, tako i ljudi, hromozomske aberacije usled izlaganja radonu i potomcima i drugo. Detalji ovih istraživanja se mogu naći u preglednom radu dr Hajdukovića i brojnim radovima prikazanim u prvim 15 Simpozijuma [12].

Konačno, sa stopiranjem nuklearnog programa u Srbiji i raspadom Socijalističke Federativne Republike Jugoslavije, u zbornicima Društva se više ne objavljuju radovi vezani za ispitivanje radona u rudnicima urana ili neuranskim metaličnim rudnicima.

#### **4. Izlaganje radonu na ostalim radnim mestima**

Ispitivanje profesionalnog izlaganja radonu, je bilo aktuelno od prvog Simpozijuma. Pored merenja izlaganja radona u rudnicima koji je opisan u prethodnom poglavlju, vršeno je i ispitivanje radona u banjama [18]. Radon je kontrolisan u inhalatorijumima banja: u Rimskim Toplicama, Banji Vrućici i Topuskom koncentracije nisu prelazile 1300 Bq/m<sup>3</sup>, nešto više koncentracije su izmerene u Soko Banji do 1800 Bq/m<sup>3</sup>, dok je u Niškoj Banji maksimalna koncentracija izmerena u inhalatorijumu bila oko 1 MBq/m<sup>3</sup>. Procedura je vremenom unapređena uvođenjem individualnih inhalatora [12].

Radon je meren i u radnim organizacijama koje su primenjivale <sup>226</sup>Ra u terapijske svrhe, merenjem u prostorijama za aplikacije i bunkerima u kojima su se čuvale radijumske igle [12]. U sklopu lekaskih pregleda radnika koji su radili na radioaktivnim bojama koji dominantno potiču od radijuma, spomenuto je izlaganje radonu kao jedan od potencijalnih problema nastalih pri inhalaciji radioaktivne prašine. Kontaminacija radijumom se određivala merenjem koncentracije izdahnutog radona.

Koncentracija radona i njegovih potomaka je merena i u nekim specifičnim radnim prostorijama gde se mogla očekivati povišena koncentracija, kao što su: kaptaža izvora za gradski vodovod, bolnička perionica, kuhinja studentskog doma i sl. Izmereno je da jedino u slučaju kaptaže izvora koncentracija radona prevazilazi preporučenu vrednost [19].

Na osnovu izloženog u prethodna dva poglavlja, može se uočiti da je tema procene štetnosti profesionalnom izlaganju radona vrlo kompleksna, značajna i datira do danas. Iako u regulativi u Srbiji postoje granice za profesionalno izlaganje (član 35, Pravilnika o granicama izlaganja jonizujućim zračenjima [20]) nije precizirano na koja radna mesta se to odnosi i na koji način se predviđa kontrola tih radnih mesta. Pravilnik će biti potrebno uskladiti, u što skorije vreme, sa direktivom Evropskog saveta

2013/59/EUROATOM vezanom za zaštitu od zračenja u okviru koje se član 45 odnosi na regulisanje radona na radnim mestima [21].

## 5. Izlaganje stanovništva radonu

Prva merenja radona su vršena 1964. godine u okolini rudnika urana Kalna u kućama u kojima žive rudari. Izmerene su koncentracije do  $750 \text{ Bq/m}^3$ , međutim kako u to vreme nije bila regulisana maksimalna preporučena koncentracija radona u kućama, a maksimalna dozvoljena koncentracija u rudnicima je iznosila  $11,1 \text{ kBq/m}^3$ , dok su se sami rudari izlagali i znatno višim koncentracijama, ovom rezultatu nije pridodavan značaj [12]. Tek dve decenije kasnije se nastavlja merenje radona u zatvorenim prostorijama. U 14. zborniku Simpozijuma iz 1987. godine pojavljuju se 2 rada iz ove tematike. Kolege sa Pedagoškog fakulteta u Osijeku su korišćenjem LR-115 detektora ispitivali sezonsku varijaciju koncentracije radona u podrumu i na balkonu, dok su kolege iz IJS dizajnirali CR-39 detektor, a potom merili radon u rudniku urana, spoljašnjem vazduhu i odabranim kućama. Ovo ujedno predstavlja prvo pominjanje pasivnih, nuklearnih trag detektora. U sledeća dva Simpozijuma, problematikom izlaganja radona u zatvorenim prostorijama dominantno su se bavile kolege iz Slovenije i Hrvatske. Ispitivana je i koncentracija radona u kućama koje su građene od pepela skinutog sa elektrofiltra iz termoelektrane. Pored ispitivanja radona u kućama, od 1991 počinje da se prati koncentracija radona u vrtićima. Prve rezultate objavio je IJS na čelu sa dr Kobalom i saradnicima koji su razvili alfascintilacioni metod [22,23].

Sa prestankom objavljivanja radova koji razmatraju izlaganje radonu u rudnicima, intenzivira se izučavanje radona u zatvorenim prostorijama. Tako se od 1993. godine, u Zbornicima Simpozijuma pojavljuju radovi sa sve većim brojem institucija koje su u svoju problematiku istraživanja ubacili i ispitivanje uticaja radona na stanovništvo. Iste godine, pojavljuju se prve preporuke Međunarodne komisije za radiološku zaštitu (ICRP – International Commission on Radiological Protection) koje se tiču zaštite od radona u kućama i radnim mestima, a kao posledica istraživanja u okviru brojnih nacionalnih programa ispitivanja radona pokrenutih osamdesetih godina [24].

Sa pojavom pasivnih nuklearnih trag detektora i ugljenih kanistara, intenzivira se i merenje koncentracije radona u kućama [25, 26], a takođe i školama i vrtićima [27].

Desetak godina od kad se krenulo sa ispitivanjem radona u zatvorenim prostorijama, na XXI Simpozijumu, dr Žunić sa koautorima objavljuje prvi rad koji govori o naučnim osnovama za sprovođenje nacionalnog programa za radon [28]. Već na sledećem, XXII Simpozijumu se pojavljuje rad u kojem je data prva radonska mapa Vojvodine, sprovedene u svih 45 opština Vojvodine, korišćenjem CR-39 detektora [29]. Merenje koncentracije radona u školama, predškolskim ustanovama i stambenim objektima je nastavljeno i u narednih 5 Simpozijuma, u okviru kojih se objavljuju radovi sa Kosova i Metohije, Crne Gore, Slovenije, i po prvi put rezultati merenja radona u školama u Bosni i Hercegovini (o čemu svedoče brojni radovi saopšteni u Simpozijumima, počev od XXII).

Sa postavljanjem Laboratorije za elektrohemijско razvijanje u Vinči, objavljuje se rad u kojem je prvi put prikazano sistematsko merenje radona u ruralnim sredinama [30]. Radon je potom meren drugim detektorima i na Kosovu i Metohiji [31].

Na XXVII Simpozijumu, dr Udovičić priča o regulativi i strategiji nacionalnog programa za radon. U radu su dati okviri za održavanje jasnog i održivog radonskog nacionalnog plana [32]. Na sledećem, XXVIII Simpozijumu, prikazan je dizajn prve

nacionalne prospekcije radona u boravišnim prostorijama koju je sačinila radna grupa za radon [33]. Prateći predloženi dizajn, podeljeno je 6000 CR-39 detektora. Kampanja je uspešno realizovana, ali rezultati još nisu saopšteni na Simpozijumu. I pored uspešno realizovane kampanje, ostalo je još puno posla kako bi se izvršila implementacija radonskog akcionog plana i izvršilo usaglašavanje sa direktivama EU, što je donekle olakšano postojanjem aneksa XVIII koji kroz 14 elemenata predstavlja svojevrsni vodič za pripremu akcionog plana [21].

Prvu sanaciju objekta od visoke koncentracije radona je sproveo dr Jovanović u Sloveniji u kući u kojoj je maksimalna izmerena koncentracija radona iznosila 3000 Bq/m<sup>3</sup>. Sanacija je izvršena stavljanjem izolacije na pod podruma, čime je postignuta 25% niža koncentracija, a rezultat je prezentovan na Simpozijumu 1991. godine [34]. Iako sama sanacija nije postigla cilj i oborila koncentracije radona ispod preporučenih granica, rad je značajan kao prvi. Dva Simpozijuma posle, Departman za fiziku, Prirodno-matematičkog fakulteta, Univerziteta u Novom Sadu, prezentuje rad u kojem daje detaljan pregled građevinskih tehnika koje dovode do smanjenja koncentracije radona u zatvorenim prostorijama [35]. Na XXII Simpozijumu je prikazana prva uspešna redukcija nivoa radona u jednoj školi u Crnoj Gori. Tim istraživača predvođeni akademikom P. Vukotićem je uspešno identifikovala puteve ulaska radona u učionice korišćenjem aktivnog metoda detekcije radona, ponudila tehničko rešenje, koje je potom Građevinski fakultet iz Podgorice realizovao i smanjio nivo radona do 10 puta [36]. Kolege iz IMRS su takođe u jednom radu prezentovanom na XXVII Simpozijumu dali niz opštih postupaka kako smanjiti nivo radona u školskim i predškolskim ustanovama. I pored svega navedenog, u Srbiji do danas nije izvršena ni jedna sanacija objekta od visoke koncentracije radona, mada je skorije rađena pilot studija sa predlozima mere sanacije.

### **6. Metode merenja i simulacije radona i potomaka u životnoj sredini**

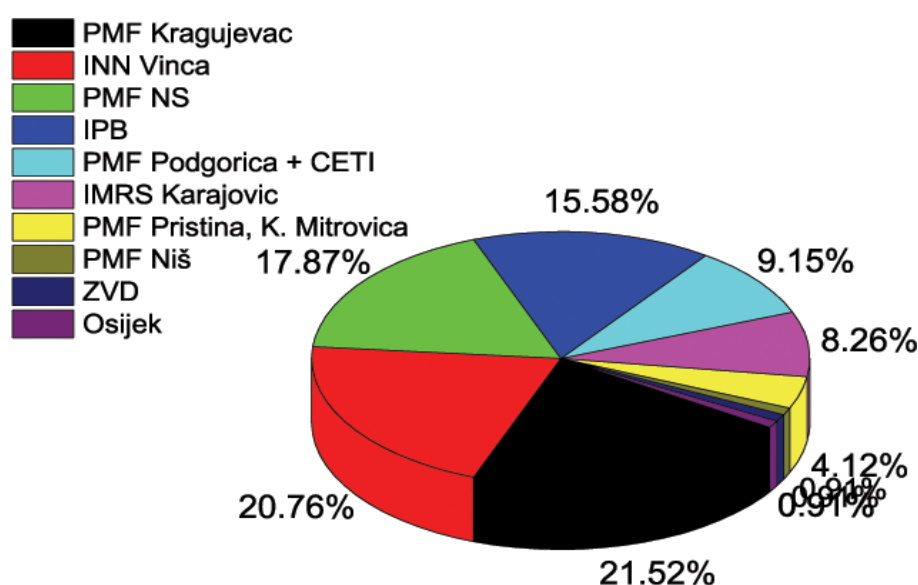
Prva etapa merenja radona se odnosi na ispitivanje profesionalnog izlaganja radona, prvenstveno rudara u uranskim i metalničnim rudnicima. S obzirom da su u pitanju merenja koja su sa početka istraživanja radona kao i da su se samo 2 institucije dominantno bavile ovom problematikom, to je i broj mernih tehnika bio manje raznovrstan nego u drugoj etapi kada je ispitivanje radona došlo u „zrelu fazu“ i kada se sve veći broj istraživača uključuje u ovu problematiku.

Tokom cele prve etape, IMRS je merenje radona vršio scintilacionom metodom korišćenjem staklenog balona zapremine 125 ml, koji je sa unutrašnje strane premazan sa ZnS(Ag). Od IV Simpozijuma IMRS uvodi dve metode merenja radonovih potomaka korišćenjem membranskih filtera. Alfa aktivnost na filteru se merila jonizacionom komorom i po jednoj metodi se određivala ukupna koncentracija radonovih potomaka, dok je po drugoj metodi bilo moguće meriti aktivnost stakog radonovog kratkoživećeg potomka ponaosob. IMRS je razvio i metod merenja niske koncentracije radona optimizovane da meri koncentraciju izdahnutog radona. Hajduković daje pregled postojećih metoda merenja radonovih potomaka kao i predlog optimalne tehnike za primenu u našim uslovima.

Institut IJS je radon takođe merio scintilacionom metodom, ali sa ćelijama zapremine oko 160 ml. Pored toga, uveli su 2 metode merenja niskih koncentracija radona u vodi bazirane na scintilacionim ćelijama pri čemu se kod jedne radon izdvaja prodivavanjem vode inertnim gasom, a kod druge kondenzacijom tekućim azotom. Uvedena je i

metoda merenje radonovih potomaka koristeći scintilacione pločice, uz pretpostavku ravnoteže između radona i potomaka. Na XI Simpozijumu, grupa iz IJS prva publikuje rad o razvoju uređaja za kontinualno merenje radona bazirano na jonizacionoj komori velike osjetljivosti.

Drugu etapu karakteriše ispitivanje izloženosti stanovništva radonu kao i brojnih pratećih faktora koji bi mogli doprineti boljem razumevanju njegovog ponašanja u životnoj sredini. Razvijaju se brojni detektori, razvijaju se različite tehnike merenja radona u vodi i zemnom gasu, usložnjava se analiza rezultata i sl. Na grafiku 1 je prikazan broj radova iz oblasti radona po instituciji u periodu od 1993 do 2017. Dominiraju radovi koji potiču sa Prirodno-matematičkog fakulteta, Univerziteta u Kragujevcu- 21,52%, iz Instituta za nuklearne nauke „Vinča“- 20,76%, Departmana za fiziku, Prirodno-matematičkog fakulteta, Univerziteta u Novom Sadu – 17,87% i Instituta za fiziku, Univerziteta u Beogradu (IPB) – 15,58%.



**Slika 1. Pregled broja radova sa radonskom tematikom po institucijama u periodu od 1993 do 2017.**

Od XIII Simpozijuma, pojavljuju se merenja bazirana na čvrstim nuklearnim trag detektorima. Prva takva merenja je objavio kolega sa Učiteljskog fakulteta u Osijeku, korišćenjem LR-115 stavljenim u otvorenoj i zatvorenoj sa filtrom plastičnoj čaši [37]. Na narednom simpozijumu saradnici IJS prikazuju rad na razvoju pasivnih detektora baziranih na CR-39 filmovima. Na XVI Simpozijumu, su saradnici takođe iz IJS-a, po prvi put prikazali merenja radona u zatvorenim objektima korišćenjem ugljenih kanistra, kao i alfa spektrometri koji su korišćeni za kontinualno merenje radonovih potomaka [38].

Period od XVI Simpozijuma do XXIX simpozijuma donosi razvoj različitih pasivnih metoda za merenje radona: detektori sa kombinacijom aktivnog uglja i polikarbonata, detektori sa različitim tipovima trag detektora: LR-115, CN-92, CR-39.



Od XVII Simpozijuma, grupa prof. Nikezića sa PMF u Kragujevcu u najvećoj meri doprinosi različitim aspektima istraživanja radona. Rađeno je na razvoju difuzione komore koja pored LR-115 ima i elektret u cilju povećanja efikasnosti detekcije radona, što su komparativna merenja i potvrdila [39]. Značajan pravac istraživanja predstavljaju razna modelovanja. Vršeno je dozimetrijsko modelovanje efekata inhalacije radona i njegovih potomaka u plućima. Razvijen je model za računarsko određivanje kalibracionog koeficijenta za merenje radona pomoću CR-39 detektora, što je ujedno i prva primena Monte Karlo metoda u problematici radona [40]. Jedan od problema u nauci o radonu je dugoročno merenje radonovih potomaka, pa je razvijana tehnika merenja radonovih potomaka i faktora ravnoteže trag detektorima, merenje  $^{210}\text{Po}$  na staklu... Vršena je i simulacija veličine i raspodele tragova na CR-39 detektoru ozračenog radonom za različite faktore ravnoteže. Utvrđeno je da se mogu identifikovati tragovi koji potiču od  $^{214}\text{Po}$  čime se dalje primenom Jacobi-Porstendorferovog modela mogu odrediti koncentracije ostalih potomaka [41].

Merenje radona ugljenim kanistrima po standardnoj EPA metodi predstavlja jedini pasivni metod po kojem su čak tri Laboratorije u Srbiji akreditovane, a čije je međulaboratorijsko poređenje pokazalo dobro slaganje dobijenih rezultata [42].

U Srbiju je merenje radona ugljenim kanistrima uveo IMRS 1991 godine, a 1997. godine objavljuje rezultate koncentracija radona merenih u 555 slučajno izabranih stanova u gradovima širom Srbije [26]. Dve godine kasnije i Departman za fiziku, PMF Novi Sad, objavljuje koncentracije radona u vrtićima i školama dobijenih ugljenim kanistrima [27]. Pored samih merenja, vršena su teoretska i eksperimentalna razmatranja parametara koji utiču na sam metod, Vršena je simulacija adsorpcije na aktivnom uglju metodom konačnih elemenata u zavisnosti od temperature i varijacije koncentracije radona. Dobro slaganje sa eksperimentalnim rezultatima ukazuje da bi se ovakvim pristupom mogla olakšati ekstenzivna procedura kalibracije i predvideti odzivi pri varijaciji različitih parametara [43]. Metodom konačnih elemenata je vršena i simulacija skim-off metode u cilju smanjenja efekata ekstremnih varijacija u koncentraciji radona merenoj aktivnim ugljem [44]. Takođe je ispitivan i uticaj kalibracionog faktora na rezultat koncentracije radona kao i opravdanost korišćenja EPA krivih za korekciju na relativnu vlažnost za ugljene kanistre [45,46].

Vremenom su se aktivni uređaji na svetskom tržištu znatno unapredili, postali su veće osetljivosti, sa više opcija i finansijski dostupniji, pa su ih radonski eksperti Društva uveli u upotrebu u svojim laboratorijama. To je dovelo do uvođenja novih i/ili ekspanzije postojećih metoda merenja koje je prethodno bilo teže izvoditi.

Razvijaju se modeli merenja brzine ekshalacije iz građevinskog materijala [47,48], kao i merenje koeficijenata difuzije [49]. Razvijen je i gama spektrometrijski metod kojim se omogućava istovremeno određivanje brzine ekshalacije, difuzione dužine i koeficijenta emanacije [48].

Uspostavljaju se metode merenja radona u vodi i ujedno se ispituje koncentracija radona u pijaćoj vodi, fontanama i izvorskoj vodi. Uvedene su 4 metode merenja radona u vodi, dve bazirane na tačnom scintilacionom brojaču, jedna na alfa spektrometru, dok je četvrta metoda gama-spektrometrijska [50].

Merene su i koncentracije radona i torona u zemljištu. Međutim, kako koncentracija radona u zemnom gasu varira od sadržaja vlage u zemljištu, u svetu je uvedena veličina geogeni radon potencijal (GRP) koji pored koncentracije radona u zemljištu uzima u obzir i permeabilnost zemljišta. Prvi rad na ovu temu u Zborniku je vezan za mapiranje GRP na osnovu 400 merenja širom Hrvatske [51]. Saradnici iz Novog Sada i IPB su na

osnovu rezultata koncentracije radona u zatvorenim prostorijama i brojnih raspoloživih geohemijskih podataka o zemljištu pokušali korišćenjem multivarijantne analize proceniti GRP. Izdvojene su dve metode bazirane na veštačkoj neuralnoj mreži, a dobijeni rezultati daju uvid u zavisnost i značaj svakog parametra u predviđanju koncentracije radona [52].

U niskofonskoj podzemnoj laboratoriji, sa uvođenjem kontinualnog merenja radona, brojni radovi se posvećuju ispitivanju varijacije koncentracije radona, korelacijom sa fonom gama zračenja kao i meteorološkim parametrima, kao i analizom vremenskih serija koncentracije primenom različitih metoda [53,54]. Ispitana je i mogućnost da se kontinualno merenje radona, koje je vršeno u Niskofonskoj laboratoriji, iskoristi za predviđanje zemljotresa. Uočena je nagla promena koncentracije radona pre zemljotresa, tako da postoji osnov za dalja istraživanja na tu temu. U gama spektrometriji, radon se javlja kao problem jer povećava fon. O toj problematici je već pisano na II Simpozijumu gde se spominju radon i toron kao gasovi čiju je koncentraciju potrebno smanjiti u sobi gde se nalazi uređaj za merenje radioaktivnosti celog tela. Posebna pažnja smanjenju koncentracije radona zbog kvaliteta gamaspektrometrijskih rezultata je obraćana pri konstrukciji Niskofonske podzemne laboratorije u Institutu za fiziku, Beograd. Zidovi niskoaktivnog betona su hermetički zatvarani aluminijumskim limom debljine 1mm, uveden je nadpritisak od 1,5-2 mbara, instalirana je ventilacija sa dvostepenim sistemom dva filtra: te se postiglo smanjenje koncentracije radona od 1200 Bq / m<sup>3</sup> do 10,4 Bq / m<sup>3</sup> [55].

I sam pristup obradi rezultata merenja se menjao od prvog do poslednjeg Simpozijuma. U prvim radovima, praktično nije bilo analize već su samo prikazivani rezultati merenja. Događalo se čak da su rezultati prikazivani bez standardne devijacije. Vremenom analiza rezultata se usložila, pa je minimum statističke analize uključivala deskriptivnu statistiku. Budući da raspodela koncentracije radona na određenom prostoru prati log-normalnu raspodelu, jedan od standardnih testiranja je i test na log-normalnu raspodelu. Postavljanje radonskih detektora u zatvorenim prostorijama je često praćeno popunjavanjem upitnika o samom objektu, geološkoj podlozi samog objekta i slično. Stepem korelacije između izmerene koncentracije radona i brojnih parametara se određivao multi-regresionom analizom. Konačno, kolege iz IPB su koristeći svoje iskustvo iz analize podataka u fizici visokih energija, uvele multivarijantni metod klasifikacije. Stepem složenosti analize rezultata koja je prikazivana na poslednjim Simpozijumima može da parira postojećim modelima i analizama koji se koristi u svetu.

## 7. Zaključak

O važnosti ispitivanja radona i njegovih potomaka zbog njihovog uticaja na razvoj kancera pluća se znalo 50-tih godina, pa ne iznenađuje da se već od prvog Simpozijuma održanog 1963 pojavljuju radovi posvećeni merenju radona. Istraživanje radona unutar Društva se može podeliti na dve etape. U prvoj etapi ispitivano je profesionalno izlaganje radonu, prvenstveno u rudnicima urana, čime su se dominantno bavile 2 institucije: IMRS i IJS. Sa pokretanjem nacionalnih radonskih programa u svetu i donošenjem ICRP preporuka o nivoima koncentracije radona u kućama, kao i odumiranja nuklearnog programa kod nas, počinje druga etapa u kojoj se sve više institucija bavi istraživanjem radona, prvenstveno izlaganjem stanovništva. Najvažniji pravci istraživanja u drugoj etapi su merenje radona u kućama i školskim i predškolskim ustanovama, razvoj metoda merenja radona u vazduhu, vodi i zemljištu, modelovanje



doza koje stanovništvo primi usled izlaganja radonu... Analize rezultata merenja su prešle „dalek put“ od vrlo trivijalnih, dajući samo izmerene vrednosti, preko deskriptivne statistike, do primene veoma naprednih alata za analizu u čemu pratimo korak sa svetom.

Jedna od stvari koja ostaje za neposrednu budućnost je usklađivanje zakona o jonizujućem zračenju sa evropskim, implementacija radonskog akcionog plana kao i sprovođenje mera za sanaciju objekata od visoke koncentracije radona. Sa identifikacijom radonski prioriternih oblasti očekuje se intenziviranje merenja radona na radnim mestima...

### 8. Zahvalnica

Ovaj rad je podržan od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja, kroz projekte: OI 171018, OI 171021 i III 171002.

### 9. Literatura

- [1] UNSCEAR (United Nation Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation Report), Sources and Effects of Ionizing Radiation, Report to the General Assembly. United Nations, New York. 2008.
- [2] World Health Organisation, WHO Handbook on Indoor Radon. WHO, Geneva, (2009).
- [3] Paracelsus, 1567. Von der Bergsucht und anderen Bergkrankheiten; s., Schriften aus dem Gesamtgebiet der Gewerbehygiene, Neue Folge. J Springer, Berlin 1925.
- [4] J. Elster, H. Geitel. Über eine fernere Analogie in dem elektrischen Verhalten der natürlichen und der durch Becquerelstrahlen abnorm leiteten gemachten Luft. *Phys. Z.* 2, 1901, 590–593.
- [5] B. Rajewsky, Bericht über die Schneeberger Untersuchungen. *Z. Krebsforsch* 49, 1940, 315–340.
- [6] W.F. Bale, W.F., 1951. Hazards Associated with Radon and Thoron. Unpubl. Memo. to U.S. At. Energy Comm. (reprinted *Heal. Phys.* 38, 1061).
- [7] B. Hultqvist, B., Studies on naturally occurring ionising radiation, with special reference to radiation doses in Swedish houses of various types. *K. Sven. Vetenskap. Handl.* 4, 1956, 6.
- [8] UNSCEAR (United Nation Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation Report), Annex B: Exposure due to Natural Radiation Sources. Vol. 1, United Nation, New York, 2000.
- [9] M. Međedović, D. Panov, M. Vukotić, P. Raičević, D. Hajduković, Kontaminacija Ra226 i potomcima u rudniku urana. *Zbornik radova II jugoslovenskog simpozijuma o radiološkoj zaštiti*, Mostar 1-4 novembra 1965, 275-284.
- [10] J. Kristan, I. Kobal, M. Ančik, T. Sedovšek, Kontrola kontaminacije  $^{222}\text{Rn}$  i njegovih kratkoživećih potomaka u rudniku urana u Žirovskom Vrhu, *Zbornik radova VI simpozijuma Jugoslovenskog društva za zaštitu od zračenja*, Ohrid 25-28. April, 1972, 253-260.

- [11] D. Hajduković, M. Vukotić, I. Prijatelj, Kontrola merenja radona i potomaka u rudniku urana Žirovski vrh, D. Hajduković, *Zbornik radova XIII simpozijuma Jugoslovenskog društva za zaštitu od zračenja* (1961 – 1984), Pula, 10.-13. 06, 1985, 533-536
- [12] D. Hajduković Trideset godina merenja radona-222 u radnoj i životnoj sredini (1960 – 1990), *Zbornik radova XVI simpozijuma Jugoslovenskog društva za zaštitu od zračenja*, Neum, 28-31. Maj 1991, 39-44.
- [13] D. Đurić, D. Panov, M. Kilibarda, Lj. Novak, M. Vukotić, Polonijum u urinu rudara kao merilo ekspozicije radonu, *Zbornik radova I jugoslovenskog simpozijum o radiološkoj zaštiti*, Portorož, 8-12 oktobra, 1963, 11-12.
- [14] D. Panov, D. Petrović, M. Ranković, Ekskrecija polonijuma-210 posle ekspozicije zečeva radonu, D. Panov, *Zbornik radova VI simpozijuma Jugoslovenskog društva za zaštitu od zračenja*, Ohrid, 25.-28. April, 1972, 431-438.
- [15] D. Novak, I. Kobal, Kratek pregled naravnega ojadja radioaktivnosti voda v Žirovskem vrhu, *Zbornik radova VIII simpozijuma Jugoslovenskog društva za zaštitu od zračenja*, Herceg Novi, 20-23. Maj 1975, 327-338.
- [16] D. Hajduković, I. Prijatelj, Simultana kontrola izloženosti štetnim agensima radnika u uranskom rudniku kod menjanja uslova ventilacije, *Zbornik radova XIII Jugoslovenskog društva za zaštitu od zračenja*, Pula 10-13. Juna 1985, 529-532.
- [17] D. Hajduković, I. Prijatelj, J. Rojc, V. Štruc, Ispitivanje efikasnosti zaštitnih šlemova u kontaminiranom delu jame rudnika urana RUŽV, *Zbornik radova XV simpozijuma Jugoslovenskog društva za zaštitu od zračenja*, Priština, 06-09. Juna 1989, 99-100.
- [18] R. Dajlević, M. Vukotić-Conić, Rezultati merenja koncentracije radona u rudniku urana i banjanskim mestima, *Zbornik radova I jugoslovenskog simpozijuma o radiološkoj zaštiti*, Portorož 8-12. oktobra 1963, 8-9.
- [19] D. Radusinović, T. Anđelić, P. Vukotić, Radon u nekim specifičnim radnim prostorijama, *Zbornik radova XX simpozijuma Jugoslovenskog društva za zaštitu od zračenja*, Tara, 3-5. Novembra, 1999, 145-148.
- [20] Pravilnik o granicama izlaganja jonizujućim zračenjima i merenjima radi procene nivoa izlaganja jonizujućim zračenjima (Sl. gl. RS 86/11 i Sl. gl. RS 50/18)
- [21] European Council (EC). Council Directive 2013/59/Euratom laying down basic safety standards for protection against the dangers arising from exposure to ionising radiation. *Off. J. Eur. Union L13*; 57, 2014.
- [22] G. Đurić, D. Popović, J. Vaupotič, I. Kobal, P. Stegnar, Koncentracije radona u dečijim vrtićima u Beogradu i okolini, *Zbornik radova XVI simpozijuma Jugoslovenskog društva za zaštitu od zračenja*, Neum, 28-31. maj, 1991, 31-34.
- [23] M. Peternel, B. Čanč, J. Vaupotič, M. Škofljanec, I. Kobal, P. Stegnar, Koncentracije radona v vrtcih iz Maribora in okolice, *Zbornik radova XVI simpozijuma Jugoslovenskog društva za zaštitu od zračenja*, Neum, 28-31. maj, 1991, 111-114.
- [24] ICRP, Protection Against Radon-222 at Home and at Work. ICRP Publication 65, Ann. ICRP 23(2). 1993.

- [25] O. Čuknić, S. Đurov, D. Nikezić, P. Marinković, Merenje koncentracije radona u zatvorenim prostorijama Požarevca i Svilajнца, *Zbornik radova XVII jugoslovenskog simpozijuma za zaštitu od zračenja*, Beograd-Vinča, 25-28. Mart, 1993, 99-102.
- [26] I. Petrović, G. Pantelić, R. Maksić, Ispitivanje koncentracije radona u stanovima u Republici Srbiji, *Zbornik radova XIX jugoslovenskog simpozijuma zaštite od zračenja*, Golubac, 18-20. Jun, 1997, 207-209.
- [27] N. Žikić, Lj. Čonkić, I. Bikit, M. Krmar, Ž. Đurčić, M. Vesković, J. Slivka, Određivanje koncentracije  $^{222}\text{Rn}$  u zatvorenim prostorinama, *Zbornik radova XX simpozijuma Jugoslovenskog društva za zaštitu od zračenja*, Tara, 3-5. Novembar, 1999, 83-86.
- [28] Z.S. Žunić, M. Kovačević, D. Alavantić, M.B. Spasić, Značaj istraživanja izloženosti stanovništva radonu, *Zbornik radova XXI simpozijuma Jugoslovenskog društva za zaštitu od zračenja*, Kladovo, 10-12. Oktobar, 2001, 119-124.
- [29] S. Ćurčić, I. Bikit, Lj. Čonkić, M. Vesković, J. Slivka, E. Varga, N. Žikić-Todorović, D. Mrđa, Prva Radonska Mapa Vojvodine, *Zbornik radova XXI simpozijuma Jugoslovenskog društva za zaštitu od zračenja*, Petrovac n/m 29. Septembar - 1. Oktobar, 2003, 195-198.
- [30] Z.S. Žunić, I. Čeliković, P. Ujić, K. Fujimoto, A. Birovljev, I. V. Yarmoshenko, Istraživanje izloženosti radonu i toronu u ruralnim zajednicama, *Zbornik radova XXI simpozijuma Jugoslovenskog društva za zaštitu od zračenja*, Petrovac n/m 29. Septembar - 1. Oktobar, 2003, 207-210.
- [31] G. Milić, B. Vučković, Lj. Gulan, I. Čeliković, Z.S. Žunić, Raspodela koncentracije aktivnosti radona i torona u kućama na Kosovu i Metohiji, *Zbornik radova XXVI simpozijuma Društva za zaštitu od zračenja Srbije i Crne Gore*, Tara, 12-14. Oktobar, 2011, 150-154.
- [32] V. Udovičić, Nacionalni program za radon, regulativa i strategija. *Zbornik radova XXVII simpozijuma Društva za zaštitu od zračenja Srbije i Crne Gore*. Vrnjačka Banja 2-4. Oktobra, 2013, 134-138.
- [33] V. Udovičić, D. Maletić, M. Eremić Savković, G. Pantelić, P. Ujić, I. Čeliković, S. Forkapić, D. Nikezić, V. Marković, V. Arsić, J. Ilić, *Zbornik radova XXVIII simpozijuma Društva za zaštitu od zračenja Srbije i Crne Gore*, Vršac, 30. Septembar – 2. Oktobar, 2015, 173-180.
- [34] P. Jovanović, Sanacija bivalnoga objekta z visokimi koncentracijama radona in radonovih potomcev, *Zbornik radova XVI simpozijuma Jugoslovenskog društva za zaštitu od zračenja*, Neum, 28-31. maj, 1991, 45- 50.
- [35] B. Pavlić, I. Bikit, J. Slivka, Lj. Čonkić, M. Krmar, Građevinski postupci za smanjenje koncentracije radona u zgradama, *Zbornik radonva XVIII Simpozijuma Jugoslovenskog društva za zaštitu od zračenja*, Bečići, 24-26. maj 1995, 257-260.
- [36] R. Zekić, P. Vukotić, T. Anđelić, J. Kalezić, D. Vuksanović, R. Žižić, N. Svrkota, Redukcija nivoa radona u osnovnoj školi „Štampar Makarije“ u Podgorici, *Zbornik radonva XXII Simpozijuma Jugoslovenskog društva za zaštitu od zračenja*, Petrovac n/m, 29 septembar – 1. oktobar 2003, 203-206.

- [37] J. Planinić, Mjerenje koncentracije radona u zraku, *Zbornik radona XIII Jugoslovenskog simpozijuma zaštite od zračenja*, Pula 10-13. Lipnja 1985, 169.
- [38] M. Križman, Značilni primeri visokih koncentracij radona-222 v zaprtih prostorih Sloveniji in ukrepi za njihovo zmanjševanje, *Zbornik radona XVI Jugoslovenskog simpozijuma za zaštitu od zračenja*, Neum, 28-31. Maj 1991, 59-63.
- [39] D. Krstić, D. Nikezić, P. Marković, Difuziona komora za merenje radona sa elektretom i trag detektorom LR-115-2, *Zbornik radova XVII Jugoslovenskog simpozijuma za zaštitu od zračenja*, Beograd-Vinča, 25-28. Mart, 1993, 85-88.
- [40] B. Jovanović, D. Nikezić, Računanje kalibracionog koeficijenta za merenje radona trag detektorom CR-39. *Zbornik radova XVII Jugoslovenskog simpozijuma za zaštitu od zračenja*, Beograd-Vinča, 25-28. Mart, 1993, 89-92.
- [41] D. Kostić, D. Nikezić, D. Krstić, Raspodela tragova na detektoru CR-39 ozračenog radonom za različite faktore ravnoteže, *Zbornik radova XX simpozijuma Jugoslovenskog društva za zaštitu od zračenja*, Tara, 3-5. Novembra, 1999, 159-163.
- [42] S. Forkapić, K. Bikit, V. Arsić, J. Ilić, G. Pantelić, M. Živanović, Rezultati nacionalnog međulaboratoriskog poređenja u merenju koncentracije radona u vazduhu zatvorenih prostorija Beograd-Noví Sad 2015, godine. *Zbornik radova XXVIII Simpozijuma DZZSCG*, Vršac, 30. Septembar – 2. Oktobar, 2015, 212-221.
- [43] V. Urošević, D. Nikezić, Simulacija adsorpcije radona metodom konačnih elemenata i eksperimentalna verifikacija, *Zbornik radova XIX Jugoslovenskog simpozijuma zaštite od zračenja*, Golubac, 18-20. Jun, 1997, 229-233.
- [44] V. Urošević, D. Nikezić, Simulacija skim-off metode za merenje koncentracije radona aktivnim ugljem, *Zbornik radova XX Jugoslovenskog simpozijuma zaštite od zračenja*, Tara, 3-5. Novembar, 149-153.
- [45] G. Pantelić, M. Živanović, M. Rajačić, J. Nikolić, D. Todorović, Uticaj kalibracionog faktora na rezultat koncentracije radona, *Zbornik radova XXVII simpozijuma DZZSCG*, Vrnjačka Banja 2-4. Oktobra, 2013, 147-151.
- [46] M. Živanović, G. Pantelić, M. Rajačić, J. Nikolić, D. Todorović, Opravdanost korišćenja EPA krivih za korekciju na relativnu vlažnost vazduha kod merenja radona pomoću ugljenih filtera, *Zbornik radova XXVIII simpozijuma DZZSCG*, Vršac, 30. Septembar – 2. Oktobar, 2015, 234-240.
- [47] P. Ujić, I. Čeliković, A. Kandić, I. Vukanac, M- Đurašević, A. Demajo, Z. Žunić, Merenje brzine ekshalacije radona iz građevinskih materijala metodom zatvorene komore, *Zbornik radova XXIV simpozijuma DZZSCG*, Zlatibor, 3-5. Oktobar, 2007, 99-103.
- [48] P. Ujić, I. Čeliković, A. Awhida, B. Lončar, G. Pantelić, I. Vukanac, P. Kolarž, A. Kandić, M. Đurašević, M. Živanović, Merenje ekshalacije radona iz građevinskih materijala. *Zbornik radova XXIX simpozijuma DZZSCG*, Srebrno jezero, 27-29. Septembar, 2017, 219-224.
- [49] S. Grujić, A. Radukun-Kosanović, I. Bikit, D. Mrđa, S. Forkapić, Analiza difuzije radona kroz građevinske materijale. *Zbornik radova XXV simpozijuma DZZSCG*. Kopaonik, 30.9-2.10. 2009, 89-93.

- [50] J. Nikolić, N. Todorović, I. Stojković, B. Tenjović, A. Vranićar, J. Knežević, S. Vuković, metode merenja  $^{222}\text{Rn}$  u vodi. *Zbornik radova XXIX simpozijuma DZZSCG*, Srebrno jezero, 27-29. Septembar, 2017, 500-506.
- [51] V. Radolić, M. Poje Sovilj, D. Stanić, I. Miklavčić. Radon in soil gas and constructed geogenic radon potential in Croatia. *Zbornik radova XXIX simpozijuma DZZSCG*, Srebrno jezero, 27-29. Septembar, 2017, 192-199.
- [52] S. Forkapić, D. Maletić, J. Vasin, K. Bikit, D. Mrđa, I. Bikit, V. Udovičić, R. Banjanac. Korišćenje multivarijantne analize za predviđanje geogenog radonskog potencijala. *Zbornik radova XXIX simpozijuma DZZSCG*, Srebrno jezero, 27-29. Septembar, 2017, 210-218.
- [53] V. Udovičić, S. Forkapić, B. Grabež, A. Dragić, R. Banjanac, D. Joković, B. Panić. Varijacija koncentracije aktivnosti radona u Niskofonskoj podzemnoj laboratoriji u Beogradu. *Zbornik radova XXIV simpozijum DZZSCG*, Zlatibor, 2007, 77-81.
- [54] V. Udovičić, D. Maletić, A. Dragić, R. Banjanac, D. Joković, N. Veselinović, J. Filipović. Primena različitih metoda u analizi vremenskih serija koncentracije radona. *Zbornik radova XXVII simpozijum DZZSCG*, Vrnjačka Banja, 2013, 167-170.
- [55] R. Banjanac, V. Udovičić, A. Dragić, D. Joković, J. Puzović, I. Aničin. Karakteristike niskofonske podzemne laboratorije Instituta za fiziku u Zemunu. *Zbornik radova XXI simpozijuma Jugoslovenskog društva za zaštitu od zračenja*. Petrovac n/m 29. Septembar - 1. Oktobar, 2003, 91-94.

---

## OVERVIEW OF RADON RESEARCH PUBLISHED IN THE FIRST 29 SYMPOSIUMS OF RADIATION PROTECTION SOCIETY OF SERBIA AND MONTENEGRO

**Igor ČELIKOVIĆ<sup>1</sup>, Vesna ARSIĆ<sup>2</sup>, Sofija FORKAPIĆ<sup>3</sup>, Vladimir UDOVIČIĆ<sup>4</sup>  
and Dragoslav NIKEZIĆ<sup>5</sup>**

- 1) *University of Belgrade, Institute of Nuclear Sciences „Vinča“, Belgrade, Serbia, [icelikovic@vin.bg.ac.rs](mailto:icelikovic@vin.bg.ac.rs)*
- 2) *Serbian Institute of Occupational Health „Dr Dragomir Karajović“, Belgrade, Serbia, [s.vesna.a@gmail.com](mailto:s.vesna.a@gmail.com)*
- 3) *University of Novi Sad, Department of Physics, Faculty of Sciences, Novi Sad, Serbia, [sofija@df.uns.ac.rs](mailto:sofija@df.uns.ac.rs)*
- 4) *University of Belgrade, Institute of Physics, Belgrade, Serbia, [udovicic@ipb.ac.rs](mailto:udovicic@ipb.ac.rs)*
- 5) *University of Kragujevac, Faculty of Science, Kragujevac, Serbia, [nikezic@kg.ac.rs](mailto:nikezic@kg.ac.rs)*

### ABSTRACT

Radon is natural radioactive gas. It is colourless, tasteless, odourless and therefore it cannot be detected by human senses, but should be measured. It was discovered at the beginning of XX century. At that time, high radon concentrations were measured in the Bohemian silver mines. However it took four decades before a connection between high radon concentration and lung cancer was assumed and one decade more to link radon progeny as a possible cause of lung cancer. Numerous epidemiological studies have shown that radon with its progeny represents second cause of lung cancer after smoking. The importance of investigation of radon and its progeny was acknowledged at the very beginning of Symposiums of Yugoslav society of radiation protection. Thus, already at the first Symposium, held in 1963, there were already several papers published regarding radon concentration measurements in mines and spas. In the first few proceeding of the Symposium the main contribution was from Serbian Institute of Occupational Health.

In this publication, an overview of research on radon, published in previous 29 Proceedings of symposiums of Radiation Protection Society, was given. Evolution of actuality of different radon topics was discussed and overview of used measurement techniques was given. Finally, it was estimated in which directions development of radon topics might go.



## METRORADON- ПРОЈЕКАТ ЗА УНАПРЕЂЕЊЕ МЕРЕЊА РАДОНА У ЕВРОПИ

Гордана ПАНТЕЛИЋ, Милош ЖИВАНОВИЋ, Игор ЧЕЛИКОВИЋ,  
Јелена КРНЕТА НИКОЛИЋ и Ивана ВУКАНАЦ

Универзитет у Београду, Институт за нуклеарне науке „Винча“, Београд,  
Србија, [pantelic@vinca.rs](mailto:pantelic@vinca.rs), [milosz@vinca.rs](mailto:milosz@vinca.rs), [icelikovic@vinca.rs](mailto:icelikovic@vinca.rs), [jnikolic@vinca.rs](mailto:jnikolic@vinca.rs), [vukanac@vinca.rs](mailto:vukanac@vinca.rs)

### САДРЖАЈ

Трогодишњи пројекат MetroRADON у оквиру програма EMPIR је фокусиран на следљивост мерења ниске концентрације радона и доприноси стварању координиране метролошке инфраструктуре за мониторинг радона у Европи као и хармонизацији методологија мерења. Циљеви пројекта су да се обезбеди метролошка следљивост калибрације инструмената на ниским концентрацијама са мерном несигурношћу мањом од 5%, да се испита утицај торона и његових потомака на мерење концентрације радона, да се упореде процедуре мерења концентрације радона и брзине ексхалације радона из земљишта у различитим државама у Европи, да се развију методе идентификације области са повећаном концентрацијом радона, да се све ове методе валидују и да се олакша коришћење технологије и мерне инфраструктуре коју је развио пројекат од стране крајњих корисника. У овом раду ће бити дат преглед циљева и досадасњих резултата пројекта.

### 1. Увод

Пројекат MetroRADON у оквиру програма EMPIR (European Metrology Programme for Innovation and Research - Европски метролошки програм за иновације и истраживање) окупља седамнаест европских партнера из националних метролошких института и истраживачких института, укључујући Институт за нуклеарне науке "Винча". Пројекат је фокусиран на следљивост мерења ниске концентрације радона и допринеће стварању координисане метролошке инфраструктуре за мерење концентрације радона у Европи.

Специфични циљеви пројекта су:

- развити нове процедуре за следљиву калибрацију инструмената за мерење радона ( $^{222}\text{Rn}$ ) у нижем опсегу концентрација радона ( $100 \text{ Bq/m}^3$  до  $300 \text{ Bq/m}^3$ ) са мерном несигурношћу  $\leq 5\%$  ( $k=1$ );
- испитати и смањити утицај торона ( $^{220}\text{Rn}$ ) и његових потомака на мерење радона и калибрацију уређаја за мерење;
- упоредити постојеће процедуре за мерење концентрације радона у различитим земљама Европе, хармонизовати и оптимизовати мерења радона у затвореном простору и брзине ексхалације радона из земљишта;
- Анализирати и развити методологију за идентификацију области са повишеним концентрацијама радона (*radon priority areas*), развити концепт радонског



- хазард индекса (*Rn Hazard Index*) и испитати везу између брзине ексхалације радона из земљишта и концентрације радона у затвореном простору;
- Валидовати следљивост постојећих европских лабораторија за еталонирање и публиковати упутства и препоруке за калибрацију и мерење концентрације радона у ваздуху;
- Стварање технологије и координиране метролошке инфраструктуре до крајњих корисника (законодаваца, регулаторних тела и политичара), организација које развијају стандарде и оних који обезбеђују мерења (акредитоване лабораторије, произвођачи инструмената).

## 2. Следљиве калибрације мерила концентрације радона у ваздуху

На основу ЕУРАТОМ директиве, државе потписнице су у обавези да направе државни акциони план за радон. У оквиру овог акционог плана, посебну пажњу треба посветити одређеним аспектима спровођења националне кампање у животним и радним просторијама [1]. Свако мерење, па тако и мерења која се спроводе у оквиру националне кампање мерења радона, подразумева поуздану калибрацију инструмената. Да би се испунили захтеви нове ЕУРАТОМ директиве, потребно је обезбедити калибрације у нижем опсегу концентрација радона, од око  $100 \text{ Bq/m}^3$  до  $300 \text{ Bq/m}^3$ . Калибрација инструмената за мерење ниских активности радона захтева значајна побољшања лабораторијске инфраструктуре у Европи.

Следљивост калибрације инструмената, па самим тим и мерења активности радона до националних и међународних еталона се постиже употребом било референтне атмосфере (примарни еталон), било једног или више референтних инструмената (секундарни еталони). Следљивост је, дакле, један од првих услова у контроли и осигурању квалитета мерења који мора бити испуњен.

Лабораторије сараднице у пројекту MetroRADON су развиле нове радиоактивне референтне изворе радона који имају стабилну и познату брзину еманације [3]. Циљ прављења ових нових радиоактивних референтних извора је постизање референтних поља за мерење концентрације радона у ваздуху. Ови извори су мање комплексни, јефтинији и омогућиће лабораторијама да лакше успоставе систем за калибрацију својих инструмената.

Поред овога, конструисано је ново постројење за калибрацију које се налази у Румунији. Идеја за изградњу овог објекта је била да се осигура међународна и национална метролошка следљивост у мерењу  $^{222}\text{Rn}$  у ваздуху [2].

## 3. Утицај торона и његових потомака на мерење радона и радонску калибрацију

Циљ овог радног пакета је да се испита и смањи утицај торона и његових продуката на мерење концентрације радона, као и на саму радонску калибрацију. У бројним студијама се испитивао утицај торона на концентрацију радона и утврђено је да тај утицај варира од 0,4% - 74% за траг детекторе док је код радонских детектора базираних на јонизационим коморама, тај утицај од 4% до 66% [4, 5]. Један од првих задатака у оквиру овог радног пакета је био да се изврши детаљан преглед постојеће литературе како би се добио преглед постојећих техника и карактеристике материјала (пермеабилност, дифузиони коефи-

цијент и сл), који би помогли да се оптимизује методологија у циљу смањења утицаја торона на радонска мерења [6].

Три референтне торонске атмосфере, са ниском, средњом и високом концентрацијом торона су успостављене у референтној комори за калибрацију уређаја. Због кратког периода полураспада торона и последично мале дифузионе дужине, пре саме калибрације инструмената испитивана је хомогеност концентрације торона унутар коморе [7].

Калибрисани инструменти су се потом користили и користе се за испитивање утицаја торона на мерење радона у радонским коморама чисто радонском или мешаном радонско/торонском атмосфером. Могуће је пратити одзив инструмената у широком температурском опсегу од  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Испитивања се врше на великом броју различитих активних и пасивних радонских детектора који се користе у Европи, како би се разумео и евентуално кориговао утицај торона на радонске детекторе. Преглед литературе је дао добру полазну тачку за експериментална испитивања дифузионих баријера за торон, интерференцију између радона и торона, пермеабилност радона као и транспортне особине радона на различитим температурама. Испитивања су у току, а њихови резултати би требало да обезбеде важну и неопходну информацију како ограничити утицај торона на радонско мерење [8].

#### 4. Методологије мерења радона у Европи

Према европском стандарду EU-BSS [1] све земље чланице дужне су да сачине радонски акциони план, као и да информације о нивоима концентрације радона буду доступне становништву. У складу са тим, у многим земљама су отпочели национални програми мерења радона, као што је случај и код нас. Земље које нису чланице ЕУ управљају се према IAEA BSS и у складу са IAEA упутствима о извођењу програма мерења радона [9]. 2005. године објављен је први преглед кампања мерења радона у Европи [10]. Један од задатака пројекта MetroRADON било је и ажурирање овог извештаја. Преглед литературе, резултата кампања мерења концентрације радона у затвореном простору у 45 европских земаља, објављен је у виду JRC Technical Report (Joint Research Centre of the European Commission) [11].

Преглед литературе обухватио је како међународне часописе, тако и радове саопштене на међународним и националним конференцијама. Током прегледа радова вођено је рачуна о различитим аспектима кампања чији су резултати саопштени, почев од дизајна и циља саме кампање, стратегије и начина узорковања, репрезентивности, техника мерења, обраде резултата и њихове интерпретације, утицаја торона па до контроле квалитета. За сваку „испитивану“ државу најкарактеристичнији детаљи кампање мерења радона су унети у објављени JRC извештај [11].

Методологије мерења радона разликовале су се толико да је било немогуће идентификовати две потпуно исте. Ова разноликост умногоме отежава било каква поређења различитих кампања, а самим тим и представљање ових резултата на јединственој радонској мапи Европе чини веома захтевним подухватом. Резултати прегледа, дати у JRC извештају [11], требало би да послуже као смернице ка хармонизацији радонских кампања, као и до сада доступних резултата.

Једна од активности у MetroRADON пројекту била је и преглед литературе о мерењима геогеног радона (*geogenic radon*) у Европи. Преглед је обухватио

радове у међународним часописима, радове са конференција, као и неке од цитираних радова у њима. Резултати и закључци овог прегледа дати су у посебном извештају [12]. Кључне тачке у овом извештају односиле су се на концепте геогеног радонског потенцијала, повезаности различитих параметара коришћених за процену геогеног радонског потенцијала, просторну дистрибуцију радона у Европи, као и на коришћене методе и мерну инструментацију. Закључено је и да се методологија мерења геогеног радона разликује од мерења радона у затвореном простору.

Мапе геогеног радона могу да послуже за дефинисање/идентификацију области са повишеним концентрацијама радона – *radon priority area*.

Да би се прикупиле недостајуће информације након прегледа литературе, као и да би се стекао увид у то како држава планира имплементацију EU-BSS стандарда у националну легислативу, припремљена су два упитника. Један се односи на кампање мерења радона у затвореном простору, док је други у вези са мерењима геогеног радона. Упитници су упућени надлежним институцијама у ЕУ земљама, а резултати анкетирања ће бити поређени са подацима добијеним прегледом литературе у циљу идентификовања могућих разлика и неконзистентности.

## 5. Радонска приоритетна област

Европска комисија је донела закон EU-BSS који у члану 103 обавезује земље чланице, као и земље у процесу придруживања Европској унији да идентификују области у којима се очекује да концентрација радона у значајном броју објеката прелази национални референтни ниво. Оваква област се назива „радонска приоритетна област“ (*radon priority area – RPA*) [13]. С обзиром да идентификација неке области као RPA може имати бројне политичке и економске ефекте, као што су мандаторна мерења радона у радном простору, превентивне мере и сл., овако дефинисана RPA дозвољава различиту интерпретацију, различит концепт и методологију за њену идентификацију унутар држава чланица Европске Уније [14].

У циљу хармонизације постојећих методологија за идентификацију радонске приоритетне области, извршен је детаљни преглед литературе из које су извлачени, а потом и оцењивани различити концепти и дефиниције RPA. Како би се процениле постојеће технике мапирања, вршено је тест мапирање на основу података из две области: Кантабрије у Шпанији и шест општина у Аустрији. Сваки од учесника је користио своје методе мапирања и дефиниције RPA и на крају је процењена метода сваког од учесника, као и до које мере се методе коришћене у једној земљи за одређену сврху, могу применити на податке из друге земље [15].

Радонске приоритетне области се не процењују искључиво на основу измерене концентрације радона у затвореним просторијама, већ се неретко процењују и другим величинама као што је радон у земљи, геогени радонски потенцијал... Будући да по BSS једино постоји директна веза између референтне националне вредности и радона у затвореним просторијама, једна од активности овог радног пакета је утврђивање везе између радона у затвореним просторијама и геогеног радона. Извршена је детаљна анализа постојеће литературе како би се одредиле статистичке везе и корелације између радона у затвореним просторијама и помоћних варијабли за процену RPA. С обзиром на велики број параметара који утиче на концентрацију радона у затвореним просторијама, односно на процену

концентрације радона у некој области, могуће је извршити погрешну класификацију неке области у радонску приоритетну или не-приоритетну област. Извршен је детаљан опис параметара који могу да утичу на грешку класификације неке зоне [16]. Важан задатак унутар овог пакета је развој новог концепта: радонског хазард индекса “*Rn hazard index*” (RHI) који би требало да обезбеди универзални алат да се квантификује остљивост неке области на геогени радон и стога да се квантификује ниво „приоритетности“ одређене регије без обзира на расположиве податке и неконзистентност дефиниција RPA у различитим државама.

### **6. Валидација следљивости Европских радонских лабораторија за еталонирање**

Следљивост је од кључне важности за обезбеђење квалитета сваког мерења. У оквиру пројекта MetroRADON је спроведена анкета са циљем идентификације постојећих европских лабораторија за еталонирање и постојећих примарних стандарда. Други циљ анкете је био да се утврде мерне могућности радонских лабораторија. У анкети су се нашла питања о националним стандардима, референтној атмосфери, радонским коморама, инструментима коришћеним за мерење концентрације радона, процедурама еталонирања и следљивости мерења. Одговори су између осталог искоришћени да се одреде лабораторије које испуњавају услове да би биле позване за учешће у MetroRADON интеркомпарацији, која служи да се валидира следљивост мерења и да се обезбеди поверење у резултате еталонирања европских лабораторија. Циљ који се поставља за мерење концентрације активности  $^{222}\text{Rn}$  у ваздуху је мерење са мерном несигурношћу од 5% ( $\kappa = 1$ ).

Интеркомпарација је започела у мају 2018. године и односи се на опсег концентрација радона од  $300 \text{ Bq/m}^3$  to  $10\,000 \text{ Bq/m}^3$  [17]. Резултати интеркомпарације ће допринети хармонизацији метрологије за мерење радона и обезбедиће важне закључке о тренутном стању метролошке инфраструктуре и перформанса појединих лабораторија. Још један резултат ће бити документ који ће дати препоруке за калибрације и мерење концентрације радона у ваздуху, а чије је публикавање планирано за 2020. годину.

### **7. Утицајност пројекта**

Преглед литературе везан за систематско мерење радона у европском земљама је показао да нису све земље, иако јесте велики број њих, мерењима покриле целокупну територију државе. Такође, методологије коришћене при планирању систематског мерења, избор локација и метод мерења су толико разноврсни да је понекад немогуће поредити резултате различитих држава и сакупљање свих података у мапу Европе. Да би резултати мерења радона били поуздани, потребно је да су Лабораторије способне да продукују резултате адекватног квалитета. Потреба за резултатима униформисаним на нивоу целе Европе, дакле, захтева примену програма контроле квалитета, хармонизацију критеријума, процедура узорковања, рачунања и пријављивања резултата, по угледу на међународне стандарде.

Стога је очигледна потреба да се направи уноформна методологија за националне програме мерења радона која би дала резултате погодне за прављење једне свеобухватне мапе радона у Европи.

Највећи допринос пројекта MetroRADON је управо постизање свих ових наведених циљева. То се постиже кроз стварање координиране метролошке структуре за мониторинг радона у Европи, дефинисање нових процедура, установа и еталона за следљиву калибрацију инструмената, боље разумевање утицаја торона и његових потомака на мерење радона и калибрацију инструмената, хармонизацију мерења радона у затвореним просторијама и мерења ексхалације радона из земљишта, увођење јединствене методологије за одређивање подручја са високом концентрацијом радона и дефинисање правила и упутстава за мониторинг радона.

## 8. Закључак

MetroRADON пројекат ће умногоме допринети успостављању координисане метролошке инфраструктуре у области мерења радона у Европи и због тога је веома значајан за Србију. Резултати који се очекују су следећи:

- нова процедура следљиве калибрације инструментације за мерење ниских концентрација радона ( $100 \text{ Bq/m}^3$  -  $300 \text{ Bq/m}^3$ ) са релативном несигурношћу мањом од 5% ( $\kappa=1$ ),
- нов референтни материјал са познатом брзином еманације радона,
- боље познавање утицаја торона и његових потомака на мерење радона и калибрацију уређаја,
- хармонизација и оптимизација методологија мерења радона у затвореном простору и мерења ексхалације из земљишта у Европи,
- методологија идентификовања области са повишеним концентрацијама радона – *radon priority areas*, и утврђивање корелације између концентрације радона у затвореном простору и ексхалације радона из земљишта,
- побољшани стандарди и препоруке за мониторинг радона.

У циљу упознавања научне заједнице, регулаторних тела и других заинтересованих страна са радом на пројекту MetroRADON, актуелни резултати пројекта и статус започетих и планираних активности објављују се на сваких шест месеци и доступни су на интернет страници [www.metroradon.eu](http://www.metroradon.eu).

## 9. Захвалница

Овај рад је финансијски подржан од старне European Metrology Programme for Innovation and Research (EMPIR), JRP-Contract 16ENV10 MetroRADON ([www.euramet.org](http://www.euramet.org)) и од стране Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије (пројекти P171018 и III43009).

## 10. Литература

- [1] European Council (EC). Council Directive 2013/59/Euratom laying down basic safety standards for protection against the dangers arising from exposure to ionising radiation. *Off. J. Eur. Union L13*; 57, 2014.
- [2] A. Luca, L. Şerbina, C. Varlam, M. Sahagia, D. Schitea, I. Făurescu, O. Sima, M.R. Ioan, A. Antohe, C. Teodorescu, V. Bătrîneanu, C. Ivan, L. Teodorescu.

- Designing and construction of a new radon calibration facility in Romania. *5<sup>th</sup> European Congress of the International Radiation Protection Association (IRPA)*, 4-8 June 2018, The Hague, The Netherlands; 2018.
- [3] F. Mertes, S. Röttger, A. Röttger. Towards new primary emanation sources for Rn-222. *5<sup>th</sup> European Congress of the International Radiation Protection Association (IRPA)*, 4-8 June 2018, The Hague, The Netherlands; 2018.
- [4] S. Tokonami, M. Yang, T. Sanada. Contribution from thoron on the response of passive radon detectors. *Health Phys.* 80(6), 2001, 612-615.
- [5] F. Bochicchio, M. Ampollini, L. Tommasino, A. Sorimachi, S. Tokonami, Sensitivity to thoron of an SSNTD-based passive radon measuring device: Experimental evaluation and implications for radon concentration measurements and risk assessment. *Radiat. Meas.* 44(9-10), 2009, 1024-1027
- [6] <http://metroradon.eu/wp-content/uploads/2018/07/Review-techniques-to-reduce-influence-of-thoron.pdf>.
- [7] K. Mitev et al., Methods for experimental study of homogeneity in <sup>220</sup>Rn calibrations, (in preparation).
- [8] *MetroRadon*, Internal report.
- [9] International Atomic Energy Agency (IAEA). *Radiation protection and safety of radiation sources: International basic safety standards Interim edition*. General safety requirements, Part 3. Vienna: IAEA; 2011.
- [10] G. Dubois. An overview of radon surveys in Europe (Report EUR21892., EC, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg); 2005.
- [11] G. Pantelić, I. Čeliković, M. Živanović, I. Vukanac, J.K. Nikolić, G. Cinelli, V. Gruber. Literature review of Indoor radon surveys in Europe, Publications Office of the European Union, Luxembourg, ISBN 978-92-79-97643-8 (online), doi:10.2760/977726 (online), JRC114370, 2018.
- [12] <http://metroradon.eu/wp-content/uploads/2018/07/Geogenic-radon-potential-short-overview.pdf>.
- [13] European Council (EC). Council Directive 2013/59/Euratom laying down basic safety standards for protection against the dangers arising from exposure to ionising radiation. *Off J Eur Union* 2014; L13:57.
- [14] P. Bossew. Radon Priority Areas – Definition, Estimation and Uncertainty, *Nucl. Techn. Radiat. Prot.* 33, 3; 2018. p. 286-292.
- [15] V. Gruber, S. Baumann, W. Ringer, C. Sainz, L. Quindós-Poncela, G. Cinelli, J-L Gutiérrez Villanueva. A radon mapping exercise within the European MetroRadon project. *14th International Workshop on the Geological Aspects of Radon Risk Mapping- GARRM*, Prague, September 2018.
- [16] I. Čeliković, G. Pantelić, M. Živanović, I. Vukanac, J. Krneta Nikolić. Neodredjenost klasifikacije radonskih zona. *Zbornik radova XXX Simpozijuma DZZSCG*, Divčibare, 2. - 4. 10. 2019.
- [17] [http://metroradon.eu/wp-content/uploads/2018/07/Newsletter\\_July\\_2018.pdf](http://metroradon.eu/wp-content/uploads/2018/07/Newsletter_July_2018.pdf).



## **METRORADON- PROJECT FOR RADON MEASUREMENT IMPROVEMENT IN EUROPE**

**Gordana PANTELIĆ, Miloš ŽIVANOVIĆ, Igor ĆELIKOVIĆ,  
Jelena KRNETA NIKOLIĆ and Ivana VUKANAC**

*University of Belgrade, Vinča Institute of Nuclear Sciences, Belgrade, Serbia,  
[pantelic@vinca.rs](mailto:pantelic@vinca.rs), [milosz@vinca.rs](mailto:milosz@vinca.rs), [icelikovic@vinca.rs](mailto:icelikovic@vinca.rs), [jnikolic@vinca.rs](mailto:jnikolic@vinca.rs),  
[vukanac@vinca.rs](mailto:vukanac@vinca.rs)*

### **ABSTRACT**

MetroRADON, a three year project based in the EMPIR program, is focused on traceability of low activity radon measurement. It contributes to the creation of the coordinated metrological infrastructure for radon monitoring in Europe, as well as the harmonization of measurement strategy and methodology. The objectives of this project is to secure the metrological traceability of the instrument calibration for the measurement of low activity, with the measurement uncertainty that does not exceed 5%, to investigate the influence of thoron and its progenies on the radon concentration measurements, to compare procedures for measurement of indoor radon concentration and exhalation rate from the soil in different European countries, to develop methods for recognizing the radon priority areas and finally to validate these methods, but at the same time to enable the access of the final users to the measurement technology and infrastructure developed within this project. This paper presents the overview of these objectives and the results achieved in the present time.



## IZVORI NESIGURNOSTI PRI KLASIFIKACIJI RADONSKIH ZONA

Igor ČELIKOVIĆ, Gordana PANTELIĆ, Miloš ŽIVANOVIĆ,  
Ivana VUKANAC i Jelena KRNETA NIKOLIĆ

*Institut za nuklearne nauke "Vinča", Univerzitet u Beogradu, Beograd, Srbija,  
icelikovic@vinca.rs, pantelic@vinca.rs, milosz@vinca.rs, vukanac@vinca.rs,  
jnikolic@vinca.rs*

### SADRŽAJ

*Evropski savet je doneo direktivu 2013/59/EURATOM (EU-BSS) po kojoj se nalaže državama članicama EU da imaju ustanovljen radonski akcioni plan, što između ostalog podrazumeva i identifikaciju radonskih prioriternih zona (Radon priority areas), odnosno zona sa različitim nivoom „prioriteta“. S obzirom da je neizvodljivo vršiti merenja radona u svakoj kući, potrebno je dizajnirati prospekciju radona kako bi se dobila reprezentativna procena srednje godišnje koncentracije radona u zatvorenim prostorijama na određenoj teritoriji. Nije bitan samo reprezentativan izbor kuća, nego je i nesigurnost merenja i procene srednje godišnje koncentracije potrebno držati što je niže moguće. Nesigurnostn klasifikacije zone određenog prioriteta u nekoj oblasti je stoga kombinacija nesigurnosti pojedinačnog merenja i ekstrapolacije tog merenja na celu oblast. U ovom radu ćemo pokušati da nabrojimo i procenimo izvore nesigurnosti pri klasifikaciji i damo preporuke u cilju smanjenja stepena nesigurnosti. Ovaj rad je urađen u sklopu MetroRadon projekta.*

### 1. Uvod

Evropski savet je 2013 godine doneo direktivu 2013/59/EUROATOM vezanu za zaštitu od zračenja (European Union Basic Safety Standard: EU-BSS) [1]. U okviru ove direktive, 3 člana se odnose na radon: član 45 – radon na radnim mestima, član 74 – radon u zatvorenim prostorijama i član 103 – akcioni plan za radon. Takođe, Aneks XVIII pobliže popisuje šta sve treba da se uzme u obzir pri pravljenju akcionog plana. Član 103 ove Direktive obavezuje države članice, kao i njene pristupne članice da imaju identifikovane radonske prioritne oblasti (Radon priority areas – RPA) koji se definišu kao oblasti u kojima se očekuje da koncentracija radona u značajnom broju objekata prevazilazi relevantni nacionalni referentni nivo [1].

Budući da identifikacija neke zone kao RPA povlači brojne obaveze, kao što merenje svih radnih mesta koja se nalaze u prizemlju, da se identifikuju stambeni objekti u kojima koncentracija radona prelazi referentnu vrednost, sama definicija RPA je osetljive političke prirode i ostavljeno je državama članicama da je pobliže definišu [2]. S obzirom da nije izvodivo vršiti merenje radona u svakom objektu, potrebno je pažljivo dizajnirati prospekciju radona kako bi se dobila reprezentativna vrednost srednje godišnje koncentracije radona u zatvorenim prostorijama. Nedavno je dat kvalitativni pregled nacionalnih programa merenja radona u Evropi koji je pokazao vrlo heterogen pristup pri realizaciji nacionalnih programa merenja radona [3]. Nacionalni

programi merenja radona se ne razlikuju samo po načinu izbora objekata, već i po tehnikama merenja, dužini merenja, analizi rezultata itd. Sve to dovodi do nesigurnosti pri klasifikacije zone određenog prioriteta koja zavisi od kombinovane nesigurnosti pojedinačnog merenja i nesigurnosti ekstrapolacije tog merenja na celu oblast.

## 2. Pogrešna klasifikacija radonske zone

Svrstavanjem nekog regiona u određenu klasu, postoji određena verovatnoća da se izvrši pogrešna klasifikacija. S obzirom na značajne ekonomske efekte, a vezane za zdravlje ljudi, koje pogrešna klasifikacija može da donese, potrebno je izvršiti što pouzdaniju klasifikaciju regiona. U suprotnom, može doći do generisanja dva tipa grešaka: greške prve i druge vrste [4]. Kod „greške prve vrste“ pretpostavlja se da određena regija pripada RPA, dok ona ustvari ne pripada RPA. Sa stanovišta zaštite od zračenja ova greška je manje značajna. S druge strane, kod „greške druge vrste“ određena regija se klasifikuje kao regija nižeg „radonskog prioriteta“ dok ona ustvari pripada višoj klasi, odnosno RPA. Ovu vrstu greške bi trebalo držati što je moguće nižom [4].

Mogu se razlikovati 4 vrste izvora greške klasifikacije:

- Nesigurnost pojedinačnog merenja: direktnog merenja radona u zatvorenim prostorijama
- Nesigurnost prostorne raspodele radona na osnovu koje se određuje nivo „prioriteta“ neke oblasti
- Nesigurnost procene koncentracije radona u zatvorenim prostorijama used korišćenja proksi varijabli: veličine koje se koriste da bi se procenio radon u zatvorenim prostorijama (npr. koncentracija  $^{226}\text{Ra}$  u zemlji, geogeni potencijal)
- Nesigurnost modela kojim se direktno izmerene ili procenjene koncentracije radona ekstrapoliraju na ceo region

Neki od osnovnih izvora nesigurnosti klasifikacije su dati u sledećim poglavljima kao i predozi kako ih minimizovati.

## 3. Nesigurnost pojedinačnog merenja

Postoje 3 glavna izvora radona u zatvorenim prostorijama. Najdominantniji izvor je zemljište ispod objekta, potom građevinski materijal i konačno izvor vode. U cilju pojednostavljenja analize, pretpostavljamo da je ekshalacija radona iz zemljišta i građevinskog materijala konstanta, dok se zanemaruje koncentracija radona oslobođena iz vode. Time se dobija jednostavna diferencijalna jednačina koja opisuje koncentraciju radona u zatvorenim prostorijama:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = u_s + \frac{e_B S_B}{V} - (\lambda + \lambda_V)C + \lambda_V C_{van} \quad (1)$$

gde su:  $C$  – koncentracija radona u zatvorenoj prostoriji u vremenu  $t$ ,  $u_s$  – zapreminska brzina ulaska radona iz zemlje,  $e_B$  – površinska brzina ekshalacije,  $S_B$  – površina građevinskog materijala,  $V$  – zapremina prostorije,  $\lambda$  – konstanta raspada radona,  $\lambda_V$  – brzina ventilacije i  $C_{van}$  – spoljašnja koncentracija radona.

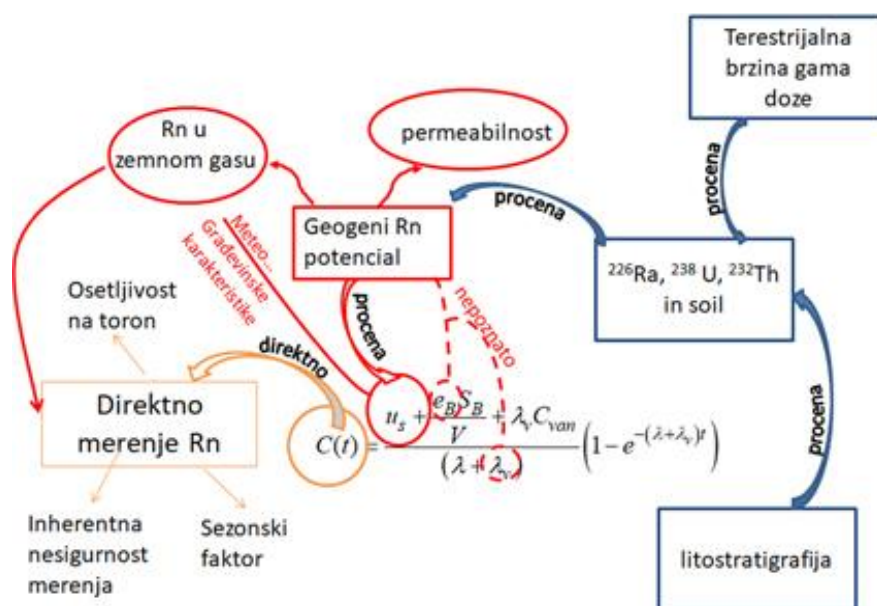
Rešenje ove pojednostavljene jednačine je dato sledećim izrazom:

$$C(t) = \frac{u_s + \frac{e_B S_B}{V} + \lambda_v C_{van}}{(\lambda + \lambda_v)} (1 - e^{-(\lambda + \lambda_v)t}) \quad (2)$$

gde prvi član opisuje doprinos iz zemlje, drugi iz građevinskog materijala, a treći iz spoljašnjeg vazduha.

Što se indirektnije meri ili procenjuje koncentracija radona u zatvorenoj prostoriji to će biti veća nesigurnost koncentracije radona, što za posledicu ima povećanu nesigurnost pri klasifikaciji radonske zone.

Na slici 1. su shematski prikazane merene veličine za procenu srednje godišnje vrednosti radona u zatvorenoj prostoriji zajedno sa dominantnim izvorom merne nesigurnosti.



**Slika 1. Merena veličina za procenu srednje godišnje vrednosti radona u zatvorenoj prostoriji zajedno sa dominantnim izvorom merne nesigurnosti.**

Najmanja nesigurnost pri određivanju srednje godišnje koncentracije radona se dobija merenjem koncentracije radona u trajanju od godinu dana. Ukoliko je merenje izvršeno u kraćem periodu, potrebno je korigovati izmerenu vrednost sezonskim faktorom, što povećava mernu nesigurnost. Detektori koji konstrukciono nisu dobro dizajnirani i imaju nezanemarljivu osetljivost na toron i potomke, unose dodatnu nesigurnost. Kod indirektnih tehnika merenja odnosno procene koncentracije radona, kod kojih se mere sekundarne veličine (radon u zemlji, geogeni radonski potencijal, sadržaj radionuklida u zemljištu...) nesigurnost procene koncentracije radona je još veća i vrlo ju je teško proceniti.

### **Merna nesigurnost radonskih detektora**

Postoji veliki broj tipova radonskih detektora, od kojih su najčešće u upotrebi: nuklearni trag detektori, detektori sa aktivnim ugljem i aktivni detektori, koji se opet razlikuju po svojoj konstrukciji i načinima detekcije. Tipične merne nesigurnosti ovih uređaja su: oko 10% za aktivne uređaje [5], od 10 – 23% za ugljene kanistre [5], mada njihova

merna nesigurnost mođe da ide i do 70% [6], dok je za nuklearne trag detektore merna nesigurnost reda 10 – 25% [5]. Dužina merenja aktivnim uređajima je reda sati, ugljenim kanistrima je reda dana, dok je za nuklearne trag detektore dužina merenja tipično reda nekoliko meseci do godinu dana. Stoga, ukoliko je cilj da se dobije srednja godišnja koncentracija radona, najpogodnija tehnika bi bila korišćenjem trag detektora, koji su pored toga veoma jeftini i jednostavni za upotrebu.

#### *Nesigurnost usled osetljivosti na toron*

Konstrukciono postoji veliki broj različitih difuzionih komora, od kojih neke imaju značajnu osetljivost na toron. Problem je pogotovo izražen kod starijih modela kad se nije posebno vodilo računa o osetljivosti na toron. Relativna osetljivost na toron, pretpostavljajući da je osetljivost na radon 1, je najizraženija kod sledećih detektora [7, 8]: 0,78 za Kfk detektore (Nemačka, 1981), 0,68 za RadTrak detektore (SAD, 1991), 0,05 za NRPB/SSI. Korišćenje difuzionih komora osetljivih na toron će za posledicu imati precenjivanje koncentracije radona u zatvorenim objektima. Uticaj koji potiče od torona je moguće smanjiti postavljanjem detektora na dovoljnu udaljenost od zida, korišćenjem detektora s što manjom osetljivošću na toron ili još bolje korišćenjem diskriminativnih detektora za radon i toron čime bi se dobile koncentracije oba izotopa.

#### *Nesigurnost usled vremenskih varijacija radona*

Uočena je varijacija radona sa vremenom. Grubo govoreći, dva tipa vremenskih varijacija se može uočiti: a) Dnevna varijacija kod koje je koncentracija radona veća tokom noći i rano ujutro dok opada tokom dana i b) Sezonska varijacija kod koje je koncentracija radona veća za vreme grejne sezone nego van nje.

Merenje mora biti dovoljno dugo da bi se usrednjile ove varijacije. U slučaju kad je merenje kraće od godinu dana, potrebno je izvršiti odgovarajuće sezonske korekcije. Sezonski faktori mogu znatno da variraju od regiona do regiona kao i od tipa objekta, pa su time izvor velike nesigurnosti pri proceni srednje godišnje koncentracije radona. Ekstremne varijacije sezonskih faktora tabelarno su pokazane na dva primera mernih kampanja u Srbiji. U slučaju nacionalne kampanje merenja radona u Srbiji [9], sezonski faktor se proračunao kao odnos srednje godišnje koncentracije radona i šestomesečne koncentracije radona merene u grejnoj sezoni, dok je sezonski faktor u Niškoj Banji proračunat za 3 letnja meseca [10].

**Tabela 1. Sezonski faktori u dve merne kampanje u Srbiji.**

<b>Merna kampanja</b>	<b>Vrednost</b>	<b>Standardna devijacija</b>	<b>Opseg varijacija</b>
Nacionalna	0,83	0,32	0,52 - 1,4
Niška Banja	2,7	1,2	1,1 – 6,0

Dati primeri jasno pokazuju količinu varijacije sezonskog faktora, pa korišćenje neodgovarajuće vrednosti sezonskog faktora može dovesti do velikog potcenjivanja ili precenjivanja srednje godišnje koncentracije radona.

U cilju smanjenja neodređenosti koja potiče usled primene sezonskog faktora, najbolje bi bilo vršiti godišnje merenje koncentracije radona, a ukoliko to nije moguće da se koriste „regionalni“ sezonski faktori, pri čemu svi objekti treba da odgovaraju jednoj distribuciji.

### *Nesigurnost usled brzine izmene vazduha*

Brzina izmene vazduha u objektu zavisi od klimatskih uslova, karakteristike građevine, kao i ljudskih navika. Tipične vrednosti brzine izmene vazduha su od 0,2 do 2 h<sup>-1</sup>, dok je srednja vrednost 0,63 h<sup>-1</sup>.

Pitanje brzine izmene vazduha postaje od posebnog značaja u sadašnjoj eri jer se u građevinskom inženjerstvu sve više primenjuje koncept energetske efikasnosti domova. Novi prozori koji bolje prijanjaju, a materijali sa boljom temperaturnom izolacijom dovode do smanjenja brzine ventilacije, čime dovode do povećanja koncentracije u unutrašnjim prostorijama [11].

#### **4. Nesigurnost procene koncentracije radona u zatvorenim prostorijama usred korišćenja proksi varijabli**

Iako je glavni izvor radona, zemlja ispod objekta, koncentracija radona u tolikoj meri varira usled antropogenih faktora, klime i meteoroloških uslova da u norveškim preporukama za merenje radona stoji da se indirektna merenja kao što su merenje radona u gasu u zemlji, sadržaj radionuklida u zemljištu i sl., ne mogu koristiti za procenu da li je potrebno vršiti saniranje objekta od visoke koncentracije radona.

Uvedena je veličina, geogeni radonski potencijal (GRP), kao mera procene rizika koji potiče od geologije, nezavisno od antropogenih faktora. Geogeni radonski potencijal je izveden od dve veličine: koncentracije radona u zemlji i permeabilnosti zemljišta i dobija se trenutnim merenjem ove dve veličine. Merena je varijacija GRP tokom godine i pokazalo se da je GRP mnogo manje zavisi od meteoroloških uslova (sadržaja vode u zemlji) od radona u zemlji.

Sa GRP kao sekundarnom veličinom za procenu koncentracije radona se jedino može do izvesne mere proceniti zapreminska brzina ulaska radona u prostoriju, dok ne pruža nikakvu informaciju o brzini ekshalacije iz građevinskog materijala i brzini izmene vazduha.

Veoma je teško proceniti vezu između radona u prostoriji i geogenog radona i kvantifikovati njihovu nesigurnost zbog faktora koji su dominantno antropogenog porekla kao što su: tip građevine (urbana, ruralna, kuća, stan, prisustvo podruma) kvalitet građevine (različit u različitim regionima, zavisi od imućnosti stanovništva), životne navike...

Ukoliko je pomoćna varijabla sadržaj urana ili radijuma u zemlji, neodređenost procene će biti još veća, budući da postoje dodatni faktori koji utiču na vezu sa GRP, kao što su faktor emanacije, poroznost, količine vode u zemljištu, a koji nisu poznati.

Još indirektniji metod koji se koristi je litostratigrafski kod kojeg bi se količina radona u prostorijama procenjivala na osnovu litologije kod koje se procenjuje koncentracija radijuma, a onda bi se redom procenjivali geogeni radonski potencijal, pa odatle zapreminska brzina ulaska i konačno sama koncentracija radona.

#### **5. Nesigurnost klasifikacije (procene koncentracije radona) u nekom regionu**

Konačno sa merenjem/procenom srednje godišnje koncentracije radona u određenom broju objekata, potrebno je proceniti koncentraciju radona u celom regionu. Stoga, pored neodređenosti merenja, odnosno procene koncentracije radona u pojedinačnom objektu, dodatna neodređenost potiče od ekstrapolacije rezultata na ceo region. Nesigurnost klasifikacije nekog regiona dodatno zavisi od:

- same definicije regiona (kvadratna ćelija određenih dimenzija npr 10 km X 10 km, geološki region, administrativni...);
- prave prostorne varijabilnosti koncentracije radona; dizajna merne kampanje u regionu:
  - broj mernih tačaka,
  - reprezentativnost (vrsta uzorkovanja, varijabilnost tipova objekata, njihov kvalitet i korišćeni materijal);
- geoloških podataka:
  - neodređenost geoloških mapa,
  - greška „pikselizacije“ odnosno problem rezolucije;
- statističke neodređenosti:
  - gustina mernih tačaka,
  - tipa pomoćnih promenljivih,
  - modela esktrapolacije...

## 6. Smanjenje nesigurnosti pri klasifikaciji radonske zone

Fridman je sa koautorima pokazao da i koeficijent varijacije koncentracije radona (drugim rečima relativna standardna devijacija) opada sa korenom broja merenih lokacija [4]. Takođe, varijansa opada ukoliko se „fiksiraju“ parametri koji utiču na disperziju koncentracije radona u zatvorenim objektima, što je ilustrovano na primeru Niške Banje gde se varijansa koncentracije radona smanjuje za faktor 1,3 ukoliko se fiksira „geologija“, za faktor 1,7 ukoliko se uključe i karakteristike objekta, dok ukoliko se uključi i ljudske navike varijansa se smanjuje za faktor 1,9 [12]. Konačno, razvijaju se brojni modeli koji pokušavaju da predvide prostornu raspodelu koncentracije radona na osnovu svih dostupnih veličina, kako izmerenih koncentracija radona u objektima, tako i svim dostupnim pomoćnim veličinama.

## 7. Zahvalnica

The research presented in this paper was realized within 16ENV04 MetroRADON project. This project has received funding from the EMPIR programme co-financed by the Participating States and from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme. Saradnici zahvaljuju i Ministarstvu prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije (projekti: P171018 и III43009).

## 8. Literatura

- [1] European Council (EC). Council Directive 2013/59/Euratom laying down basic safety standards for protection against the dangers arising from exposure to ionising radiation. *Off. J. Eur. Union L13*; 57, 2014.
- [2] P. Bossew, Radon Priority Areas – Definition, Estimation and Uncertainty. *Nucl. Technol. Radiat. Prot.* 33, 3; 2018, 286-292.
- [3] G. Pantelić, I. Čeliković, M. Živanović, I. Vukanac, J. Krneta Nikolić, G. Cinelli, V. Gruber. Qualitative overview of indoor radon surveys in Europe, *J. Environ. Radioactiv.* 263, 2019, 163-174.
- [4] H. Friedmann, et al. The uncertainty in the radon hazard classification of areas as



- a function of the number of measurements, *J. Environ. Radioactiv.* 173, 2017, 6-10.
- [5] World Health Organisation. *Handbook on Indoor Radon*. WHO, Geneva, 2009.
- [6] M. Zivanovic, Optimisation of Indoor Radon Concentration Measurements by Means of Charcoal Canisters, University of Belgrade, Doctoral thesis. 2016.
- [7] S. Tokonami, M. Yang, H. Yonehara, Y. Yamada. Simple discriminative measurement technique for radon and thoron concentrations with a single scintillation cell, *Rev. Sci. Instrum.* 73, 2002, 69–72.
- [8] S. Tokonami, H. Takahashi, Y. Kobayashi, W. Zhuo, E. Hulber. Up- to-date radon-thoron discriminative detector for a large scale survey, *Rev. Sci. Instrum.* 76, 2005, 11113505–113509.
- [9] M. Eremić Savković, V. Udovičić, D. Maletić, G. P., P. Ujić, I. Čeliković, S. Forkapić, V. Marković, V. Arsić, J. Ilić, B. Markoski. First national indoor radon survey as a tool for identify existing exposure situation in Serbia. (u pripremi)
- [10] Z. S. Žunić, I. Čeliković, P. Ujić. Baza koncentracija radona i torona merenih u okviru projekta P1965
- [11] I. Yarmoshenko, A. Vasilyev, A. Onishchenko, S. Kiselev, M. Zhukovsky. Indoor radon problem in energy efficient multi-storey buildings. *Radiat. Prot. Dosim.* 160, 2014, 1-3, 53-56.
- [12] I. Yarmoshenko, et al. Variance of indoor radon concentration: Major influencing factors, *Sci. Tot. Environ.* 541, 2016, 155-160.



## SOURCES OF UNCERTAINTY IN CLASSIFICATION OF RADON ZONES

**Igor ČELIKOVIĆ, Gordana PANTELIĆ, Miloš ŽIVANOVIĆ,  
Ivana VUKANAC and Jelena KRNETA NIKOLIĆ**

*Vinča Institute of Nuclear Sciences, University of Belgrade, Belgrade, Serbia  
[icelikovic@vinca.rs](mailto:icelikovic@vinca.rs), [pantelic@vinca.rs](mailto:pantelic@vinca.rs), [milosz@vinca.rs](mailto:milosz@vinca.rs), [vukanac@vinca.rs](mailto:vukanac@vinca.rs),  
[jnikolic@vinca.rs](mailto:jnikolic@vinca.rs)*

### ABSTRACT

The EC has laid down directive 2013/59/EURATOM which represents basic safety standards regarding the radon protection of the European citizens. Within the BSS they oblige countries to establish radon action plans which include identification of Radon Priority Areas (RPA). Since it is not feasible to perform indoor radon measurements in each dwelling, it is necessary to carefully design indoor radon survey in order to get representative estimation of annual average indoor radon concentration of the certain territory. It is not sufficient only to have representative selection of dwellings, but it is important to keep uncertainty of measurement and estimation of annual radon concentration as low as possible. Uncertainty of classification of radon zones is therefore combination of uncertainties coming from a single measurement uncertainty and uncertainty of extrapolation of single or group of measurements to the whole region. In this contribution, we will try to estimate sources of classification uncertainties and to give recommendation in order to reduce level of uncertainty. The research presented in this paper was realized within 16ENV04 MetroRADON project. This project has received funding from the EMPIR programme co-financed by the Participating States and from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme.

## PROBLEM TORONA I PREDLOG DIREKTNE METODE ODREĐIVANJA KONCENTRACIJE TORONOVIH POTOMAKA

Sofija FORKAPIĆ<sup>1</sup>, Robert LAKATOŠ<sup>2</sup>, Igor ČELIKOVIĆ<sup>3</sup>,  
Kristina BIKIT-ŠREDER<sup>1</sup>, Dušan MRĐA<sup>1</sup> i Slena SAMARDŽIĆ<sup>2</sup>

- 1) Univerzitet u Novom Sadu, Prirodno-matematički fakultet, Novi Sad, Srbija,  
[sofija@df.uns.ac.rs](mailto:sofija@df.uns.ac.rs), [kristina.bikit@df.uns.ac.rs](mailto:kristina.bikit@df.uns.ac.rs), [mrdjad@df.uns.ac.rs](mailto:mrdjad@df.uns.ac.rs)
- 2) Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, Srbija,  
[laki@uns.ac.rs](mailto:laki@uns.ac.rs), [selena@uns.ac.rs](mailto:selena@uns.ac.rs)
- 3) Univerzitet u Beogradu, Institut za nuklearne nauke "Vinča", Beograd, Srbija,  
[icelikovic@vin.bg.ac.rs](mailto:icelikovic@vin.bg.ac.rs)

### SADRŽAJ

Nedavne studije koje se bave problemom torona pokazuju da toron u vazduhu zatvorenih prostorija dominantno potiče od upotrebljenih građevinskih materijala za izradu i pokrivanje zidova i podova i da koncentracija torona eksponencijalno opada sa rastojanjem od površine zidova. Međutim, usled dužeg perioda poluraspada, toronovi potomci <sup>212</sup>Pb i <sup>212</sup>Bi imaju homogenu prostornu distribuciju i mogu značajno doprineti bronhijalnoj dozi. U ovom radu je razvijena metoda direktnog određivanja koncentracije toronovih potomaka u vazduhu koja se zasniva na gama-spektrometrijskim merenjima filter papira uz detaljnu analizu i optimizaciju vremena usisavanja, hlađenja i merenja na HPGe detektorskim sistemima. Metoda je validovana kroz uporedna merenja sa aktivnim monitorom koji se najčešće koristi za merenje ravnotežne ekvivalentne koncentracije torona. Ovakav način ispitivanja toronske ravnoteže će doprineti preciznom određivanju doze koju primi stanovništvo od inhalacije torona i potomaka, naročito zbog poznate problematike mogućnosti merenja torona kao kratkoživećeg radionuklida. Rezultati preliminarnog istraživanja problema torona u petnaest odabranih kuća pokazuju da su procenjene doze od udisanja torona uporedive sa dozama koje stanovništvo primi od udisanja radona i da toron mora biti obuhvaćen u budućim monitorinzima radona.

### 1. Uvod

Dugo se smatralo da toron ne dospeva u zatvorene prostorije usled kratkog perioda poluraspada od 55,8(3)s [1] ili da ne doprinosi povećanju doze koju primi čovek boraveći u takvim prostorijama. Novija istraživanja ukazuju na to da prisustvo torona i njegovih potomaka nije zanemarljivo [2-4] i da uglavnom potiče od građevinskog materijala u zidovima (ili podu) prostorije [5-6]. Toronovi potomci, kao i radonovi, mogu da se nalaze u nepripojenoj frakciji (klasteri dijametara 0,3 - 4 nm) ili pripojeni aerosolima dijametara 20-3000 nm [7]. Potomak torona <sup>212</sup>Pb, koji doprinosi sa 91% EETC, je beta emiter koga je moguće detektovati gama spektrometrijski usled postojanja dovoljno intenzivnog gama prelaza. Toronovi potomci <sup>212</sup>Pb i <sup>212</sup>Bi u

zatvorenoj atmosferi su dominantno pripojeni za čestice aerosola zbog relativno dugog perioda poluraspada. Standardni filteri za uzorkovanje vazduha pumpama visokog protoka izrađeni su od staklenih vlakana i obezbeđuju veliku efikasnost filtracije i za pripojenu i za nepripojenu frakciju toronovih potomaka [8]. Iako su najpopularnije tehnike za merenje toronovih potomaka pasivni integralni uređaji [2, 4, 9], za ovo istraživanje odabrana je mnogo brža i preciznija tehnika gama-spektrometrije zbog visoke spektralne rezolucije kojom se takođe izbegavaju i grananja u raspadu torona.

U ovom radu, modifikovan je i optimizovan algoritam prethodno razvijen za određivanje radonske ravnoteže [10], kako bi se opisalo i rešilo nakupljanje toronovih potomaka na filter papiru tokom usisavanja vazduha. Predloženi metod za direktno određivanje toronovih potomaka primenjen je u 15 različitih kuća, tj. soba, izabranih na osnovu prethodnih merenja radona. Kontinualna merenja koncentracije torona i uzorkovanje vazduha kroz filter papir sprovedena su u dnevnim sobama u prizemlju ispitivanih kuća, bez prisustva podruma ispod ispitivane prostorije, u približno istim vremenskim uslovima.

## 2. Metodologija uzorkovanja i merenja

Merenja su vršena tokom proleća i jeseni 2017. godine u stambenim kućama različite konstrukcije sa povišenim, srednjim i niskim koncentracijama radona, u gradskim i seoskim sredinama. Usisni ulaz aktivnog uređaja RAD7 prilikom merenja torona postavljan je na oko 30 cm iznad poda i zidova. Koncentracija torona u takvim zatvorenim prostorijama određuje se na osnovu odbroja raspada  $^{216}\text{Po}$  unutar aktivne komore uređaja. Izmerene vrednosti su korigovane na raspad torona u dodatnoj zapremini u odnosu na standardnu postavku za koju je instrument kalibrisan. Merenje torona ovim uređajem je verifikovano učešćem u interkomparaciji u Institutu NRPI u Pragu, Češka, gde su dobijena zadovoljavajuća slaganja rezultata ( $|\text{zeta score}| < 2$ ). Vreme uzorkovanja potomaka na fiber-glass filter papiru velike efikasnosti prikupljena 98% iznosilo je 1h sa protokom pumpe od  $v=0,03$  m/s. Gama spektrometrijska merenja filtera izvršena su pomoću HPGe detektora relativne efikasnosti 100% u cilindričnoj geometriji. Za određivanje aktivnosti koriste se dominantne gama linije toronovih potomaka  $^{212}\text{Pb}$  i  $^{212}\text{Bi}$  sa energijama 238,6 keV,  $p_\gamma=43,6\%$  i 727,3 keV,  $p_\gamma=6,65\%$ , respektivno. Diferencijalne jednačine koje opisuju prikupljanje toronovih potomaka na filter papiru tokom vremena uzorkovanja  $t_s$  definisane su na sledeći način:

$$\frac{dN_{Pb}}{dt_s} = n_{Pb}v\varepsilon - \lambda_{Pb}N_{Pb} \quad (1)$$

$$\frac{dN_{Bi}}{dt_s} = n_{Bi}v\varepsilon + \lambda_{Pb}N_{Pb} - \lambda_{Bi}N_{Bi} \quad (2)$$

gde su:  $t_s$  - vreme uzorkovanja u sekundama,  $v$  - protok pumpe uzorkivača u  $\text{m}^3/\text{s}$ ,  $\varepsilon$  - efikasnost prikupljanja filter papira,  $N_{Pb}$ ,  $N_{Bi}$  - broj  $^{212}\text{Pb}/^{212}\text{Bi}$  atoma na filter papiru tokom prikupljanja,  $n_{Pb}$ ,  $n_{Bi}$  - broj atoma  $^{212}\text{Pb}/^{212}\text{Bi}$  po  $\text{m}^3$  uzorkovanog vazduha,  $\lambda_{Pb}$ ,  $\lambda_{Bi}$  - konstante raspada  $^{212}\text{Pb}/^{212}\text{Bi}$ . Za proveru ove tvrdnje urađena su QA/QC merenja za 4 različita vremena usisavanja (15 min, 30 min, 1 h i 2 h) u istim uslovima zatvorene prostorije. Ukoliko pretpostavimo da je na početku prikupljanja broj atoma na filter papiru nula, odnosno,  $N_{Pb}(0)=0$ ,  $N_{Bi}(0)=0$ , dobijamo sledeći set jednačina:

$$N_{Pb} = n_{Pb} \frac{\varepsilon v}{\lambda_{Pb}} (1 - e^{-\lambda_{Pb}t_s}) \quad (3)$$

$$N_{Bi} = n_{Pb} \frac{\varepsilon_V}{\lambda_{Bi}} \left( 1 - \frac{\lambda_{Bi}}{\lambda_{Bi} - \lambda_{Pb}} e^{-\lambda_{Pb} t_s} + \frac{\lambda_{Pb}}{\lambda_{Bi} - \lambda_{Pb}} e^{-\lambda_{Bi} t_s} \right) + n_{Bi} \frac{\varepsilon_V}{\lambda_{Bi}} (1 - e^{-\lambda_{Bi} t_s}) \quad (4)$$

Nakon isključenja pumpe, toronovi potomci koji su prikupljeni na filter papiru počinju da se raspadaju tokom vremena hlađenja i vremena merenja i broj atoma  $^{212}\text{Pb}$  i  $^{212}\text{Bi}$  na filteru može se opisati sledećim jednačinama:

$$\frac{dN'_{Pb}}{dt'} = -\lambda_{Pb} N'_{Pb}, \quad (5)$$

$$\frac{dN'_{Bi}}{dt'} = \lambda_{Pb} N'_{Pb} - \lambda_{Bi} N'_{Bi} \quad (6)$$

čija su rešenja oblika:

$$N'_{Pb}(t') = N_{Pb} e^{-\lambda_{Pb} t'} \quad (7)$$

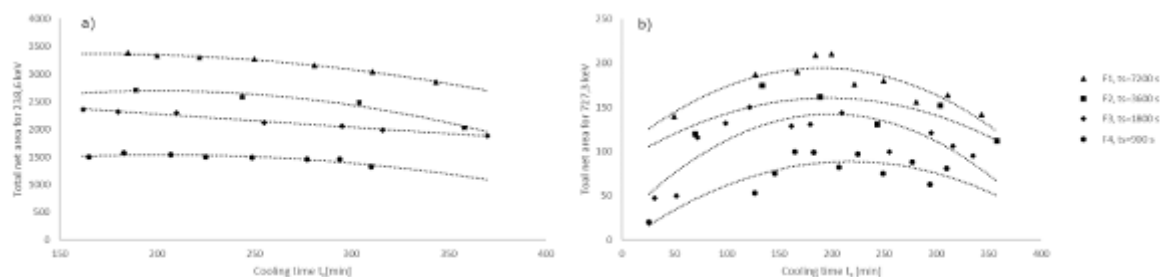
$$N'_{Bi}(t') = N_{Pb} \frac{\lambda_{Pb}}{\lambda_{Bi} - \lambda_{Pb}} (e^{-\lambda_{Pb} t'} - e^{-\lambda_{Bi} t'}) + N_{Bi} e^{-\lambda_{Bi} t'} \quad (8)$$

gde  $N_{Pb}$  i  $N_{Bi}$  predstavljaju broj atoma potomaka na filter u momentu isključivanja pumpe, na kraju usisavanja. Ukupna površina selektovanog gama pika, koji odgovara toronovom potomku,  $N_d$  predstavlja razliku neraspadnutih jezgara nakon vremena hlađenja  $t'=t_c$  i neraspadnutih jezgara nakon vremena hlađenja i merenja  $t'=t_{cm}$ .

$$\frac{N_{d(Pb)}}{\varepsilon_1 p_{\gamma 1}} = N'_{Pb}(t_c) - N'_{Pb}(t_{cm}) \quad (9)$$

$$\frac{N_{d(Bi)}}{\varepsilon_2 p_{\gamma 2}} = N'_{Bi}(t_c) - N'_{Bi}(t_{cm}) \quad (10)$$

gde su  $N_{d(Pb)}$ ,  $N_{d(Bi)}$  - odbroj ispod pika 238,6 keV i 727,3 keV;  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  - efikasnost dektektora 238,6 keV and 727,3 keV;  $p_{\gamma 1}$ ,  $p_{\gamma 2}$  - gama prinosi za 238,6 keV i 727,3 keV tranzicione linije, respektivno. Za rešavanje ovog razvijenog matematičkog modela korišćen je softverski paket Mathematica. Kako bi se pronašlo optimalno vreme za koje će aktivnost potomaka na filter papiru biti maksimalna, izvršena je serija sukcesivnih merenja gama aktivnosti filter papira za različita vremena usisavanja (slika 1).



**Slika 1a i 1b. a) ukupan odbroj linije 238,6 keV u funkciji od vremena hlađenja za filtere sa različitim vremenima uzorkovanja  $t_s$ ; b) ukupan odbroj linije 727,3 keV u funkciji od vremena hlađenja za filtere sa različitim vremenima uzorkovanja  $t_s$ .**

Uticaj visoke koncentracije radonovih potomaka u ispitivanoj prostoriji uzet je u obzir prilikom obrade spektara i došlo se do zaključka da za liniju  $^{212}\text{Pb}$  potomka (od 238,6 keV) dolazi do greške prilikom očitavanja odbroja ispod pika usled preklapanja sa linijom 241,9 keV koja potiče od radonovog potomka  $^{214}\text{Pb}$ . Kako je period poluraspada radonovog potomka značajno kraći (oko 26 min) dovoljno je sačekati oko 150 min i tek

onda očitavati vrednost površine ispod pika za ispitivanu liniju od 238,6 keV. Kao što je prikazano na slici 1b maksimum aktivnosti koncentracije  $^{212}\text{Bi}$  dostiže se približno u periodu od 200-300 min nakon završetka usisavanja za sve ispitivane filtere (filteri F1, F2, F3 i F4 sa različitim vremenima usisavanja  $t_s=900$  s, 1800 s, 3600 s i 7200 s, respektivno). Nakon vremena 300 min od početka hlađenja odbroj počinje da opada i vrednosti koje se dobijaju za EETC postaju nerealne. Preporučeno vreme hlađenja dobijeno ovom metodom u dobrom je slaganju sa rezultatima u literaturi koji su dobijeni alfa i beta spektrometrijskim metodama direktnog merenja toronovih potomaka baziranih na filtriranju vazduha [11]. Uporedo sa uzorkovanjem vazduha, vršena su i merenja torona sa aktivnim monitorom RPM2200. Usled činjenice da filterovanje vazduha ima velik uticaj na EETC u vazduhu (velik protok pumpe i velika efikasnost filter papira), za poređenje su uzeta merenja RPM2200 jedan sat pre usisavanja, tokom usisavanja i dva sata nakon usisavanja vazduha. Kako bi se uporedile vrednosti EETC rezultata izračunat je modifikovani zeta score ( $z'_{score}$ ) korišćenjem sledeće formule:

$$z'_{score} = (EETC(RPM2200)_{av}) - EETC(GAMMA\ metod)_{calculated} / \sqrt{\sigma^2 + u^2} \quad (11)$$

gde je  $EETC(RPM)_{av}$  aritmetička sredina RPM2200 očitana jedan sat pre i dva sata nakon usisavanja sa standardnom devijacijom  $\sigma$  i  $EETC(GAMMA\ metod)_{calculated}$  je izračunata vrednost EETC na osnovu GAMMA metoda sa greškom merenja  $u$ . Merna nesigurnost  $u$  ima malu vrednost zato što je posledica samo statističke greške ukupne površine ispod gama pika i nesigurnosti efikasnosti detekcije.

**Tabela 1. Interkomparacija EETC rezultata.**

Opis	EETC [Bq/m <sup>3</sup> ]			
	Filter F1	Filter F2	Filter F3	Filter F4
RPM2200 rezultat - 1 h pre filtriranja:	7,59	7,84	12,96	6,37
RPM2200 rezultat - 2 h nakon filtriranja:	9,53	8,43	6,15	6,32
Srednja vrednost RPM2200	8,56	8,14	9,56	6,34
Standardna devijacija $\sigma$	1,37	0,42	4,82	0,04
Vreme uzorkovanja $t_s$ (s)	7200	3600	1800	900
Izračunata EETC ( GAMMA metod)	8,16	7,62	8,73	5,19
Procenjena greška $u$ ( GAMMA metod)	0,16	0,13	0,12	0,17
$z'_{score}$ :	0,29	1,18	0,17	6,58
Relativna greška	- 6 %	- 6 %	- 9 %	- 18 %

Zadovoljavajuće slaganje rezultata ( $|zeta\ score| < 1$ ) dobijenih sa dve nezavisne tehnike detekcije je uočeno za tri vremena uzorkovanja ( $t_s = 7200$  s; 3600 s and 1800 s). Dok za najkraće vreme uzorkovanja od 900 s,  $|zeta\ score| > 3$  ukazuje na nezadovoljavajuće slaganje rezultata sa najvećim relativnim odstupanjem od - 18%. Na osnovu ovih rezultata i prethodnih zaključaka za optimalni odnos registrovanog odbroja i trajanja uzorkovanja, može se preporučiti standardno vreme uzorkovanja od 1 h.

### 3. Rezultati

Koncentracije torona  $C_{Tn}$  ( $Bq/m^3$ ), ravnotežne ekvivalentne koncentracije torona EETC ( $Bq/m^3$ ), faktori ravnoteže  $F_{Tn}$  za 15 ispitivanih objekata i procenjene doze prikazane su u tabeli 2. Godišnja efektivna doza AED za inhalaciju torona može se odrediti na osnovu parametara definisanih UNSCEAR Report-om 2000:

$$AED \left[ \frac{mSv}{yr} \right] = EETC \cdot D_{CF} \cdot I_{OC} \quad (12)$$

gde je  $D_{CF}$  dozni konverzioni faktor za izlaganje toronu ( $40 \text{ nSv}/(Bq \text{ h m}^{-3})$ ) i  $I_{OC}$  predstavlja okupaciono vreme ( $\approx 7000 \text{ h/yr}$ ). Aritmetička sredina EETC iznosi  $2,955 \text{ Bq/m}^3$  što je u dobrom slaganju sa nedavno objavljenim rezultatima [12]. Najveća koncentracija torona izmerena je u staroj kamenoj planinskoj kući koja ima lošu izolaciju podova (lokacija RAD1). Vrednost  $F_{Tn}$  varirala je u opsegu od 0,0047 do 0,098 sa aritmetičkom sredinom od 0,0338. Dobijena srednja vrednost u dobrom je slaganju kako sa preporučenom UNSCEAR vrednošću od 0,02 i takođe sa vrednošću procenjene na osnovu velike baze podataka dugovremenskih merenja torona i njegovih potomaka od  $0,04 \pm 0,01$  [5]. Korišćenjem Spirmanovog testa korelacije u programskom paketu SPSS, utvrđeno je da ne postoji statistički značajna povezanost između koncentracije torona i EETC, odnosno  $r_s=0,036$ ,  $p>0,05$ ,  $R^2=0,113$ . Disperzija vrednosti može da se objasni velikom zavisnošću koncentracije torona od trenutnih parametara okoline, brzine izmene vazduha i tipa gradnje [7].

**Tabela 2: Rezultati merenja koncentracije torona i EETC dobijene pomoću GAMMA metoda sa procenom doze od inhalacije toronovih potomaka.**

Lokacija	$C_{Tn}$ ( $Bq/m^3$ )	EETC ( $Bq/m^3$ )	$F_{Tn}$	AED ( $mSv/yr$ )
SM1	77(10)	7,08(12)	0,092(12)	2,0(4)
SM2	77(10)	1,46(8)	0,019(27)	0,41(8)
SM3	38(8)	2,43(15)	0,064(14)	0,68(20)
BP1	77(10)	0,40(6)	0,0052(10)	0,11(3)
K2	38(8)	0,28(7)	0,0073(24)	0,078(23)
P1	58(10)	3,02(12)	0,052(9)	0,85(21)
SAJ1	76(10)	0,48(9)	0,0063(14)	0,134(25)
BE1	152(12)	0,71(11)	0,0047(8)	0,200(23)
DM1	114(10)	1,27(18)	0,0111(19)	0,36(4)
TM1	77(10)	0,47(9)	0,0061(14)	0,132(24)
KI2	83(10)	1,49(15)	0,0180(28)	0,42(7)
SU7	116(11)	6,64(8)	0,057(5)	1,86(25)
SU8	77(10)	0,89(9)	0,0116(19)	0,25(5)
RAD1	116(10)	11,34(12)	0,098(8)	3,2(4)
VR1	116(10)	6,36(19)	0,055(5)	1,78(22)

#### 4. Zaključak

Glavna svrha sprovedene studije radona i torona na 15 različitih lokacija, sa različitim ambijentalnim uslovima, bila je proveriti pouzdanost i primenljivost predloženog GAMA metoda. Rezultati istraživanja su pokazali da povišene vrednosti torona u zatvorenim prostorijama, kao i njegovih potomaka, nisu retkost u porodičnim kućama, naročito na onim mestima gde je prethodno detektovana povišena koncentracija radona (lokacije VR1 i RAD1). Visoke vrednosti toronovih potomaka detektovane su i u kućama sa umerenom koncentracijom radona (lokacije SM2 i SU7), što govori u prilog činjenici da postoje različiti izvori radona i torona u ispitivanim kućama. Procenjene vrednosti za dozu od inhalacije torona na nekim lokacijama uporedive su sa dozom koja potiče od inhalacije radona i na taj način potvrđuje se toronski problem u zaštiti od prirodnih jonizujućih zračenja, što bi trebalo uzeti u obzir u daljim programima merenja.

#### 5. Zahvalnica

Rad je finasiran sredstvima Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije (projekat OI171002 i III 43002).

#### 6. Literatura

- [1] Laboratoire National Henri Becquerel [WWW Document], 2018. Gif-sur -Yvette, Fr. URL <http://www.nucleide.org/Laraweb/index.php>
- [2] J. Chen, D. Moir, A. Sorimachi, M. Janik, S. Tokonami. Determination of thoron equilibrium factor from simultaneous long-term thoron and its progeny measurements. *Radiat. Prot. Dosim.* Vol. 149, Issue 2, 2012, 155–158.
- [3] A. Clouvas, S. Xanthos, M. Antonopoulos-Domis. Simultaneous measurements of indoor radon, radon-thoron progeny and high-resolution gamma spectrometry in Greek dwellings. *Radiat. Prot. Dosim.* Vol. 118, Issue 4, 2006, 482–490.
- [4] S. Gierl, O. Meisenberg, P. Feistenauer, J. Tschiersch. Thoron and thoron progeny measurements in German clay houses. *Radiat. Prot. Dosim.* Vol. 160, 2014, 160–163.
- [5] M. Hosoda, H. Kudo, K. Iwaoka, R. Yamada, T. Suzuki, Y. Tamakuma, S. Tokonami. Characteristic of thoron ( $^{220}\text{Rn}$ ) in environment. *Appl. Radiat. Isot.* Volume 120, 2017, 7-10.
- [6] V. Urosevic, D. Nikezic, S. Vulovic. A theoretical approach to indoor radon and thoron distribution. *J. Environ. Radioact.* Volume 99, Issue 12, 2008, 1829-1833.
- [7] O. Meisenberg, J. Tschiersch. Specific properties of a model of thoron and its decay products in indoor atmospheres. *Nukleonika*, 55(4), 2010, 463–469.
- [8] K. Willeke, P.A. Baron. Aerosol measurement: principles, techniques, and applications, Published in 1993 in New York.
- [9] R. Mishra, Y.S. Mayya. Study of a deposition-based direct thoron progeny sensor (DTPS) technique for estimating equilibrium equivalent thoron concentration (EETC) in indoor environment. *Radiat. Meas.* Volume 43, Issue 8, 2008, 1408-1416.



- [10] S. Forkapić, D. Mrdja, M. Vesković, N. Todorović, K. Bikit, J. Nikolov, J. Hansman. Radon equilibrium measurement in the air. *Rom. Reports Phys.* Vol. 58, Supplement, P, 2013, S140–S147.
- [11] S. Chalupnik, K. Skubacz, P. Urban, M. Wysocka. Measurements of Airborne Concentrations of Radon and Thoron Decay Products, *Radiat. Prot. Dosim.* 177, 2017, 45–48.
- [12] K. Skeppström, E. Wåhlin. Is thoron a problem in Swedish dwellings? Results of measurements of concentrations of thoron and its progeny. *Radiat. Prot. Dosim.* 167, 2015, 107–110.

### THORON PROBLEM AND PROPOSAL OF METHOD FOR DIRECT DETERMINATION OF THE THORON PROGENY CONCENTRATIONS

**Sofija FORKAPIĆ<sup>1</sup>, Robert LAKATOŠ<sup>2</sup>, Igor ČELIKOVIĆ<sup>3</sup>, Kristina BIKIT-ŠREDER<sup>1</sup>, Dušan MRĐA<sup>1</sup> and Selena SAMARDŽIĆ<sup>2</sup>**

*1) University of Novi Sad, Faculty of Sciences, Novi Sad, Serbia*

*[sofija@df.uns.ac.rs](mailto:sofija@df.uns.ac.rs), [kristina.bikit@df.uns.ac.rs](mailto:kristina.bikit@df.uns.ac.rs), [mrdjad@df.uns.ac.rs](mailto:mrdjad@df.uns.ac.rs)*

*2) University of Novi Sad, Faculty of Technical Sciences, Novi Sad, Serbia*

*[laki@uns.ac.rs](mailto:laki@uns.ac.rs), [selena@uns.ac.rs](mailto:selena@uns.ac.rs)*

*3) University of Belgrade, Institute of Nuclear Sciences "Vinča", Belgrade, Serbia*

*[icelikovic@vin.bg.ac.rs](mailto:icelikovic@vin.bg.ac.rs)*

#### ABSTRACT

Recent studies focused on thoron have shown that indoor thoron originates mainly from building materials and that thoron concentrations exponentially decrease with a distance from a wall surface. However, due to longer half-lives of thoron progenies,  $^{212}\text{Pb}$  and  $^{212}\text{Bi}$ , which are mainly responsible for the bronchial dose, it is expected that their spatial distribution is homogeneous. In this paper, we have developed and optimized a method for direct measurement of thoron progenies concentrations based on an air filtration followed by gamma spectrometry measurements. The method is validated through comparative measurements with an active monitor, which is most often used to measure the equilibrium equivalent thoron concentration. The results of the preliminary study of the thoron problem in fifteen selected homes show that the estimated doses from inhalation of thoron progenies are comparable with the doses that the population receives from radon inhalation and that the thoron must be included in future radon monitoring.

## СЕЗОНСКЕ ВАРИЈАЦИЈЕ КОНЦЕНТРАЦИЈЕ РАДОНА

**Гордана ПАНТЕЛИЋ, Милица Рајачић, Јелена КРНЕТА НИКОЛИЋ,  
Ивана ВУКАНАЦ, Милош ЖИВАНОВИЋ, Игор ЧЕЛИКОВИЋ,  
Драгана ТОДОРОВИЋ, Марија ЈАНКОВИЋ, Наташа САРАП  
и Мирјана РАДЕНКОВИЋ**

*Универзитет у Београду, Институт за нуклеарне науке „Винча“, Београд,  
Србија, [pantelic@vinca.rs](mailto:pantelic@vinca.rs), [milica100@vinca.rs](mailto:milica100@vinca.rs), [jnikolic@vinca.rs](mailto:jnikolic@vinca.rs),  
[vukanac@vinca.rs](mailto:vukanac@vinca.rs), [milosz@vinca.rs](mailto:milosz@vinca.rs), [icelikovic@vinca.rs](mailto:icelikovic@vinca.rs), [beba@vinca.rs](mailto:beba@vinca.rs),  
[marijam@vinca.rs](mailto:marijam@vinca.rs), [natasas@vinca.rs](mailto:natasas@vinca.rs), [mirar@vinca.rs](mailto:mirar@vinca.rs)*

### САДРЖАЈ

*Након измерене високе концентрације радона у три просторије у једној кући почетком 2018. године, настављено је испитивање концентрације у свим годишњим добима, а број просторија је повећан на пет. Као што је очекивано, концентрација радона је у току летњих месеци била много мања него у зимском периоду, првенствено због сталног проветравања. У осталим годишњим добима уочена је велико повећање концентрације радона са смањењем спољашње температуре. Такође је уочено смањење концентрације радона у свим просторијама наредне зиме, за приближно исти хладни период, када је уместо угља коришћен дрвени пелет.*

### 1. Увод

Епидемиолошке студије су потврдиле да дуготрајна изложеност повишеној концентрацији радона у затвореном простору повећава ризик од добијања рака плућа код становништва. У многим земљама је то други највећи узрочник рака, после пушења. Од укупног броја оболелих од рака плућа око 3% до 14% је узроковано радоном [1].

Концентрација радона у затвореном простору веома варира и у току једног дана и у току године. На ове варијације утичу многобројни фактори, као што су пропустљивост и врста земљишта, одосно геолошки фактори, грађевински материјал који је коришћен за изградњу стамбених објеката, климатски фактори (температура, влажност и притисак ваздуха), животне навике становништва (на пример фреквенција проветравања просторија).

У оквиру националног програма мерења концентрације радона у Србији коришћени су пасивни детектори у којима се региструје алфа зрачење [2]. Број ових детектора је био недовољан за све заинтересоване који су желели да се испита концентрација радона у њиховим становима.

За прелиминарна испитивања могу се користити детектори са активним угљем који се излажу краткорочно. Метод мерења (US EPA 520/5-87-005) се заснива на адсорпцији радона на активном угљу и мерењу гама зрачења радонових потомака ( $^{214}\text{Pb}$  и  $^{214}\text{Bi}$ ) [3]. Ова метода се сматра скрининг методом и најчешће се користи за брзу идентификацију места на којима се сумња да постоји повећана

концентрација радона у ваздуху, а због сезонске варијације се препоручује да се та мерења понове више пута. За процену изложености становништва препоручено је да се обаве дугорочна мерења другим методама. Међутим наша претходна истраживања су показала да не постоји статистички значајна разлика између ове две методе, уколико се скрининг метода понавља више пута у дужем временском периоду [4].

## 2. Метода

За испитивање концентрације радона у стамбеним просторијама коришћени су детектори са активним угљем [3]. Угљени филтери су отворани и излагани у затвореним просторијама 2-3 дана. Детектори су постављани на 1 m висине од пода и зидова, приближно на исто место током поновљених мерења, а станари су замољени да прозоре држе затворене и да што мање проветравају просторије. После затварања филтера мерење је вршено након успостављања равнотеже између радона и његових потомака (најмање 3 часа) на NaI детектору. Калибрација детектора је вршена са стандардом  $^{226}\text{Ra}$  (сертификат 1035-SE-40869-17, Czech Metrological Institute) познате активности у истој геометрији.

Гамаспектрометријска испитивања узорака вршена су на чистом германјуском детектору Canberra, ефикасности 50% и резолуције 1,9 keV на 1,33 MeV. Узорци су припремани и мерени по стандардној методи [5]. Калибрација детектора је вршена за сваку геометрију узорака и матрикс [6].

Температура и влажност је праћена преко Метеоролошке станице Републичког хидрометеоролошког завода у Београду.

## 3. Резултати и дискусија

У току јануара 2018. године измерена је висока концентрације радона у три просторије у једној кући у Гроцкој користећи методу адсорпције на активном угљу. Мерење је поновљено у марту у истим просторијама, а онда је повећан број просторија на пет и мерење је поновљено још 4 пута. Спаваће собе, дневна соба и кухиња су у приземљу и испод њих нема подрума, а подрум је дозидан са стране куће. Подови у собама су од бетона, преко кога је стављен ламинат, а у кухињи су преко бетона стављене плочице.

Резултати мерења концентрације радона у различитим просторијама су приказани у табели 1 и на слици 1.

Табела 1. Концентрација радона у једној кући у Гроцкој ( $\text{Bq/m}^3$ ).

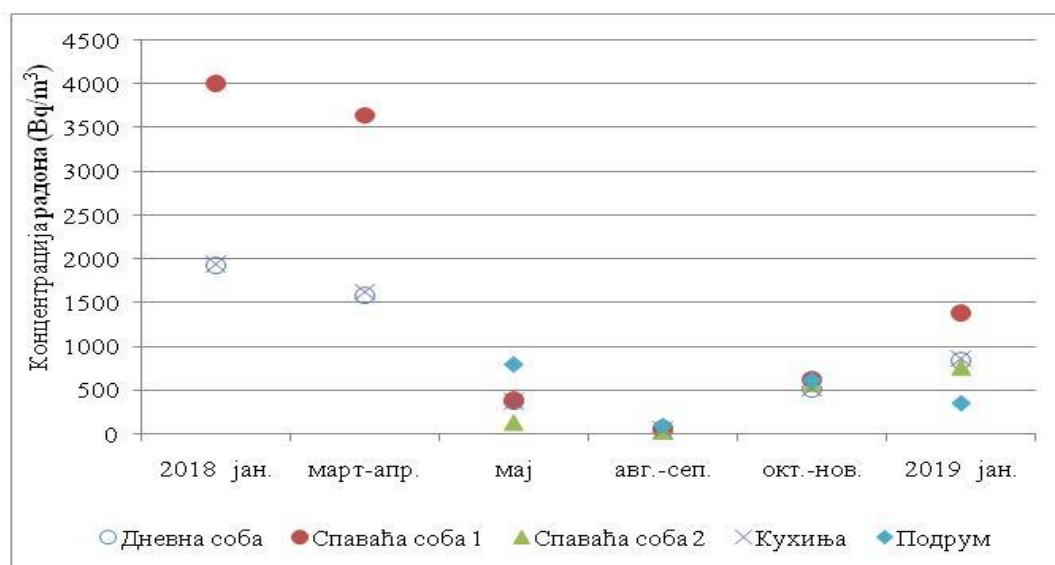
Година и месец мерења	2018. година					2019.
	Јануар	Март-Април	Мај	Август-Септембар	Октобар-Новембар	Јануар
Просторија	Концентрација радона ( $\text{Bq/m}^3$ )					
Дневна соба	$1930 \pm 80$	$1590 \pm 67$	$371 \pm 19$	$53 \pm 8$	$520 \pm 24$	$840 \pm 36$
Спаваћа соба 1	$4010 \pm 160$	$3640 \pm 150$	$384 \pm 19$	$57 \pm 8$	$620 \pm 28$	$1380 \pm 57$
Спаваћа соба 2	-	-	$130 \pm 10$	$27 \pm 8$	$580 \pm 26$	$770 \pm 33$
Кухиња	$1940 \pm 80$	$1620 \pm 68$	$378 \pm 19$	$47 \pm 8$	$520 \pm 25$	$860 \pm 37$
Подрум	-	-	$790 \pm 35$	$89 \pm 9$	$610 \pm 28$	$348 \pm 16$

Резултати гамаспектрометријских испитивања узорка земљишта који је узет поред куће у дворишту, грађевинског материјала (сипорекс, цигла, малтер) који је коришћен за изградњу куће, и две врсте угља које су коришћене за грејање у зимском периоду 2017/2018. године дати су у табели 2. У зимском периоду 2018/2019. године за грејање је коришћен дрвени пелет. Резултати показују да је највећа активност  $^{226}\text{Ra}$  у сипорексу и једном узорку угља (тип 1).

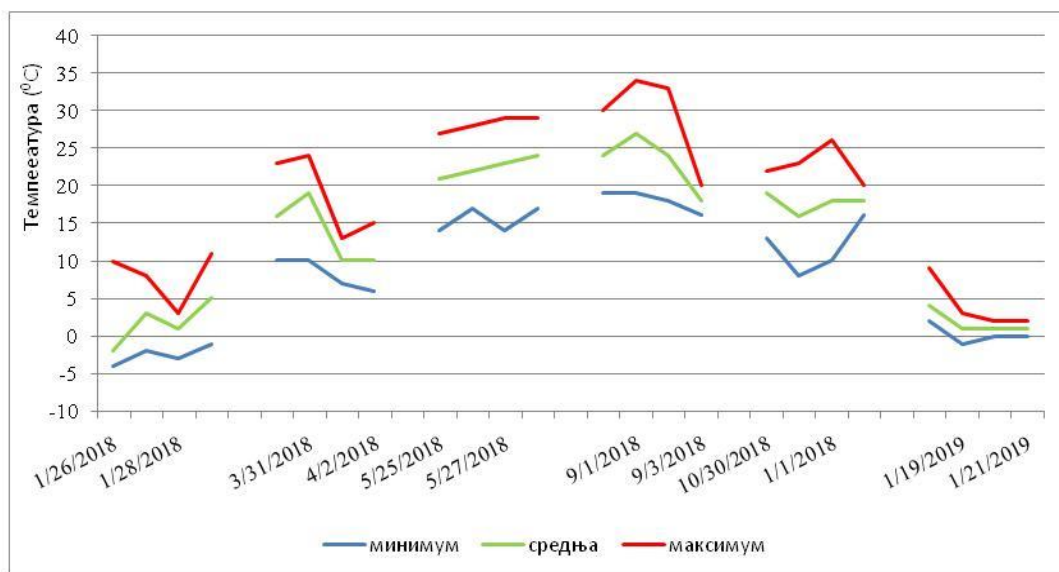
Табела 2. Активност радионуклида у измереним узорцима.

Радионуклид		$^{226}\text{Ra}$	$^{232}\text{Th}$	$^{238}\text{U}$	$^{40}\text{K}$
Врста узорка		Активност (Bq/kg)			
Земљиште око куће		$38 \pm 3$	$41 \pm 4$	$< 12$	$460 \pm 30$
Грађевински материјал	сипорекс	$100 \pm 20$	$< 10$	$< 20$	$160 \pm 60$
	цигла	$40 \pm 10$	$60 \pm 20$	$< 10$	$520 \pm 90$
	малтер	$60 \pm 10$	$20 \pm 7$	$< 5$	$330 \pm 50$
Угаљ	тип 1	$70 \pm 20$	$< 10$	$< 6$	$< 60$
	тип 2	$19 \pm 5$	$18 \pm 6$	$< 4$	$170 \pm 40$

У овој кући је уочена је сезонска варијација радона у свим просторијама, при чему су зими концентрације највеће у најхладнијем периоду када нема проветравања и кад је коришћен угаљ за загревање просторија. Температуре у јануару 2019. године су приближно биле исте као у јануару 2018. године (у време излагања угљених филтера, слика 2), али измерена концентрација радона у свим просторијама у којима је вршено мерење је 2-3 пута мања (слика 1). Загревање просторија у јануару 2019. године је било у највећој мери дрвеним пелетима. Пошто је спољашња температура ваздуха била слична температури ваздуха из претходне године, а концентрације радона у кући неколико пута мање, претпостављамо да је претходне године велики допринос за високу концентрацију радона у кући био из угља.



Слика 1. Концентрација радона у различитим просторијама у кући.



Слика 2. Температура ваздуха у Београду (јануар 2018-јануар 2019).

Власницима су дате препоруке и савети за чешће проветравање просторија и побољшање хидроизолације у кући. У наредном периоду се планира дуготрајно мерење траг детекторима ради поуздане процене дозе за станаре ове куће, као и анализа типа земљишта и пропустљивости.

#### 4. Закључак

У овом раду су приказани резултати праћења концентрације радона у више просторија у једној породичној кући у свим годишњим добима. Резултати мерења показују сезонску варијацију концентрације радона у свим просторијама, као и смањење концентрације радона у свим просторијама наредне зиме, за приближно исти хладни период, када је уместо угља коришћен дрвени пелет.

#### 5. Захвалница

Овај рад је финансијски подржан од стране Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије (пројекти Р171018 и П43009).

#### 6. Литература

- [1] WHO Handbook on Indoor Radon: A Public Health Perspective. Geneva: World Health Organization, 2009.
- [2] V. Udovičić, D. Maletić, M. Eremić Savković, G. Pantelić, P. Ujić, S. Forkapić, N. Stevanović, V. Marković, V. Arsić. First steps towards national radon action plan in Serbia, *Nukleonika*, 61(3), 2016, 361-365.
- [3] D. J. Grey, S. T. Windham. *EERF Standard Operating Procedures for Radon-222 Measurement Using Charcoal Canisters*, EPA 520/5-87-005, 1987.
- [4] М. Живановић, Г. Пантелић, М. Рајачић, Ј. Крнета Николић, Д. Тодоровић.

Поређење резултата мерења концентрације радона помоћу угљених канистара и траг детектора. *Зборник радова XXIX симпозијума Друштва за заштиту од зрачења Србије и Црне Горе*. Уредници: Јелена Станковић Петровић и Гордана Пантелић, 27-29. септембар 2017, Сребрно језеро, 2017, 507-512.

- [5] *Measurements of Radionuclides in Food and Environment, Method for Determining Gamma Emitters*, IAEA Technical Reports Series No. 295, Vienna, 1989.
- [6] I. Vukanac, M. Đurašević, G. Pantelić, J. Krneta Nikolić, M. Rajačić, M. Janković, N. Sarap, D. Todorović. Preparation of laboratory radioactive standards for experimental calibration in gamma ray spectrometry. *Book of Abstracts, 22<sup>nd</sup> International Conference on Radionuclide Metrology*, 27-31 May 2019, Salamanca, 2019, GS-147.

## INDOOR RADON SEASONAL VARIABILITY

**Gordana PANTELIĆ, Milica Rajačić, Jelena KRNETA NIKOLIĆ,  
Ivana VUKANAC, Miloš ŽIVANOVIĆ, Igor ČELIKOVIĆ,  
Dragana TODOROVIĆ, Marija JANKOVIĆ, Nataša SARAP  
and Mirjana RADENKOVIĆ**

*University of Belgrade, Vinča Institute of Nuclear Sciences, Belgrade, Serbia,  
pantelic@vinca.rs, milica100@vinca.rs, jnikolic@vinca.rs, vukanac@vinca.rs,  
milosz@vinca.rs, icelikovic@vinca.rs, beba@vinca.rs, marijam@vinca.rs,  
natasas@vinca.rs, mirar@vinca.rs*

### ABSTRACT

The high radon concentrations were measured in three rooms in one house at the beginning of 2018. After that, radon testing was continued during all seasons and the number of rooms was increased to five. As expected, the concentration of radon during the summer was much lower than in the winter period, primarily due to constant natural ventilation. In other seasons, a large increase in radon concentration with a decrease in the outside temperature was observed. There was also a decrease in radon concentrations in all rooms in the following winter, in approximately the same cold period, when wood pellets were used instead of coal.



## SEASONAL RADON VARIATIONS IN SOME SELECTED DWELLINGS IN THE REPUBLIC OF CROATIA – PRELIMINARY RESULTS

**Vanja RADOLIĆ, Marina POJE SOVILJ, Denis STANIĆ and Igor MIKLAVČIĆ**

*University of Osijek, Department of Physics, Osijek, Croatia, [vanja@fizika.unios.hr](mailto:vanja@fizika.unios.hr), [mpoje@fizika.unios.hr](mailto:mpoje@fizika.unios.hr), [dstanic@fizika.unios.hr](mailto:dstanic@fizika.unios.hr), [imiklavcic@fizika.unios.hr](mailto:imiklavcic@fizika.unios.hr)*

### ABSTRACT

*Preliminary results of the continuous radon detector exposure (since December, 2016) are presented and discussed. In order to understand the influence of environmental parameters governing radon behaviour indoors, as well as the temporal variations of its activity concentration between seasons better, radon detectors are exposed on 22 locations in 12 chosen dwellings in Croatia. The dwellings are chosen in a specific way: in the continental part of the Republic of Croatia there are 9 chosen dwellings (1 multi-storey house, 5 family houses and 3 ground floor houses), in the Mediterranean part there are two chosen dwellings (1 multi-storey house and 1 ground floor house), while in the mountain part of Croatia a single-family house was chosen. In every moment, there are 3 radon detectors at every location: one is exposed for 3 months (within the climatic seasons), the other for 6 months (climatological seasons winter-spring or summer-fall) and the third detector for a year. The resulting seasonal correction factors for each site are compared with other locations both within the same type of housing and for different climatic regions in Croatia. Preliminary results show there is no need of defining one set of seasonal correction factors for each climatic region of the Republic of Croatia (continental, Mediterranean and mountainous), as someone can conclude from the research of radon variability in neighbouring countries.*

### 1. Introduction

Radon is a naturally radioactive gas that is, by far, the main contributor to the total dose received by general population from exposure to natural background radiation [1]. It is also considered to be the main leading cause of lung cancer, second to smoking [2]. Due to temporal variations of indoor radon concentrations, a year-long period of radon measurements (e.g. such as in Croatia, [3]) is generally considered as the best for annual average value. However, shorter measurement periods (e.g. 3 to 6 months) are often used in many national measuring campaigns and in such cases seasonal correction factors are required for the determination of annual average indoor radon concentration [4-8]. Furthermore, different seasonal conversion factor sets are required for different regions of France [9], while similar conclusions were reported for Ireland as well [10]. In Poland, four thermal-precipitation regions were established and correction factors were calculated for each region, separately for houses with and without basements [11]. The relationship between radon exposure and risk of lung cancer can be substantially underestimated if the random year-to-year radon variability is not taken into account [12]. Due to seasonal radon variations, unadjusted averages of short-term radon



measurements had very high root mean square error, which decreased very slowly as the duration of the measurement period increased [13]. In a very extensive research performed on the whole territory of Italy, the evidence that both geology and building material as radon sources was highlighted by the analysis of the dependence of average radon concentration on storey level. Furthermore, the width of the distribution of the radon seasonal variation is considerable and has to be taken into account, at least in uncertainty evaluation, when a mean seasonal correction factor is applied to measurements shorter than 1 year in order to estimate the annual mean radon concentration [4].

Similar conclusions are derived from investigations of seasonal variations of radon in the neighbouring countries with the inhabitants' lifestyle, as well as climatic and geology conditions even more similar to one in our research [14-18]. The complex dynamics of indoor radon behaviour in Serbian dwellings within its national survey was examined by multivariate analysis due to the influence of the large number of different parameters: meteorological parameters (temperature, pressure, and relative humidity), aerosol concentration, the exchange rate between indoor and outdoor air, construction materials, and living habits [14]. The analysis of variance analysis of the indoor radon measurement results in North Macedonia showed statistically significant differences between indoor radon measurements for the regions in different seasons. The influence of factors linked to building characteristics in relation to indoor radon measurements in North Macedonia in different seasons was examined as well [16]. The seasonal radon changeability, as a consequence of the influence of environmental/meteorological parameters in governing indoor radon dynamics, is especially emphasized in the complex karst system [18]. The impact of geological parameters (geotectonic unit, type of rock, and faults distance from the measuring site), type of the region, and the presence of basements in buildings on radon spatial and temporal variations were examined [19]. Since the territory of Croatia is so versatile in the geological and climatological sense, as well as in the house constructing and lifestyle of its inhabitants, similar results can be expected.

## 2. Materials and methods

In order to understand the influence of seasons on temporal variations of indoor radon concentrations, solid state nuclear track-etched strippable detectors (Kodak LR115 type II from Dosirad) are exposed, since December 2016 on 22 locations in 12 chosen dwellings in Croatia. Dwellings are chosen in a specific way: in the continental part of the Republic of Croatia there are 9 chosen dwellings (1 multi-storey house (MS), 5 family houses (FH) and 3 ground floor houses (GFH)), in the Mediterranean part there are two chosen dwellings (1 multi-storey house and 1 ground floor house), while in mountain part of Croatia a single-family house was chosen. In every moment, there are 3 radon detectors at every location: one is exposed for 3 months (within the climatic seasons), the other for 6 months (climatological seasons winter-spring or summer-autumn) and third detector for a year.

After being exposed, strippable LR115 type II detectors were chemically etched in 10% aqueous solution of NaOH at the temperature of 50 °C for 150 minutes. The tracks were then automatically counted by spark counter AIST-2V (V.G. Khlopkin Radium Institute, St. Petersburg, Russia). Radon concentrations are determined as the product of track densities on detector and sensitivity coefficient ( $65 \pm 23 \text{ Bq m}^{-3} / \text{tr cm}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) which was

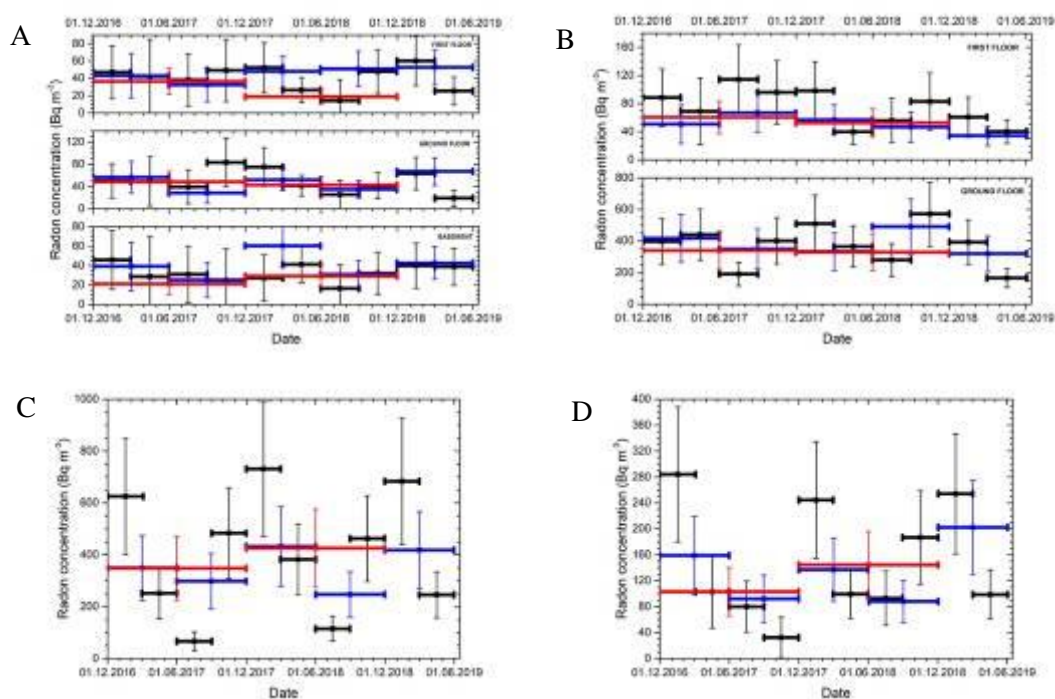
determined during the calibration process at the PTP radon chamber (Physikalisch-technischer Prüfdienst. Vienna. Austria).

### 3. Results and Discussion

Since, the exposures of radon detectors in selected and described types of dwellings in Croatia are still going on, the preliminary results of the obtained seasonal correction factors (ratios of radon concentrations during a season to the radon concentration during a whole year) are presented in Table 1.

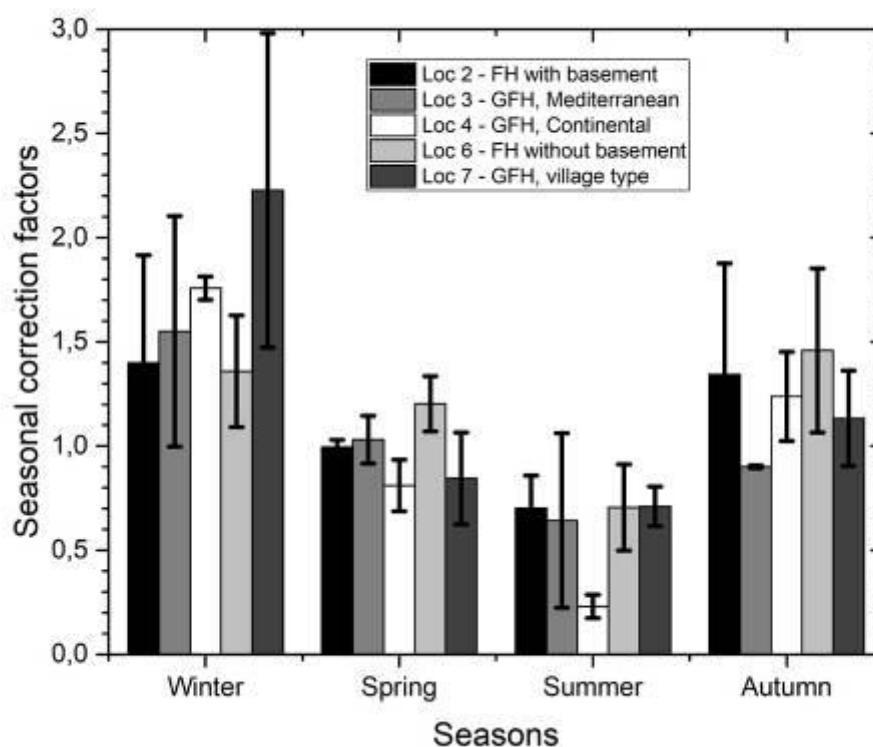
**Table 1. The preliminary results of the averaged seasonal correction factors ( $\pm$  standard deviations) obtained by exposing radon detectors in selected dwellings in Croatia.**

	Winter	Spring	Summer	Autumn
<b>Basement</b>	<b>1.263 <math>\pm</math> 0.501</b>	<b>1.447 <math>\pm</math> 0.365</b>	<b>1,115 <math>\pm</math> 0.628</b>	<b>1.338 <math>\pm</math> 0.291</b>
<b>Ground floor</b>	<b>1.604 <math>\pm</math> 0.521</b>	<b>1.082 <math>\pm</math> 0.379</b>	<b>0,862 <math>\pm</math> 0.453</b>	<b>1.360 <math>\pm</math> 0.560</b>
<i>Continental climate</i>	<i>1.667 <math>\pm</math> 0.458</i>	<i>1.126 <math>\pm</math> 0.404</i>	<i>0.886 <math>\pm</math> 0.454</i>	<i>1.459 <math>\pm</math> 0.570</i>
<i>Mediterranean climate</i>	<i>1.510 <math>\pm</math> 0.771</i>	<i>0.964 <math>\pm</math> 0.285</i>	<i>0.764 <math>\pm</math> 0.563</i>	<i>1.129 <math>\pm</math> 0.381</i>
<i>Mountain climate</i>	<i>0.924 <math>\pm</math> 0.300</i>	<i>0.810 <math>\pm</math> 0.283</i>	<i>0.838 <math>\pm</math> 0.440</i>	<i>0.601 <math>\pm</math> 0.247</i>
<b>First floor</b>	<b>1.672 <math>\pm</math> 0.625</b>	<b>1.105 <math>\pm</math> 0.648</b>	<b>1.135 <math>\pm</math> 0.649</b>	<b>1.158 <math>\pm</math> 0.505</b>
<b>Second floor</b>	<b>0.931 <math>\pm</math> 0.249</b>	<b>0.887 <math>\pm</math> 0.314</b>	<b>0.914 <math>\pm</math> 0.775</b>	<b>1.838 <math>\pm</math> 0.050</b>



**Figure 1. Temporal variations of radon concentrations at different types of houses (A: family house with basement; B: family house without basement; C: ground floor house in town; D: ground floor house in village). Red lines present a one-year measurements, blue lines half-year and black ones three months measurements.**

These seasonal correction factors are grouped according to floors at which detectors are exposed. The standard deviations of presented seasonal correction factors are 40% in average. The null hypothesis (there is no difference between Continental and Mediterranean climatic areas arithmetic means of seasonal correction factors at ground floors) is tested by applying t-test. The obtained p values are greater than 0.05 (winter:  $p = 0.385$ ; spring:  $p = 0.410$ ; summer:  $p = 0.375$ ; autumn:  $p = 0.443$ ) for all seasons and therefore null hypothesis should not be rejected.



**Figure 2. Comparison of seasonal correction factors at five different locations (location 2 corresponds to graph A at Figure 1; location 4 to graph C, location 6 to graph B and location 7 to graph D).**

#### 4. Conclusion

Owing to temporal variations of radon concentration, a 12-month total period of measurement is generally considered the best estimate of the average value and radon community agree that long-term measurements should be made wherever possible [5,6]. Shorter measurement periods (e.g., 3 or 6 months), however, are often used, and in such cases reliable data on the seasonal variations of radon concentration are required to estimate the annual average value accurately.

Clearly, any improvements to the seasonal correction factors used to estimate annual average radon concentrations from seasonally varying short-term radon measurements will improve both the identification of houses (and workplaces) at risk requiring remediation and also the targeting of persons most at risk from exposure to radon. This, in turn, should reduce the incidence of lung cancers which is the ultimate goal of the National radon action plan in Croatia.

Due to the very diverse geology, climate, house construction and lifestyle of the inhabitants in Croatia, a multivariate analysis of the extensive data collected so far in our measuring campaigns, is planned in the future. Defining a proper set of seasonal correction factor valid for whole territory of Croatia will be the first step in possible change of indoor radon measurement protocols if the shorter measurement periods will be required in the future by the governmental regulatory body through the activities within National radon action plan in Croatia.

### 5. References

- [1] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). Effects of Ionising Radiation. Volume I UNSCEAR 2006 Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation to the General Assembly. United Nations. New York. 2008. ISBN 978-92-1-142263-4
- [2] World Health Organization (WHO). WHO Handbook on indoor radon: A public health perspective. WHO. Geneva. 2009.
- [3] V. Radolić, B. Vuković, D. Stanić, M. Katić, Z. Faj, B. Šuveljak, I. Lukačević, D. Faj, M. Lukić, J. Planinić. National survey of indoor radon levels in Croatia. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 269, 2006, 87-90.
- [4] F. Bochicchio, G. Campos-Venuti, S. Piermattei, C. Nuccetelli, S. Risica, L. Tommasino, G. Torri, M. Magnoni, G. Agnesod, G. Sgorbati, M. Bonomi, L. Minach, F. Trotti, M.R. Malisan, S. Maggiolo, L. Gaidolfi, C. Giannardi, A. Rongoni, M. Lombardi, G. Cherubini, S. D'Ostilio, C. Cristofaro, M. Pugliese, M. Martucci. Annual average and seasonal variations of residential radon concentration for all the Italian regions. *Radiat. Meas.* 40, 2005, 686-694.
- [5] J.C.H. Miles. Temporal variation of radon levels in houses and implications for radon measurement strategies. *Rad. Prot. Dosimetry.* 93, 2001, 369–376.
- [6] J.C.H. Miles, C.B. Howarth, N. Hunter. Seasonal variation of radon concentrations in UK homes. *J. Radiol. Prot.* 32, 275–287 (2012) and 2014 corrigendum *J. Radiol. Prot.* 34, 493.
- [7] J.H. Park, C.M. Lee, H.Y. Lee, D.R. Kang. Estimation of Seasonal Correction Factors for Indoor Radon Concentrations in Korea. *Int. J. Environ. Res. Public Health.* 15, 2018, 2251.
- [8] A. Tsapalov, K. Kovler. Indoor radon regulation using tabulated values of temporal radon variation. *J. Environ. Radioact.* 183, 2018, 59-72.
- [9] H. Baysson, S. Billon, D. Laurier, A. Rogel, M. Tirmarche. Seasonal correction factors for estimating radon exposure in dwellings in France. *Radiat. Prot. Dosimetry.* 104, 2003, 245–252.
- [10] Q. Burke, P. Murphy. Regional variation of seasonal correction factors for indoor radon levels. *Radiat. Meas.* 46, 2011, 1168–1172.
- [11] K. Kozak, J. Mazur, J. et al. Correction factors for determination of annual average radon concentration in dwellings of Poland resulting from seasonal variability of indoor radon. *Appl. Radiat. Isotopes,* 69, 2011, 1459–1465.

- 
- [12] M. Slezakova, K. Navratilova Rovenska, L. Tomašek, J. Holeček. Short and long-term variability of radon progeny concentrations in dwellings in the Czech Republic. *Radiat. Prot. Dosim.* 153, 2013, 334–341.
- [13] M. Marušiaková, J. Hulka. Estimates of the annual average indoor radon concentration in Teleci in the Czech Republic. *Radiat. Prot. Dosim.* 145, 2011, 145–149.
- [14] V.I. Udovičić, D.M. Maletić, R.M. Banjanac et al. Multiyear indoor radon variability in a family house – a case study in Serbia. *Nucl. Technol. Radiat.* 33, 2018, 174-179.
- [15] Z. Stojanovska, J. Januseski, P. Bossew, Z.S. Zunic, T. Tollefsen, M. Ristova. Seasonal indoor radon concentration in FYR of Macedonia. *Radiat. Meas.* 46, 2011, 602-610.
- [16] Z. Stojanovska, J. Januseski, B. Boev, M. Ristova. Indoor exposure of population to radon in the FYR of Macedonia. *Radiat. Prot. Dosimetry.* 148, 2012, 162–167.
- [17] Z. Stojanovska, K. Ivanova, P. Bossew, B. Boev, Z. Zunic, M. Tsenova, Z. Curguz, P. Kolarz, M. Zdravkovska, M. Ristova. Prediction of long-term indoor radon concentration based on short-term measurements. *Nucl Technol Radiat.* 32, 2017, 77–84.
- [18] J. Vaupotič, A. Brodar, A. Gregorič, I. Kobal. Radon dynamics in a dwelling with high radon levels in a karst area. *Geological Society London Special Publications* 451, 2017, SP451.9
- [19] K. Ivanova, Z. Stojanovska, B. Kunovska, N. Chobanova, V. Badulin, A. Benderev. Analysis of the spatial variation of indoor radon concentrations (national survey in Bulgaria). *Environ. Sci. Pollution Res.* 2019.

**SEZONSKE VARIJACIJE RADONA U NEKIM ODABRANIM  
STAMBENIM OBJEKTIMA U REPUBLICI HRVATSKOJ –  
PRELIMINARNI REZULTATI**

**Vanja Radolić, Marina Poje Sovilj, Denis Stanić i Igor Miklavčić**

*Sveučilište u Osijeku, Odjel za fiziku, Osijek, Hrvatska, [vanja@fizika.unios.hr](mailto:vanja@fizika.unios.hr),  
[mpoje@fizika.unios.hr](mailto:mpoje@fizika.unios.hr), [dstanic@fizika.unios.hr](mailto:dstanic@fizika.unios.hr), [imiklavcic@fizika.unios.hr](mailto:imiklavcic@fizika.unios.hr)*

**SADRŽAJ**

Sezonske varijacije u koncentracijama radona određuju se detektorima nuklearnih tragova LR115 tip II od 1. prosinca 2016. godine nadalje na 22 lokacije u dvanaest stambenih objekata u RH. Pritom se u kontinentalnom dijelu RH nalazi devet stambenih objekata (1 višekatnica, 5 obiteljskih katnica i 3 prizemnice), u mediteranskom dijelu su dva stambena objekta (1 višekatnica i 1 obiteljska kuća prizemnica), dok se u gorskoj Hrvatskoj nalazi jedna obiteljska kuća. U svakom se trenutku na lokacijama nalaze po 3 radonska detektora: jedan se izlaže 3 mjeseca (unutar razdoblja klimatoloških godišnjih doba), jedan šest mjeseci (klimatološka zima-proljeće odnosno ljeto-jesen), a jedan godinu dana. Ovako dobiveni sezonski korektivni faktori za pojedinu lokaciju uspoređuju se s ostalim lokacijama kako unutar istog tipa stambenog objekta tako i za različita klimatska područja u RH. Dosadašnji rezultati ne ukazuju na potrebu definiranja po jednog skupa sezonskih korektivnih faktora za svako klimatsko područje RH (kontinentalno, mediteransko i planinsko) kako je na početku istraživanja bilo pretpostavljeno.



## RADON U ŠKOLAMA I DJEČIJIM VRTIĆIMA U CRNOJ GORI

Perko VUKOTIĆ<sup>1</sup>, Ranko ZEKIĆ<sup>2</sup>, Tomislav ANĐELIĆ<sup>2</sup>, Nikola SVRKOTA<sup>2</sup>,  
Andrija ĐUROVIĆ<sup>3</sup> i Aleksandar DLABAČ<sup>4</sup>

1) Crnogorska akademija nauka i umjetnosti, Podgorica, Crna Gora,  
[pvukotic@canu.ac.me](mailto:pvukotic@canu.ac.me)

2) Centar za ekotoksikološka ispitivanja, Podgorica, Crna Gora,  
[ranko.zekic@ceti.co.me](mailto:ranko.zekic@ceti.co.me), [tomislav.andjelic@ceti.co.me](mailto:tomislav.andjelic@ceti.co.me), [nikola.svrkota@ceti.co.me](mailto:nikola.svrkota@ceti.co.me)

3) Deloitte d.o.o., Podgorica, Crna Gora, [djandrija@gmail.com](mailto:djandrija@gmail.com)

4) Univerzitet Crne Gore, Centar za nuklearna znanja i kompetentnost, Podgorica,  
Crna Gora, [adlabac@t-com.me](mailto:adlabac@t-com.me)

### SADRŽAJ

*U okviru nacionalnog projekta MNE9005, finansiranog od Međunarodne agencije za atomsku energiju i Vlade Crne Gore, tokom školske 2016/17. godine radon je mjerен pasivnim detektorima (RSFV, Radosys) u 3793 radne prostorije, u svih 519 zgrada koje se koriste za preduniverzitetsko obrazovanje u Crnoj Gori – zgrade osnovnih i srednjih škola, dječijih vrtića, resursnih centara i đačkih domova. Tokom devetomjesečne ekspozicije izgubljeno je ili oštećeno 11,4% postavljenih detektora.*

*U ovom radu prikazani su rezultati mjerenja radona u 2857 radnih prostorija u prizemlju 468 zgrada. Opseg koncentracija aktivnosti radona u tim prostorijama je 3–4000 Bq/m<sup>3</sup>, srednje vrijednosti su AM=261 Bq/m<sup>3</sup> i GM=152 Bq/m<sup>3</sup>, a u 25,5% radnih prostorija u prizemlju je koncentracija radona bila veća od 300 Bq/m<sup>3</sup>. Deskriptivna statistika srednjih koncentracija radona po objektima ukazuje da na nivo koncentracija radona u ispitivanim zgradama utiču: tip klime, područje (urbano, ruralno), starost zgrade, spratnost, postojanje podruma, građevinski material (kamen, drvo), okviri prozora (PVC, drvo) i način grijanja.*

### 1. Uvod

Nakon nacionalnog projekta istraživanja radona u stanovima u Crnoj Gori, realizovanog u periodu 2014-2016. godine [1-3], koji su finansijski omogućile Međunarodna agencija za atomsku energiju (MAAE) i Vlada Crne Gore, pristupilo se u Crnoj Gori i realizaciji nacionalnog projekta istraživanja radona u školama i vrtićima. I ovaj projekat su finansirale MAAE i Vlada Crne Gore, u periodu 2016-2018. godina.

Prije ovog sistematskog istraživanja, a u okviru Programa ispitivanja radioaktivnosti u životnoj sredini, koji se realizuje na osnovu Zakona o zaštiti životne sredine i Zakona o zaštiti od jonizujućeg zračenja, Centar za ekotoksikološka ispitivanja je od 1999. godine radio mjerenja radona u 60 osnovnih i srednjih škola i u 32 dječija vrtića, u tri opštine – Podgorica, Nikšić i Bar. Radon je mjerен aktivnim monitorima u trajanju od 48 sati, četiri puta godišnje na istim lokacijama, na osnovu čega je procjenjivana srednja godišnja koncentracija radona u ispitivanim prostorijama. Prekoračenje nivoa od 300 Bq/m<sup>3</sup> registrovano je u 32 (tj. 35%) od 92 uzorkovane obrazovno-vaspitne ustanove,



odnosno u 17 (28%) škola i 15 (47%) vrtića [4]. Ovi indikatorski rezultati su upućivali na potrebu sistematskog istraživanja radona u svim školama i vrtićima u Crnoj Gori.

U Crnoj Gori ima 247 ustanova preduniverzitetskog obrazovanja, koje obavljaju obrazovno-vaspitnu djelatnost sa djecom i učenicima u 519 zgrada – 376 zgrada osnovnih i 51 zgradi srednjih škola, 81 zgradi dječijih vrtića, 4 zgrade resursnih centara i 7 zgrada domova učenika.

### 2. Materijal i metode

Prije početka mjerenja radona organizovana je obuka predstavnika svih obrazovno-vaspitnih ustanova o načinu mjerenja, o popunjavanju pratećeg upitnika i o potrebi i načinu čuvanja detektora tokom ekspozicije, a zatim je svakom od njih dodijeljen potreban broj detektora.

Mjerenje radona je obavljeno u svih 519 zgrada koje se koriste za preduniverzitetsko obrazovanje u Crnoj Gori. Radon je mjereno pasivnim detektorima, neprekidno tokom čitave školske 2016/17. godine, u svim učionicama, igraonicama, kancelarijama i spavaćim sobama u prizemlju, kao i u pojedinim prostorijama na prvom spratu. U ukupno 3793 uzorkovane radne prostorije postavljeno je 4078 detektora radona, od kojih je 3793 osnovnih i 285 kontrolnih (postavljenih u paru sa osnovnim detektorima na približno svakoj 12 lokaciji).

Zbog veoma duge, devetomjesečne ekspozicije detektora i očekivanja da koncentracije radona u nekim školskim prostorijama mogu biti veoma visoke, na nivou nekoliko hiljada Bq/m<sup>3</sup>, za mjerenja radona odabran je detektor firme Radosys, tipa RSFV, koji je namijenjen za široki opseg detekcije radona (<sup>222</sup>Rn). Taj detektor ima dva CR-39 čipa različite osjetljivosti i, prema prospektu proizvođača, ima osjetljivost mjerenja radona do 100 MBq/m<sup>3</sup>, a nije osjetljiv na toron (<sup>220</sup>Rn) i na gama zračenje.

Tokom mjerenja izgubljeno je ili oštećeno 11,4% postavljenih detektora, tako da su srednje koncentracije aktivnosti radona određene u ukupno 3343 uzorkovane prostorije u 507 zgrada preduniverzitetskog obrazovanja. Od njih je 2857 prostorija u prizemlju, u 468 zgrada, na koje se fokusira pažnja u ovom radu.

### 3. Rezultati i diskusija

Karakteristike srednjih koncentracija aktivnosti radona u prostorijama u prizemlju tokom školske godine (9 mjeseci) date su u tabeli 1. Vidi se da je devetomjesečna srednja vrijednost koncentracija radona u svih 2857 uzorkovanih prostorija veoma visoka (AM=261 Bq/m<sup>3</sup>). U 4 prostorije se srednja koncentracija radona nije mogla tačno odrediti jer je bila veća od 3600 Bq/m<sup>3</sup>, što je bila gornja granica detekcije radona detektorima RSFV. Čak jedna četvrtina svih uzorkovanih prostorija u prizemlju ima srednju devetomjesečnu koncentraciju radona iznad 300 Bq/m<sup>3</sup>, koja se preporučuje kao maksimalni referentni nivo srednje godišnje koncentracije radona u vazduhu u stanovima, zgradama sa javnim pristupom i na radnim mjestima [5].

Zbog različite veličine i oblika zgrada, u njihovom prizemlju je uzorkovan i različit broj radnih prostorija – od 1 do 30. Stoga je za radonsku karakterizaciju zgrade indikativna prosječna vrijednost koncentracija radona u svim uzorkovanim prostorijama u prizemlju zgrade. Karakteristike tih prosječnih koncentracija radona u zgradama date su u tabeli 2, odakle se vidi da je srednja vrijednost za prizemlja svih 468 zgrada veoma visoka (AM=275 Bq/m<sup>3</sup>), kao i da je čak u 29% tih zgrada ona veća od 300 Bq/m<sup>3</sup>.

**Tabela 1. Karakteristike koncentracija radona u prostorijama u prizemlju.**

Broj prostor.	AM (Bq/m <sup>3</sup> )	SD (Bq/m <sup>3</sup> )	MAX (Bq/m <sup>3</sup> )	MED (Bq/m <sup>3</sup> )	GM (Bq/m <sup>3</sup> )	GSD	Prost. sa C > 300 Bq/m <sup>3</sup>	Prost. sa C > 1000 Bq/m <sup>3</sup>
2857	261	364	>3600	142	152	2,72	25,5%	3,9%

C – koncentracija aktivnosti radona u prostoriji.

**Tabela 2. Karakteristike koncentracija radona u zgradama (samo prostorije u prizemlju, usrednjeno).**

Broj zgrada	AM (Bq/m <sup>3</sup> )	SD (Bq/m <sup>3</sup> )	MAX (Bq/m <sup>3</sup> )	MED (Bq/m <sup>3</sup> )	GM (Bq/m <sup>3</sup> )	GSD	Zgrade sa C > 300 Bq/m <sup>3</sup>	Zgrade sa C > 1000 Bq/m <sup>3</sup>
468	275	324	2810	169	174	2,58	28,8%	3,8%

C – srednja koncentracija aktivnosti radona u prizemlju zgrade.

U tabeli 3 je data deskriptivna statistika koncentracija radona u zgradama, usrednjenih po svim uzorkovanim prostorijama u prizemlju, u zavisnosti od devet regionalnih i građevinskih faktora registrovanih u upitniku koji je pratio protokol mjerenja radona: klimata, urbano/ruralnog područja, spratnosti zgrade, postojanja podruma u zgradi, debljine betonske podne ploče, godine izgradnje zgrade, građevinskog materijala, okvira prozora i načina grijanja prostorija.

U Crnoj Gori postoje tri klimata (po Kepenu): Cs – Mediteranski klimat sa vrelim i suvim ljetom i blagom zimom (Crnogorsko Primorje i dolinski dio opština Podgorica i Danilovgrad); Df – sniježno-borealni klimat bez suve sezone, sa svježim ljetom i hladnom zimom (oblast visokih planina na sjeveru Crne Gore); Cf – blagi i vlažni klimat sa toplim ljetom (ostala područja Crne Gore) [6]. Klima utiče na konstruktivne karakteristike zgrada i naročito na navike provjetravanja njihovih korisnika, pa zato iznenađuje da su najmanje prosječne koncentracije radona nađene u zgradama koje pripadaju najhladnijem klimatu (Df) u Crnoj Gori (tabela 3).

Tabela 3 pokazuje da su prosječne koncentracije radona znatno veće u zgradama u ruralnom nego u urbanom području, kao i u zgradama koje nemaju podrum nego u onima koje ga imaju, što je sve očekivano i u skladu sa nalazima u drugim zemljama [7, 8]. Zgrade sa jednim i dva nivoa imaju jednake prosječne koncentracije radona u prizemlju, dok je kod veće spratnosti ta koncentracija radona niža.

Zgrade preduniverzitetskog obrazovanja izgrađene u periodu 1980-1999. godine, a naročito one izgrađene poslije 2000. godine, imaju znatno niže prosječne koncentracije radona u prizemlju nego starije zgrade. Prosječne koncentracije radona u prizemlju najveće su u zgradama od kamena i najniže u zgradama od drveta (slično je u stambenim zgradama u Španiji i Grčkoj [9, 10]), a praktično su jednake u zgradama izgrađenim od betona i opeke ili njihove kombinacije.

Prosječne koncentracije radona u prizemlju veće su u zgradama koje imaju Al ili PVC ramove prozora nego drvene, kao i u zgradama u kojima je grijanje na drva nego u onima u kojima je električno ili centralno.

Što se tiče debljine betonske podne ploče, kod razmatrane tri kategorije ne uočava se statistički značajna razlika u koncentracijama radona u prizemlju zgrada.

**Tabela 3. Koncentracije radona u prizemlju zgrada, zavisno od devet regionalnih i građevinskih faktora.**

<b>Faktori i kategorije</b>	<b>Broj zgrada</b>	<b>AM (SE) (Bq/m<sup>3</sup>)</b>	<b>MED (Bq/m<sup>3</sup>)</b>	<b>MAX (Bq/m<sup>3</sup>)</b>	<b>GM (Bq/m<sup>3</sup>)</b>	<b>GSD</b>
<b>Klimat</b>						
Cs	164	279 (28)	164	2810	166	2,73
Cf	274	284 (19)	180	2494	185	2,52
Df	30	168 (24)	131	542	126	2,19
<b>Područje</b>						
urbano	218	232 (14)	165	1219	161	2,39
ruralno	250	312 (25)	176	2810	185	2,74
<b>Spratnost zgrade</b>						
1 sprat (prizemlje)	256	278 (20)	158	2494	169	2,72
2 sprata	159	288 (28)	184	2810	188	2,44
3 sprata i više	53	224 (30)	160	1219	156	2,32
<b>Podrum</b>						
ima	46	166 (24)	113	749	118	2,21
nema	418	288 (16)	180	2810	182	2,60
<b>Debljina podne ploče</b>						
0 (nema ploče)	65	317 (51)	210	2494	191	2,69
≤ 5 cm	72	290 (41)	150	1956	167	2,89
> 5 cm	290	253 (17)	160	2810	166	2,48
<b>Godina izgradnje</b>						
prije 1900	16	408 (129)	190	1889	215	3,28
1900 - 1944	34	337 (63)	186	1382	211	2,61
1945 - 1963	114	316 (28)	232	2040	216	2,48
1964 - 1979	125	306 (37)	176	2810	185	2,63
1980 - 1999	120	222 (22)	132	1551	140	2,62
2000 i kasnije	56	161 (15)	136	587	128	2,07
<b>Materijal</b>						
beton	65	249 (28)	169	1053	171	2,42
opeka	62	243 (34)	138	1551	153	2,64
beton/opeka	116	255 (32)	162	2810	167	2,39
kamen	103	354 (39)	204	2494	214	2,79
kamen/beton/opeka	66	284 (36)	199	2040	195	2,37
drvo	24	170 (36)	92	698	103	2,78
<b>Okvir prozora</b>						
drvo	181	207 (23)	123	2494	127	2,53
PVC ili Al	255	321 (21)	212	2810	212	2,51
<b>Način grijanja</b>						
drvo, ugalj	210	305 (26)	164	2494	183	2,69
centralno, električno	247	254 (17)	174	2810	170	2,48

SE – standardna greška.

#### 4. Zaključci

Srednja vrijednost koncentracija radona u 2857 uzorkovanih radnih prostorija u prizemlju zgrada koje se koriste za preduniverzitetsko obrazovanje i vaspitanje u Crnoj Gori je veoma visoka ( $AM=261 \text{ Bq/m}^3$ ).

U 28,8% od ispitivanih 468 zgrada je prosječna vrijednost koncentracija radona u prostorijama u prizemlju veća od  $300 \text{ Bq/m}^3$ , a u 3,8% zgrada je ona veća i od  $1000 \text{ Bq/m}^3$ .

Deskriptivna statistika pokazuje da su prosječne koncentracije radona u prizemlju zgrada najmanje u najhladnijem klimatu u Crnoj Gori, da su one manje u urbanom nego u ruralnom području, da su najmanje u zgradama izgrađenim poslije 1980. godine, kao i da su manje u zgradama koje imaju podrum i u onima koje imaju više od dva sprata. Prosječne koncentracije radona u prizemlju najveće su u zgradama od kamena, a veće su u zgradama koje imaju Al ili PVC ramove prozora nego u onima koje imaju drvene ramove, kao i u zgradama u kojima je grijanje na drva nego u onima u kojima je ono električno ili centralno.

#### 5. Literatura

- [1] P. Vukotic, N. Antovic, A. Djurovic, R. Zekic, N. Svrkota, T. Andjelic, R. Svrkota, R. Mrdak, N. Bjelica, T. Djurovic, A. Dlabac, M. Bogicevic. Radon survey in Montenegro – A base to set national reference and “urgent action” level. *J. Environ. Radioactiv.* 196, 2019, 232–239.
- [2] P. Vukotic, N. Antovic, R. Zekic, N. Svrkota, T. Andjelic, R. Svrkota, R. Mrdak, A. Djurovic, A. Dlabac, N. Bjelica, T. Djurovic, M. Bogicevic. Main findings from radon indoor survey in Montenegro. *Radiat. Prot. Dosim.* Published on March 06, 2019 as doi:10.1093/rpd/ncz022 (Epub ahead of print).
- [3] P. Vukotić, N. Antović, R. Zekić, N. Svrkota, T. Anđelić, R. Svrkota, R. Mrdak, A. Đurović, A. Dlabać, N. Bjelica, T. Đurović, M. Bogićević. Istraživanje radona u stanovima u Crnoj Gori. *Zbornik radova XXIX Simpozijuma Društva za zaštitu od zračenja Srbije i Crne Gore*, 27-29. septembar 2017, Srebrno jezero - Srbija, 161-166.
- [4] Izvještaj o ispitivanju sadržaja radionuklida u životnoj sredini Crne Gore (godišnji izvještaji, 1999 – 2018 g.), Centar za ekotoksikološka ispitivanja, Podgorica.
- [5] Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. IAEA Safety Standards Series, No. GSR Part 3. IAEA, Vienna, 2014.
- [6] M. Burić, B. Micev, L. Mitrović. Atlas klima u Crnoj Gori. Crnogorska akademija nauka i umjetnosti, Podgorica, 2012.
- [7] D.D. Hauri, A. Huss, F. Zimmermann, C.E. Kuehni, M. Rössli. A prediction model for assessing residential radon concentration in Switzerland. *J. Environ. Radioactiv.* 112, 2012, 83-89.
- [8] K. Ivanova, Z. Stojanovska, M. Tsenova, B. Kunovska. Building-specific factors affecting indoor radon concentration variations in different regions in Bulgaria. *Air Qual. Atmos. Health.* 10, 2017, 1151-1161.
- [9] J.M. Barros-Dios, A. Ruano-Ravina, J. Gastelu-Iturri, A. Figueiras. Factors

underlying residential radon concentration: results from Galicia, Spain. *Environ. Res.* 103, 2007, 185–190.

- [10] D. Nikolopoulos, S. Kottou, A. Louizi, E. Petraki, E. Vogiannis, P.H. Yannakopoulos. Factors affecting indoor radon concentrations of Greek dwellings through multivariate statistics. *J. Phys. Chem. Biophys.* 4 (2), 2014.

### **RADON IN MONTENEGRIN SCHOOLS AND KINDERGARTENS**

**Perko VUKOTIĆ<sup>1</sup>, Ranko ZEKIĆ<sup>2</sup>, Tomislav ANĐELIĆ<sup>2</sup>, Nikola SVRKOTA<sup>2</sup>,  
Andrija ĐUROVIĆ<sup>3</sup> and Aleksandar DLABAČ<sup>4</sup>**

1) *Montenegrin Academy of Sciences and Arts, Podgorica, Montenegro,*  
[pvukotic@canu.ac.me](mailto:pvukotic@canu.ac.me)

2) *Centre for Ecotoxicological Research, Podgorica, Montenegro,*  
[ranko.zekic@ceti.co.me](mailto:ranko.zekic@ceti.co.me), [tomislav.andjelic@ceti.co.me](mailto:tomislav.andjelic@ceti.co.me), [nikola.svrkota@ceti.co.me](mailto:nikola.svrkota@ceti.co.me)

3) *Deloitte d.o.o., Podgorica, Montenegro,* [djandrija@gmail.com](mailto:djandrija@gmail.com)

4) *University of Montenegro, Centre for Nuclear Competence, Podgorica, Montenegro,*  
[adlabac@t-com.me](mailto:adlabac@t-com.me)

#### **ABSTRACT**

In the framework of the national project MNE9005, funded by the International Atomic Energy Agency and the Government of Montenegro, radon was measured with passive detectors (Radosys, RSFV type) during the academic year 2016/17 in the 3793 working rooms in all 519 buildings used in the pre-university education in Montenegro – buildings of primary and high schools, kindergartens, resource centers and student dormitories. During the 9-month exposure 11.4% of radon detectors were lost or damaged. Results of radon measurement in the 2857 ground-floor rooms in 468 buildings are presented in this paper. Average 9-month radon activity concentrations in all these rooms are AM=261 Bq/m<sup>3</sup> and GM=152 Bq/m<sup>3</sup>, while in 25.5% of the rooms they are above a level of 300 Bq/m<sup>3</sup>. Descriptive statistics of average radon concentrations in ground-floor rooms of the buildings indicates that the factors: climate, area (urban/rural), age of building, number of stories, building materials, basement, window frames and type of heating have influence on radon levels.

## DISTRIBUCIJA KONCENTRACIJE RADONA PO SPRATNOSTI STAMBENIH ZGRADA

**Vladimir UDOVIČIĆ<sup>1</sup>, Dimitrije MALETIĆ<sup>1</sup>, Aleksandar DRAGIĆ<sup>1</sup>,  
Radomir BANJANAC<sup>1</sup>, Dejan JOKOVIĆ<sup>1</sup>, Nikola VESELINOVIĆ<sup>1</sup>,  
Mihailo SAVIĆ<sup>1</sup>, David KNEŽEVIĆ<sup>1</sup> i Maja EREMIĆ-SAVKOVIĆ<sup>2</sup>**

- 1) *Institut za fiziku u Beogradu, Institut od nacionalnog značaja za Republiku Srbiju, Beograd, Srbija, [udovic@ipb.ac.rs](mailto:udovic@ipb.ac.rs), [maletic@ipb.ac.rs](mailto:maletic@ipb.ac.rs), [dragic@ipb.ac.rs](mailto:dragic@ipb.ac.rs), [banjanac@ipb.ac.rs](mailto:banjanac@ipb.ac.rs), [yokovic@ipb.ac.rs](mailto:yokovic@ipb.ac.rs), [veselinovic@ipb.ac.rs](mailto:veselinovic@ipb.ac.rs), [msavic@ipb.ac.rs](mailto:msavic@ipb.ac.rs), [davidk@ipb.ac.rs](mailto:davidk@ipb.ac.rs)*
- 2) *Direktorat za radijacionu i nuklearnu sigurnost i bezbednost Srbije, Beograd, Srbija, [eremic.savkovic@srbatom.gov.rs](mailto:eremic.savkovic@srbatom.gov.rs)*

### SADRŽAJ

*Dobro je poznato da je jedan od faktora koji utiče na varijabilnost radona u zatvorenom prostoru spratnost stambenih zgrada. Imajući u vidu činjenicu da glavni izvor radona u zatvorenim prostorijama potiče iz zemljišta, očekuje se smanjenje koncentracije radona na višim spratovima. Na višim spratovima dominantan izvor radona potiče od građevinskog materijala, a u nekim slučajevima može doći do odstupanja od ove opšte utvrđene pravilnosti. S druge strane, varijabilnost radona zbog spratnosti, posebno u velikim gradovima, sa mnogo većim brojem visokih zgrada i gustom naseljenosti u poređenju sa ruralnim sredinama, može uticati na procenu kolektivne doze koja potiče od radona. U tom smislu, a u svrhu naših istraživanja, izabrali smo jednu tipičnu porodičnu kuću sa potkrovljem i jedan šesnaestospratni soliter. Merenje koncentracije radona u odabranim stambenim objektima izvršeno je sa dva aktivna uređaja. Jedan je bio fiksiran u dnevnoj sobi u prizemlju, a drugi je menjao poziciju po spratovima u stambenim zgradama. Svaki merni ciklus na datom spratu trajao je sedam dana uz vreme uzorkovanja od dva sata. U ovom radu detaljno je urađena analiza dobijenih rezultata.*

### 1. Uvod

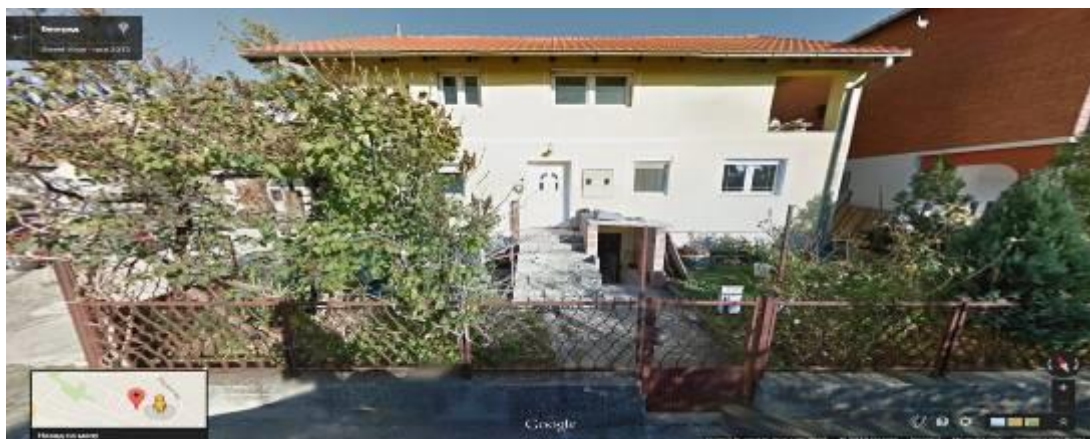
Izvori radona u stambenim i poslovnim zgradama su, pre svega iz zemljišta, građevinskog materijala i vode. S obzirom na prirodu nastanka i svih pomenutih izvora, koncentracija radona je veća u prizemnim prostorijama u odnosu na stanove na višim spratovima stambenih objekata. U literaturi se može pronaći dosta radova koji se bave uticajem raznih faktora na nivo i varijabilnost radona u zatvorenim prostorijama, pa između ostalih i uticajem spratnosti [1-4]. U slučaju velikih stambenih objekata sa većim brojem spratova, može se uočiti odstupanje od opšte pravilnosti, jer je na višim spratovima dominantan izvor radona građevinski materijal, te se mogu uočiti povećane koncentracije radona u odnosu na situaciju na nižim spratovima. U tom smislu, urađena su merenja radona u dva tipična stambena objekta. Izbor zgrada je baziran na rezultatima iz monografije „Nacionalna tipologija stambenih zgrada Srbije“ grupe autora sa Arhitektonskog fakulteta [5]. S obzirom na specifičnosti gradnje u Srbiji, broj



tipova zgrada je tako sveden na šest kategorija, dve za porodično stanovanje i četiri kategorije za kolektivno stanovanje; porodično stanovanje: 1. slobodnostojeća kuća, 2. kuća u nizu i kolektivno stanovanje: 3. slobodnostojeća zgrada, 4. zgrada u nizu, 5. zgrada u nizu tipa lamele (ponavlja se više zgrada rađenih po istom projektu, zgrada sa više ulaza...) i 6. soliter (slobodnostojeća zgrada velike spratnosti). Pokazuje se da više od 97% svih stambenih zgrada čine samostojeće porodične kuće. Takođe, za sve definisane tipove zgrada broj spratova se kreće od jednog do osam, pri čemu su samostojeće porodične kuće uglavnom prizemne (37%) ili prizemne sa potkrovljem (26%), dok je veoma niska zastupljenost kuća koje imaju više od dva sprata (5%), sa prosečnom visinom porodičnih zgrada od 1,4 [5].

### 2. Eksperimentalna postavka

Izabrana su dva stambena objekta, jedan iz grupe za porodično stanovanje i jedan soliter iz grupe za kolektivno stanovanje. Porodična kuća (slika 1) ima karakterističan stil gradnje u kome se kuća gradi više godina uz konstantno dograđivanje i nadogradnju, što potencijalno može biti izvor ulaska radona u takve kuće. Kuća ima podrum i izgrađena je od standardnih materijala (cigla-blok, beton, malter). Na kraju je urađena i izolacija korišćenjem stiropora debljine 5 cm. U kući su već vršena višegodišnja merenja koncentracije radona različitim metodama, o čemu je do sada publikovano nekoliko naučnih radova [6-8].



Slika 1. Tipična porodična kuća u Beogradu.

Iz grupe stambenih zgrada za kolektivno stanovanje izabran je soliter na Novom Beogradu (slika 2). Izgrađen je šezdesetih godina prošlog veka, blokovskog tipa. Soliter ima podrum, dok se u prizemlju nalaze lokali i poslovne prostorije. Stanovi se nalaze od prvog sprata pa naviše. Soliter ima 16. spratova.





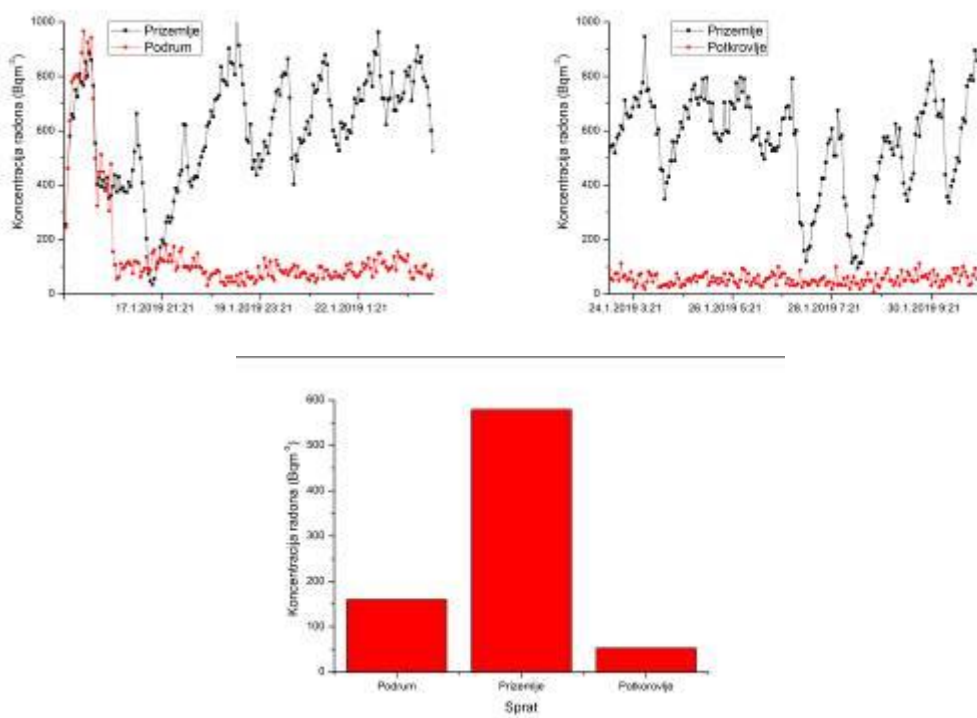
**Slika 2. Soliter na Novom Beogradu.**

Vremenske serije merenih koncentracija radona u ispitivanim stambenim objektima dobijene su pomoću dva aktivna uređaja SN1029 i SN1030 (proizvođača Sun Nuclear Corporation). To su merni uređaji jednostavne konstrukcije i primene u praksi. U suštini, radi se o brojaču sa dodatkom senzora za merenje meteoroloških parametara. Nedostatak uređaja je nemogućnost merenja koncentracije radona u zemljištu i vodi. Operater može podesiti vremenske sekvence od 0,5 do 24 sati. Jedan ciklus merenja može trajati 1000 sati ili ukupno 720 vremenskih sekvenci (broj sukcesivnih merenja, odnosno tačaka u vremenskoj seriji). Uređaji su bili podešeni da rade u vremenskoj sekvenci od 2 sata. Jedan je bio fiksiran u dnevnoj sobi u prizemlju, a drugi je menjao poziciju po spratovima u stambenim zgradama. Svaki merni ciklus na datom spratu trajao je sedam dana.

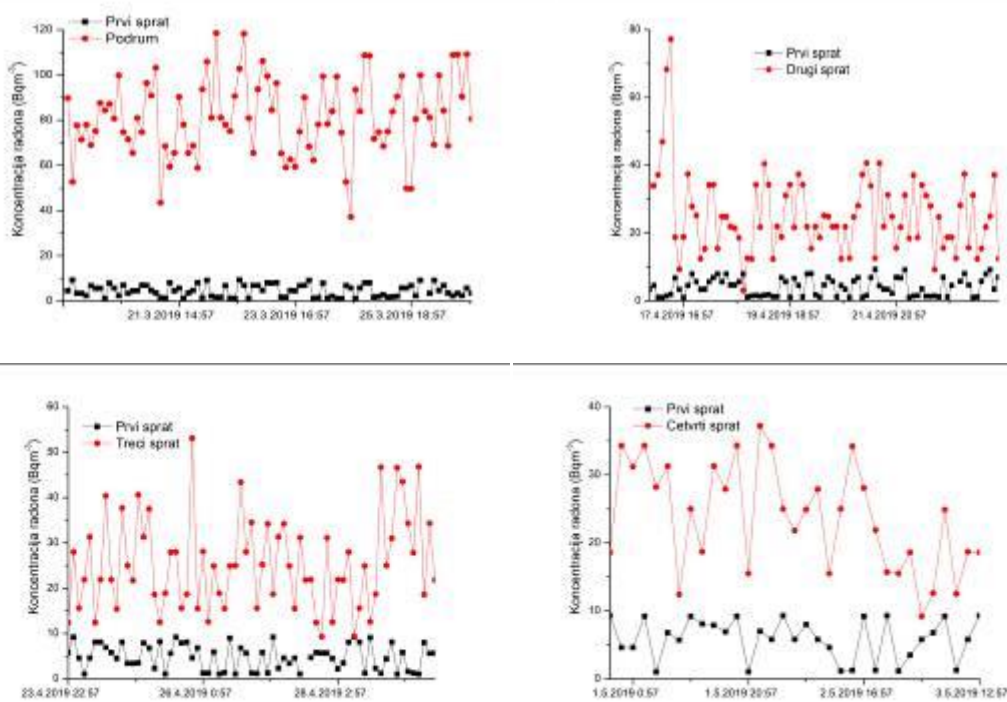
### **3. Rezultati i diskusija**

Na slikama 3 i 4 su prikazani dobijeni rezultati merenja, kako vremenske serije tako i usrednjene koncentracije radona u ispitivanim stambenim objektima za zadati ciklus merenja od sedam dana.

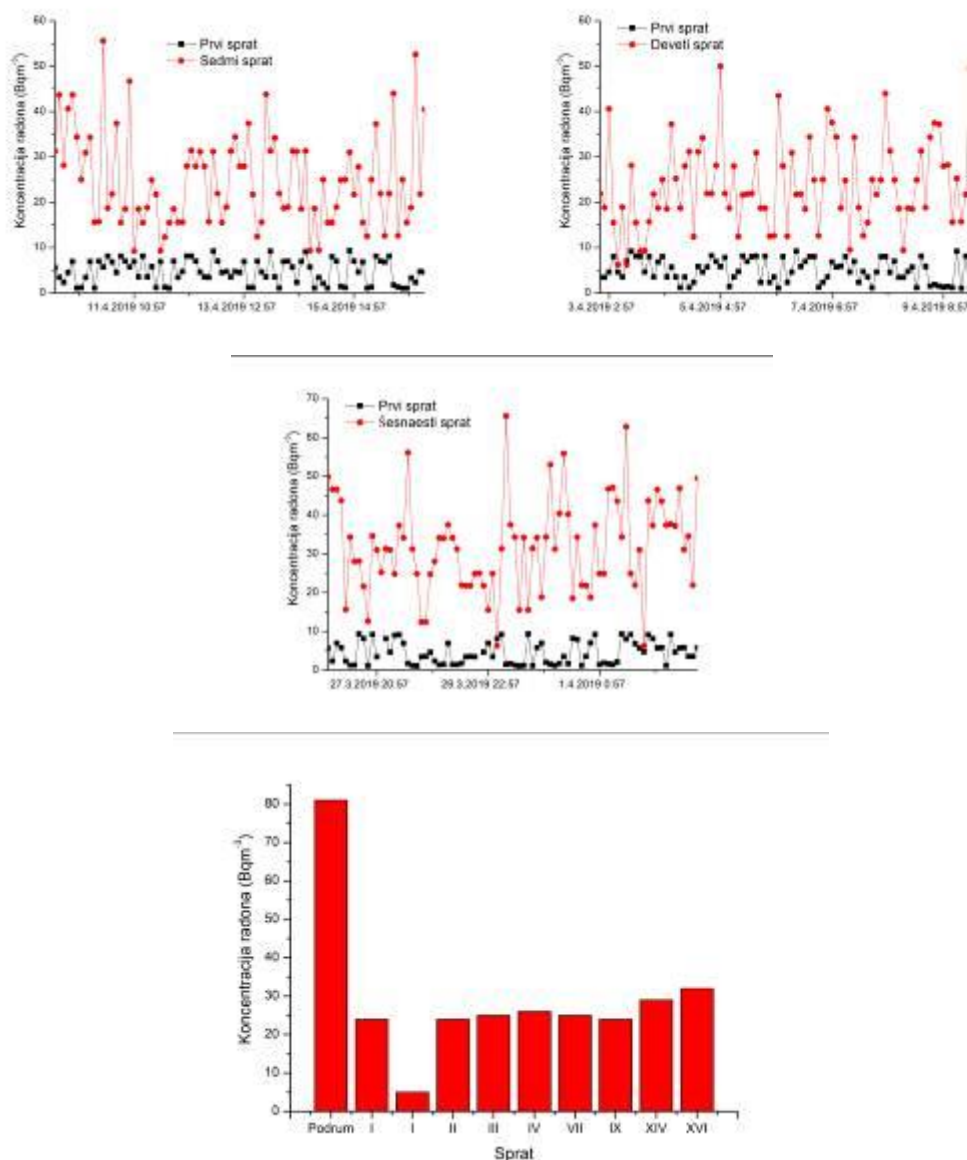
S obzirom da je detektor koji je sve vreme stajao u prizemlju solitera pokazao neobično niske vrednosti za koncentraciju radona, uradili smo uporedno merenje sa drugim detektorom u susednom, kao i u stanu u kome se nalazio fiksirani detektor. Dobijeni rezultati pokazuju izvesnu razliku, ali s obzirom da se radi o domenu izrazito niskih nivoa radona, pretpostavka je da su i merne nesigurnosti velike.



Slika 3. Vremenske serije i srednja koncentracija radona po spratovima u porodičnoj kući.



Slika 4. Vremenske serije i srednja koncentracija radona po spratovima u soliteru.



Slika 4. Nastavak.

#### 4. Zaključak

Dobijeni rezultati pokazuju da je ponašanje radona u dva različita stambena objekta dijametralno suprotno. U porodičnoj kući je moguće uočiti izrazite varijacije koncentracije radona uz jednodnevnu periodiku. Takođe, interesantan je odnos koncentracije radona u prizemlju, u odnosu na podrum kuće, koji je suprotan od uobičajene situacije kod kuća sa podrumom. Ovo inverzno ponašanje može se protumačiti činjenicom da podrum ne prekriva celo prizemlje već njegov manji deo. Ostali deo prizemlja je pokriven betonskom pločom kao podlogom, ali sa pukotinama i lošim spojem sa zidovima predstavlja potencijalni izvor povišenog radona. Kod solitera je situacija suprotna i može se smatrati da već od prvog sprata dominantan izvor radona je građevinski materijal. Čak se može uočiti blagi rast srednje koncentracije radona na

višim spratovima. No, dobijeni rezultati u soliteru se mogu predvideti, a na osnovu rada grupe autora koji su odredili interno izlaganje iz građevinskog materijala, koji se koristi u Srbiji, a koje potiče od eshalacije radona i torona [9].

### 5. Zahvalnica

Ovaj rad je realizovan uz podršku Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije u okviru projekta pod brojem III43002.

### 6. Literatura

- [1] F. Bochicchio, G. Campos-Venuti, S. Piermattei, C. Nuccetelli, S. Risica, L. Tommasino, G. Torri, M. Magnoni, G. Agnesod, G. Sgorbati, M. Bonomi, L. Minach, F. Trotti, M.R. Malisan, S. Maggiolo, L. Gaidolfi, C. Giannardi, A. Rongoni, M. Lombardi, G. Cherubini, S. D'Ostilio, C. Cristofaro, M. Pugliese, V. Martucci, A. Crispino, P. Cuzzocrea, A. Sansone Santamaria, M. Cappai. Annual average and seasonal variations of residential radon concentration for all the Italian Regions. *Radiat. Meas.* 40, 2005, 686-694.
- [2] H. Friedmann. Final Results of the Austrian Radon Project. *Health Phys.* 89(4), 2005, 339-348.
- [3] R. Borgoni, D. De Francesco, D. De Bartolo, N. Tzavidis. Hierarchical modeling of indoor radon concentration: how much do geology and building factors matter? *J. Environ. Radioact.* 138, 2014, 227-237.
- [4] M. Lorenzo-González, A. Ruano-Ravina, J. Peón, M. Piñeiro, J. Miguel Barros-Dios. Residential radon in Galicia: a cross-sectional study in a radon-prone area. *J. Radiol. Prot.* 37(3), 2017, 728-741.
- [5] M. Jovanović Popović, D. Ignjatović, A. Radivojević, A. Rajčić, N. Ćuković Ignjatović, Lj. Đukanović, M. Nedić. National Typology of Residential Buildings in Serbia, Faculty of Architecture University of Belgrade, Belgrade, 2013, ISBN 978-86-7924-102-3.
- [6] V. Udovičić, D. Maletić, R. Banjanac, D. Joković, A. Dragić, N. Veselinović, J. Živanović, M. Savić, S. Forkapić. Multiyear Indoor Radon Variability in a Family House – a Case Study in Serbia. *Nucl. Tech. Radiat. Protect.* XXXIII (2), 2018, 174-179.
- [7] D. Maletić, V. Udovičić, R. Banjanac, D. Joković, A. Dragić, N. Veselinović, J. Filipović. Comparison of multivariate classification and regression methods for indoor radon measurements. *Nucl. Tech. Radiat. Protect.* 29, 2014, 17-23.
- [8] J. Filipović, D. Maletić, V. Udovičić, R. Banjanac, D. Joković, M. Savić, N. Veselinović. The use of multivariate analysis of the radon variability in the underground laboratory and indoor environment. *Nukleonika* 61(3), 2016, 357-360.
- [9] P. Ujić, I. Ćeliković, A. Kandić, I. Vukanac, M. Đurašević, D. Dragosavac, Z. S. Žunić. Internal exposure from building materials exhaling  $^{222}\text{Rn}$  and  $^{220}\text{Rn}$  as compared to external exposure due to their natural radioactivity content. *Appl. Radiat. Isot.* 68, 2010, 201–206.

## INDOOR RADON DISTRIBUTION DUE TO FLOOR LEVEL IN THE RESIDENTIAL BUILDINGS

**Vladimir UDOVICIC<sup>1</sup>, Nikola VESELINOVIC<sup>1</sup>, Dimitrije MALETIC<sup>1</sup>,  
Radomir BANJANAC<sup>1</sup>, Aleksandar DRAGIC<sup>1</sup>, Dejan JOKOVIC<sup>1</sup>,  
Mihailo SAVIC<sup>1</sup>, David KNEZEVIC<sup>1</sup> and Maja EREMIC-SAVKOVIC<sup>2</sup>**

*1) Institute of Physics Belgrade, University of Belgrade, Belgrade, Serbia,  
[udovicic@ipb.ac.rs](mailto:udovicic@ipb.ac.rs), [maletic@ipb.ac.rs](mailto:maletic@ipb.ac.rs), [dragic@ipb.ac.rs](mailto:dragic@ipb.ac.rs), [banjanac@ipb.ac.rs](mailto:banjanac@ipb.ac.rs),  
[yokovic@ipb.ac.rs](mailto:yokovic@ipb.ac.rs), [veselinovic@ipb.ac.rs](mailto:veselinovic@ipb.ac.rs), [msavic@ipb.ac.rs](mailto:msavic@ipb.ac.rs), [davidk@ipb.ac.rs](mailto:davidk@ipb.ac.rs)*

*2) Serbian Radiation and Nuclear Safety and Security Directorate, Belgrade,  
Serbia, [eremic.savkovic@srbatom.gov.rs](mailto:eremic.savkovic@srbatom.gov.rs)*

### ABSTRACT

It is well known that one of the factors influencing indoor radon variability is the floor level of residential buildings. Bearing in mind the fact that the main source of indoor radon is from radon in soil gas, a radon concentration on upper floors is expected to decrease. On the upper floors, the dominant source of radon originates from building materials, and in some cases there may be deviations from this generally established regularity. On the other hand, radon variability due to floor level, especially in large cities, with a much larger number of high buildings and density of population compared to rural areas, can affect the estimation of the collective dose derived from radon. In this sense, and for the purpose of our research, we chose a typical family house with a loft and sixteen high-rise building. Indoor radon measurements in selected residential buildings were done with two active devices. One was fixed in the living room on the ground floor, while the other was changing the position on the floors in residential buildings. Each measuring cycle on the floor lasted for seven days with a sampling time of two hours. In this paper, an analysis of the obtained results has been done in detail.

## MERENJE KONCENTRACIJE RADONA NA TERITORIJI GRADA KRAGUJEVCA

**Biljana MILENKOVIĆ, Jelena M. STAJIĆ, Vladimir MARKOVIĆ, Nenad STEVANOVIĆ, Dragana KRSTIĆ i Dragoslav NIKEZIĆ**

*Univerzitet u Kragujevcu, Prirodno-matematički fakultet, Kragujevac, Srbija,*

*[bmilenkovic@kg.ac.rs](mailto:bmilenkovic@kg.ac.rs), [stajicjelenal1052012@gmail.com](mailto:stajicjelenal1052012@gmail.com),*

*[vmarkovic@kg.ac.rs](mailto:vmarkovic@kg.ac.rs), [nstevanovic@kg.ac.rs](mailto:nstevanovic@kg.ac.rs), [dragana@kg.ac.rs](mailto:dragana@kg.ac.rs), [nikezic@kg.ac.rs](mailto:nikezic@kg.ac.rs)*

### SADRŽAJ

*U radu su predstavljene rezultati merenja koncentracije radona u stambenim objektima na teritoriji grada Kragujevca. Merenja su vršena na 22 lokacije, pomoću Makrofol (UFO) detektora, tokom dva uzastopna šestomesečna perioda: letnji (april – oktobar) i zimski (oktobar – april). Srednja godišnja koncentracija radona  $\pm$  standardna devijacija iznosi  $42,4 \pm 17,2 \text{ Bqm}^{-3}$ . Shapiro-Wilk test pokazuje log-normalnu raspodelu izmerenih vrednosti. Koeficijent varijacije za dva perioda merenja kreće se u opsegu od 1,3 do 67,1%. Ispitan je uticaj karakteristika objekata (spratnost, vrsta građevinskog materijala, godina izgradnje itd.) na izmerene vrednosti. Godišnja efektivna doza od radona se kreće u opsegu od 0,45 do 2,08 mSv.*

### 1. Uvod

Prirodni, radioaktivni gas radon ( $^{222}\text{Ra}$ ) nastaje raspadom radijuma ( $^{226}\text{Ra}$ ), u radioaktivnom nizuprimordijalnog radionuklida urana  $^{238}\text{U}$ , koji je u manjoj ili većoj meri prisutan u svim prirodnim materijalima. Zahvaljujući svojoj hemijskoj inertnosti i relativno dugom vremenu poluraspada ( $T_{1/2}=3,824$  dana), radon ima veliku mogućnost migracije od mesta nastanka, što uzrokuje njegovo prisustvo u atmosferi. Ekshalacija radona iz materijala u atmosferu zavisi od prisutne koncentracije  $^{226}\text{Ra}$ , ali i od osobina samog materijala kao što su mineralni sastav, poroznost, vlažnost, itd [1-3]. Najvažniji izvori radona u zatvorenim prostorijama su tlo ispod i u okolini posmatranog objekta, građevinski materijali korišćeni u izgradnji, kao i gas i voda koji se koriste u domaćinstvu.

Radon se smatra drugim najvažnijim uzročnikom kancera pluća, posle duvanskog dima [4]. Radon emituje alfa-česticu energije 5,49 MeV, a zatim se preko niza izotopa polonijuma, olova i bizmuta raspada do stabilnog  $^{206}\text{Pb}$ . Zdravstveni efekti radona potiču prvenstveno od alfa, beta i gama zračenja, koja nastaju pri raspadu njegovih kratkoživećih potomaka. Potomci radona imaju mogućnost taloženja u plućima, pa se procenjuje da čak 99% inhalacione doze ne potiče od samog radona, već od radioaktivnih izotopa polonijuma, bizmuta i olova [5].

U radu su predstavljene rezultati merenja koncentracije radona na 22 lokacije u stambenim objektima na teritoriji grada Kragujevca i okoline. Rezultati su upoređeni sa rezultatima Nacionalnog akcionog programa merenja radona na istim lokacijama.



## 2. Metod

U Srbiji je 2014-2015. godine sproveden "Nacionalni akcioniprogram za merenje koncentracija radona u zatvorenim prostorijama". Uporedo sa ovim merenjem, na 22 lokacije postavljeni su diskriminativni radon/toron pasivni detektori (UFO), proizvedeni u Nacionalnom Institutu za Radiološke Nauke (NIRS, Chiba) u Japanu. Izlaganje je vršeno tokom dva šestomesečna perioda: letnji (april – oktobar) i zimski (oktobar – april).

UFO detektori se sastoje iz plastičnog kućišta sastavljenog oddve hemisfere poluprečnika 120 i 75 mm. Vazduh ulazi u kućište detektora kroz filter-papir koji sprečava prolazakradonovih i toronovih potomaka, a dve hemisfere povezuje otvor malog promera koji omogućava da samo radon ulazi u donju hemisferu. Između hemisfera postavljeni su polikarbonatni trag-detektori koji su nakon izlaganja podvrgnuti procesu hemijskog (30 min) i elektrohemijskog (3 h) nagrivanja u rastvoru KOH (1N i 8N). Elektrohemijsko nagrivanje je vršeno na temperaturi od 30°C i naponu od 800 V, pri frekvenciji od 2 kHz. Koncentracija radona je određivana na osnovu gustine tragova na polikarbonatnim detektorima, korišćenjem kalibracionog koeficijenta  $k_{Rn} = (0,026 \pm 0,003) \text{ (tr cm}^{-2}\text{)/(Bq m}^{-3} \text{ d)}$  [6]. Statistička analiza rezultata je obavljena korišćenjem SPSS softverskog paketa.

## 3. Rezultati i diskusija

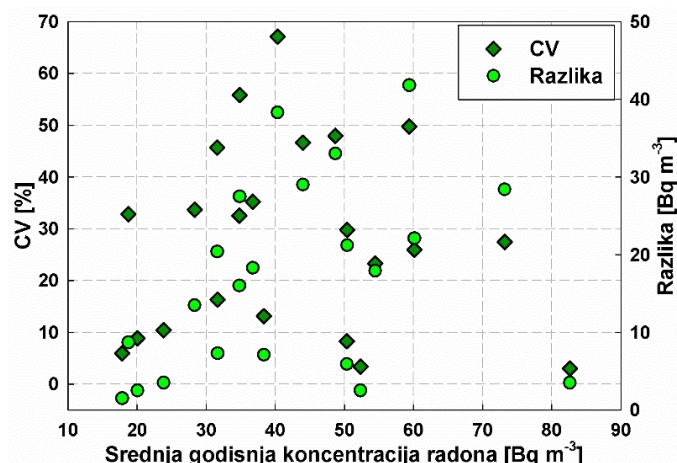
U tabeli 1 prikazana je deskriptivna statistika rezultata merenja koncentracije radona za period 1 (letnji) i period 2 (zimski), kao i srednje godišnje vrednosti koje se kreću u opsegu od 17,9 do 82,7 Bq m<sup>-3</sup>. Srednja godišnja koncentracija od 42,4 Bq m<sup>-3</sup> se dobro slaže sa ranije merenim vrednostima na teritoriji grada Kragujevca [6]. Shapiro-Wilk test pokazuje log-normalnu raspodelu izmerenih vrednosti.

**Tabela 1. Deskriptivna statistika izmerenih koncentracija radona i godišnje efektivne doze.**

	Period 1 (Bq m <sup>-3</sup> )	Period 2 (Bq m <sup>-3</sup> )	Godišnja (Bq m <sup>-3</sup> )	(mSv y <sup>-1</sup> )
<b>Min</b>	17,1	14,4	17,9	0,45
<b>Max</b>	80,9	87,4	82,7	2,08
<b>Srednja</b>	42,5	42,3	42,4	1,07
<b>Medijana</b>	39,2	42,4	39,4	0,99
<b>SD</b>	18,1	22,1	17,2	0,43
<b>Skewness</b>	0,512	0,695	0,589	0,577
<b>Kurtosis</b>	-0,747	-0,359	0,070	0,051

Koeficijent varijacije, CV (računat kao odnos standardne devijacije i aritmetičke sredine) za vrednosti merene tokom dva perioda kreće se u opsegu od 1,3 do 67,1% (slika 1). Wilcoxon test nije pokazao statistički značajnu razliku između koncentracija izmerenih tokom letnjeg i zimskog perioda (*Sig* = 0,935).

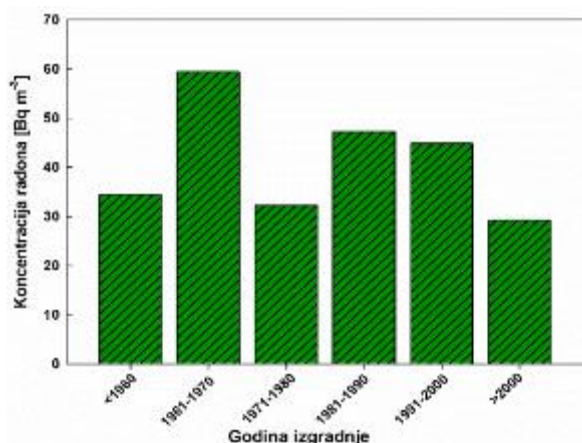




**Slika 1. Koeficijenti varijacije (leva osa) i apsolutne razlike (desna osa) između koncentracija radona merenih u letnjem i zimskom periodu.**

Većina objekata u kojim je vršeno merenje su porodične kuće, sa betonskim podovima i zidovima sagrađenim od cigle ili betonskih blokova. Očekivano, koncentracije izmerene u prostorijama lociranim u podrumima ili prizemlju su značajno veće od koncentracija merenih na višim spratovima (Studentov t-test daje  $Sig = 0,002$ ), što ukazuje na činjenicu da je tlo ispod objekata dominantni izvor radona u zatvorenim prostorijama. Ipak, t-test nije potvrdio da postoji statistički značajna razlika između koncentracija radona merenih u prizemljima objekata sa i bez podruma ( $Sig = 0,783$ ). Na određenom broju lokacija detektori su postavljeni u dve različite prostorije iste spratnosti. Koncentracije radona izmerene u različitim prostorijama istih objekata se ne razlikuju značajno.

Na slici 2 prikazana je srednja vrednost izmerenih koncentracija radona za različite periode izgradnje objekata. Nešto viša koncentracija je zapažena kod objekata izgrađenih u periodu 1961-1970, ali ova razlika nije statistički značajna.



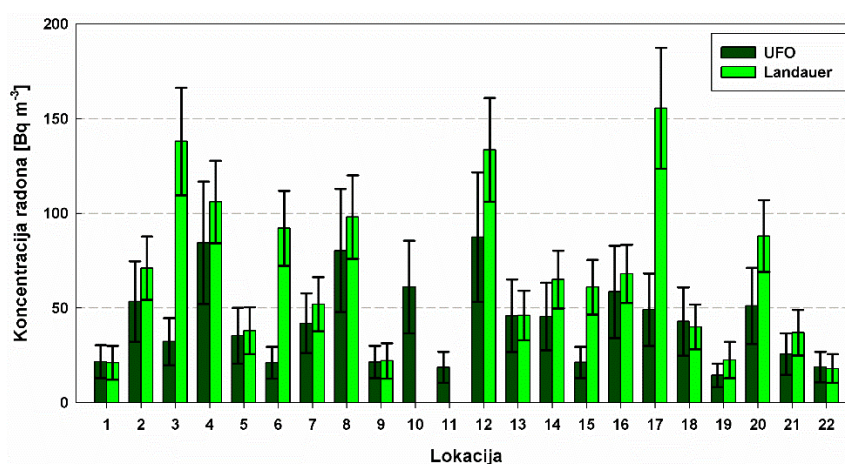
**Slika 2. Srednja godišnja koncentracija radona u zavisnosti od perioda izgradnje objekta**

Godišnja efektivna doza od radona  $E_{Rn}$  ( $mSv y^{-1}$ ) računata je po formuli:

$$E = F \cdot t \cdot DCF$$

gde je  $A_{Rn}$  srednja godišnja koncentracija radona ( $Bq\ m^{-3}$ );  $F_{Rn} = 0,4$  je ravnotežni faktor između radona i potomaka [7];  $t = 7000\ h$  je vreme boravka u zatvorenim prostorijama u toku jedne godine;  $DCF_{Rn} = 9\ nSv\ (Bq\ h\ m^{-3})^{-1}$  je dozni konverzioni faktor [8]. Izračunata godišnja efektivna doza kreće se u opsegu od 0,45 do 2,08 mSv.

Na Slici 3 je prikazano poređenje rezultata UFO detektora sa rezultatima Nacionalnog akcionog programa u kome su koncentracije radona merene Landauer detektorima na istim lokacijama, tokom zimskog perioda (Period 2). Sa slike se može videti da su na lokacijama 3, 6, 15 i 17 koncentracije radona merene Landauer detektorima drastično veće. Uzroci neslaganja se mogu tražiti u razlikama u transportu i načinu očitavanja, kao i različitoj konstrukciji detektorskih komora i eventualnim nepravilnostima pri izlaganju i tretmanu detektora. Na ostalim lokacijama slaganje između dve vrste detektora je u okviru neodređenosti merenja.



Slika 3. Poređenje rezultata merenja koncentracije radona.

#### 4. Zaključak

Izmerene srednje godišnje koncentracije radona su relativno niske i kreću se u opsegu od 17,9 do 82,7  $Bq\ m^{-3}$ . Nije uočena statistički značajna razlika između koncentracija izmerenih tokom letnjeg i zimskog perioda. Pri poređenju sa rezultatima Nacionalnog akcionog programa u kome su koncentracije radona merene Landauer detektorima, uočeno je značajno odstupanje na određenom broju lokacija. Potrebna su dalja ispitivanja da bi se utvrdio tačan uzrok neslaganja.

#### 5. Zahvalnica

Ovaj rad je podržan od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja, kroz projekat No 171021. Zahvaljujemo se Agenciji za zaštitu od jonizujućih zračenja i nuklearnu sigurnost Srbije, a posebno kolegi Dr Vladimiru Udovičiću na saradnji.

#### 6. Literatura

- [1] P. Bangotra, R. Mehra, R. Jakhu, K. Kaur, P. Pandit, S. Kanse. Estimation of  $^{222}Rn$  exhalation rate and assessment of radiological risk from activity concentration of  $^{226}Ra$ ,  $^{232}Th$  and  $^{40}K$ . *J. Geochem. Explor.* 184, 2018, 304–310.

- [2] R. Jakhu, R. Mehra, P. Bangotra, K. Kaur, H.M. Mittal. Estimation of terrestrial radionuclide concentration and effect of soil parameters on exhalation and emanation rate of radon. *J. Geochem. Explor.* 184, 2018, 296–303.
- [3] R. Kumari, K. Kant, M. Garg. The effect of grain size on radon exhalation rate in natural dust and stone-dust samples. *Phys. Procedia* 80, 2015, 128–130.
- [4] WHO - World Health Organization, *Radon and Health*, 2016.
- [5] <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs291/en/index.html>
- [6] J.W. Marsh, Y. Bessa, A. Birchall, E. Blanchardon, W. Hofmann, D. Nosske, L. Tomasek. Dosimetric models used in the Alpha-Risk project to quantify exposure of uranium miners to radon gas and its progeny. *Radiat. Prot. Dosim.* 130, 2008, 101–106.
- [7] J.M. Stajic, B. Milenkovic, D. Nikezic. Radon concentrations in schools and kindergartens in Kragujevac city, Central Serbia. *CLEAN – Soil, Air, Water* 43, 2015, 1361–1365.
- [8] ICRP 115, International Commission on Radiological Protection, Lung cancer risk from radon and progeny and Statement on radon. *Annals of ICRP*, 2010, 40 (1).
- [9] UNSCEAR, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Sources and effects of ionizing radiation. Annex B: Exposure of the public and workers from various sources of radiation. UNSCEAR, 2008. United Nations, New York, 2010.

### **RADON MEASUREMENTS IN THE AREA OF KRAGUJEVAC CITY**

**Biljana MILENKOVIĆ, Jelena M. STAJIĆ, Vladimir MARKOVIĆ, Nenad STEVANOVIĆ, Dragana KRSTIĆ and Dragoslav NIKEZIĆ**  
*University of Kragujevac, Faculty of Science, Kragujevac, Serbia,*  
*[bmilenkovic@kg.ac.rs](mailto:bmilenkovic@kg.ac.rs), [stajicjelenal1052012@gmail.com](mailto:stajicjelenal1052012@gmail.com),*  
*[vmarkovic@kg.ac.rs](mailto:vmarkovic@kg.ac.rs), [nstevanovic@kg.ac.rs](mailto:nstevanovic@kg.ac.rs), [dragana@kg.ac.rs](mailto:dragana@kg.ac.rs), [nikezic@kg.ac.rs](mailto:nikezic@kg.ac.rs)*

#### **ABSTRACT**

The paper presents the results of measuring radon concentrations in residential buildings of Kragujevac city. Measurements were carried out at 22 locations, using Makrofol (UFO) detectors, over two consecutive six-month periods: summer (April-October) and winter period (October-April). Mean annual radon concentration  $\pm$  standard deviation was  $(42,4 \pm 17,2)$  Bq m<sup>-3</sup>. Shapiro-Wilk test showed log-normal distribution of the measured values. The coefficient of variation between two periods ranged from 1,3% to 67,1%. The influence of building characteristics on indoor radon concentration was examined. The annual effective dose of radon ranged from 0,45 to 2,08 mSv.

## UPOREĐENJE REZULTATA MJERENJA KONCENTRACIJA AKTIVNOSTI RADONA PASIVNIM DETEKTORIMA RADTRACK2 I RSKS

Ranko ZEKIĆ<sup>1</sup>, Perko VUKOTIĆ<sup>2</sup>, Nevenka ANTOVIĆ<sup>3</sup>, Tomislav ANĐELIĆ<sup>1</sup>  
i Nikola SVRKOTA<sup>1</sup>

1) Centar za ekotoksikološka ispitivanja, Podgorica, Crna Gora,  
[ranko.zekic@ceti.co.me](mailto:ranko.zekic@ceti.co.me), [tomislav.andjelic@ceti.co.me](mailto:tomislav.andjelic@ceti.co.me), [nikola.svrkota@ceti.co.me](mailto:nikola.svrkota@ceti.co.me)

2) Crnogorska akademija nauka i umjetnosti, Podgorica, Crna Gora,  
[pvukotic@canu.ac.me](mailto:pvukotic@canu.ac.me)

3) Univerzitet Crne Gore, Prirodno-matematički fakultet, Podgorica, Crna Gora,  
[antovicn@yahoo.com](mailto:antovicn@yahoo.com)

### SADRŽAJ

Radon je mjerен 2014–2015. godine u 530 stanova u Crnoj Gori, tokom dva uzastopna šestomjesečna perioda: „zimski“ (oktobar–mart) i „ljetni“ (april–septembar). Za mjerenja su korišćeni pasivni detektori tipa Radtrack2, firme Landauer Nordic iz Švedske. U cilju izbjegavanja eventualne sistematske greške u rezultatima za koncentracije aktivnosti radona u stanovima, na približno svakoj desetoj mjernoj lokaciji je uz detektor Radtrack2 postavljan i Radosys-ov detektor tipa RSKS, nabavljen od firme AGES iz Austrije. Detektori u paru su eksponirani jednako dugo (6 mjeseci), nakon čega su razvijani i očitavani u laboratorijama firmi od kojih su nabavljeni.

Tokom zimskog mjerenja bilo je 42 para ovih detektora, a tokom ljetnog 41 par. Izmjerene koncentracije aktivnosti radona u stanovima sa uparenim detektorima bile su u opsegu 7–1341 Bq/m<sup>3</sup>, sa srednjom vrijednošću 144 Bq/m<sup>3</sup> i medijanom 74 Bq/m<sup>3</sup>. Relativne razlike očitavanja koncentracije radona uparenim detektorima (u odnosu na srednju vrijednost rezultata dva detektora u paru) su u opsegu 0–34,3%, sa srednjom vrijednošću 4,5% i medijanom 3,1%. Ove vrijednosti potvrđuju veoma dobru saglasnost rezultata mjerenja koncentracija aktivnosti radona pomoću korišćenih Radtrack2 i RSKS detektora u realnim uslovima dugotrajnih indoor mjerenja.

### 1. Uvod

U okviru nacionalnog projekta istraživanja radona u stanovima u Crnoj Gori [1, 2], finansiranog od Međunarodne agencije za atomsku energiju i Vlade Crne Gore, radon je 2014–2015. godine mjerен u stanovima tokom dva uzastopna šestomjesečna perioda – „zimski“ (oktobar–mart) i ljetni (april–septembar). U zimskom periodu mjerenja su uspješno okončana u 523 stana, a u ljetnom u 531 stanu. Za mjerenja radona korišćeni su pasivni detektori firme Landauer Nordic iz Švedske, tipa Radtrack 2 (slika 1), koji su nakon šestomjesečne ekspozicije razvijani i očitavani u laboratoriji proizvođača.

U cilju izbjegavanja eventualne sistematske greške u rezultatima za koncentracije aktivnosti radona u stanovima, na približno svakoj desetoj mjernoj lokaciji je uz detektor Radtrack 2 postavljen i pasivni detektor radona firme Radosys, tipa RSKS (slika 1), nabavljen od firme AGES iz Austrije, i oba detektora su eksponirana jednako dugo (6 mjeseci). Detektori RSKS su razvijani i očitavani u laboratoriji AGES-a.

Prema informacijama dobijenim od proizvođača, karakteristike korišćenih detektora su sljedeće: Radtrack2 ima mjerni opseg 0–25000 kBq h m<sup>-3</sup>, mjernu nesigurnost 6% na 400 kBq h/m<sup>3</sup>, osjetljivost 2,4 trag cm<sup>-2</sup> kBq<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>m<sup>3</sup> i tipičan fon 5 kBq h m<sup>-3</sup>, a RSKS ima saturacioni limit iznad 12000 kBq h m<sup>-3</sup>, osjetljivost 2,0 trag cm<sup>-2</sup> kBq<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>m<sup>3</sup> i tipičan inicijalni fon 0,3 trag mm<sup>-2</sup>. Oba tipa detektora koriste PADC/CR-39 plastiku za detekciju α-čestica. Minimalna detektabilna koncentracija aktivnosti radona pri šestomjesečnoj ekspoziciji je za RSKS detektore oko 1 Bq/m<sup>3</sup>, a za Radtrack2 detektore je ona do 10 Bq/m<sup>3</sup>.



(a)



(b)

Slika 1. Upoređivani detektori radona: (a) Radtrack2, (b) RSKS.

## 2. Rezultati i diskusija

Tokom „zimskog“ mjerenja radona u stanovima dobijeni su rezultati za 42 para Radtrack2 i RSKS detektora postavljenih na mjernoj lokaciji jedan pored drugoga, koji su prikazani u tabeli 1. Izmjerene koncentracije aktivnosti radona u 42 stana u kojima su bili upareni detektori tokom zimskog perioda bile su u opsegu 7–1341 Bq/m<sup>3</sup>, sa srednjom vrijednošću 173 Bq/m<sup>3</sup> i medijanom 107 Bq/m<sup>3</sup>. Sve koncentracije aktivnosti radona izmjerene detektorima u paru međusobno su saglasne u okviru kombinovane mjerne nesigurnosti (U), koja obuhvata mjerne nesigurnosti kalibracionog faktora, fona, brojanja tragova itd. Relativne razlike koncentracija radona dobijene uparenim detektorima (u odnosu na srednju vrijednost rezultata dva detektora u paru) su u zimskom periodu u opsegu 0–15,6%, sa srednjom vrijednošću 3,4% i medijanom 2,8%. Razlika veća od 10% postoji samo kod dva para detektora.

Radon je u „ljetnom“ periodu mjereno uparenim Radtrack2 i RSKS detektorima u istim stanovima kao i u „zimskom“ periodu. Nakon šestomjesečne ekspozicije pokazalo se da je jedan od detektora na lokaciji KL8 bio oštećen, tako da su dobijeni rezultati koncentracija aktivnosti radona izmjereni sa 41 parom detektora, prikazani u tabeli 2.

Izmjerene koncentracije aktivnosti radona u 41 stanu sa uparenim detektorima tokom ljetnog perioda bile su očekivano niže nego u zimskom periodu – u opsegu 20–603 Bq/m<sup>3</sup>, sa srednjom vrijednošću 115 Bq/m<sup>3</sup> i medijanom 71 Bq/m<sup>3</sup>. Sve koncentracije aktivnosti radona izmjerene detektorima u paru međusobno su saglasne u okviru mjerne nesigurnosti U, izuzev kod para detektora na lokaciji RO5.

Tabela 1. Rezultati mjerenja radona uparenim detektorima tokom zimskog perioda.

Par detektora	Oznaka lokacije	$C_{Rn,L}$ (U) (Bq/m <sup>3</sup> )	$C_{Rn,R}$ (U) (Bq/m <sup>3</sup> )	$C_{Rn,sr}$ (Bq/m <sup>3</sup> )	$\delta$ (%)
1	PV7	45 (6)	49 (9)	47	4,2
2	PV12	43 (6)	44 (8)	43,5	1,1
3	PV16	27 (4)	29 (7)	28	3,6
4	PV22	138 (20)	140 (18)	139	0,7
5	te1(PV)	13 (2)	13 (5)	13	0
6	ru1(PV)	50 (6)	45 (8)	47,5	5,3
7	ŽB2	55 (7)	57 (9)	56	1,8
8	ŠN2	48 (6)	48 (8)	48	0
9	KL8	64 (8)	64 (10)	64	0
10	MK2	151 (20)	150 (20)	150,5	0,3
11	MK5	305 (40)	257 (31)	231	11,2
12	BA4	59 (8)	66 (11)	62,5	5,6
13	BA6	110 (20)	114 (16)	112	1,8
14	GU2	129 (20)	122 (16)	125,5	2,8
15	PL5	199 (30)	198 (24)	198,5	0,2
16	BP9	193 (30)	192 (23)	192,5	0,2
17	BP17	213 (30)	218 (26)	215,5	1,2
18	RO5	19 (4)	26 (6)	22,5	15,6
19	RO7	26 (4)	26 (6)	26	0
20	CG275	269 (40)	260 (31)	264,5	1,7
21	CG289	167 (30)	161 (21)	164	1,8
22	CG295	47 (6)	50 (9)	48,5	3,1
23	CG301	23 (4)	25 (7)	24	4,2
24	CG303	1341 (250)	1131 (136)	1236	8,5
25	CG305	296 (40)	279 (33)	287,5	3,0
26	CG325	226 (30)	236 (28)	231	2,2
27	CG329	191 (30)	212 (28)	201,5	5,2
28	CG333	437 (60)	432 (52)	434,5	0,6
29	CG360	68 (8)	63 (11)	65,5	3,8
30	CG361	45 (6)	51 (9)	48	6,2
31	CG367	713 (90)	641 (71)	677	5,3
32	CG380	105 (20)	96 (14)	100,5	4,5
33	CG392	53 (8)	51 (9)	52	1,9
34	CG401	66 (8)	70 (11)	68	2,9
35	CG436	115 (20)	126 (18)	120,5	4,6
36	CG451	22 (4)	23 (6)	22,5	2,2
37	CG477	109 (20)	106 (15)	107,5	1,4
38	CG504	119 (20)	136 (18)	127,5	6,7
39	CG534	7 (-)	8 (5)	7,5	6,7
40	CG535	580 (70)	527 (63)	553,5	4,8
41	CG536	56 (6)	58 (9)	57	1,8
42	CG545	328 (40)	309 (37)	318,5	3,0

$C_{Rn,L}$  – koncentracija aktivnosti radona izmjerena Landauer-ovim Radtrack2 detektorom;

$C_{Rn,R}$  – koncentracija aktivnosti radona izmjerena Radosys-ovim RSKS detektorom;

U – kombinovana mjerna nesigurnost (nivo pouzdanosti 95%);

$\delta$  – relativna razlika pojedinačnih mjerenja i srednje vrijednosti.



Relativne razlike koncentracija radona dobijene uparenim detektorima su u ljetnom periodu bile u opsegu 0–34,3%, sa srednjom vrijednošću 5,7% i medijanom 3,9%. Razlika veća od 10% postoji kod devet parova detektora.

**Tabela 2. Rezultati mjerenja radona uparenim detektorima tokom ljetnog perioda.**

Par detektora	Oznaka lokacije	$C_{Rn,L}$ (SU) (Bq/m <sup>3</sup> )	$C_{Rn,R}$ (U) (Bq/m <sup>3</sup> )	$C_{Rn,sr}$ (Bq/m <sup>3</sup> )	$\delta$ (%)
1	PV7	39 (6)	48 (9)	43,5	10,3
2	PV12	30 (4)	37 (8)	33,5	10,4
3	PV16	28 (4)	25 (6)	26,5	5,7
4	PV22	34 (6)	39 (8)	36,5	6,8
5	te1(PV)	26 (4)	23 (6)	24,5	6,1
6	ru1(PV)	32 (6)	31 (7)	31,5	1,6
7	ŽB2	118 (20)	122 (17)	120	1,7
8	ŠN2	36 (6)	46 (9)	41	12,2
9	MK2	52 (8)	52 (9)	52	0
10	MK5	68 (8)	73 (12)	70,5	3,5
11	BA4	69 (10)	76 (12)	72,5	4,8
12	BA6	103 (20)	101 (15)	102	1,0
13	GU2	69 (10)	63 (11)	66	4,5
14	PL5	126 (20)	123 (17)	124,5	1,2
15	BP9	118 (20)	115 (16)	116,5	1,3
16	BP17	164 (30)	157 (20)	160,5	1,6
17	RO5	22 (4)	45 (9)	33,5	34,3
18	RO7	24 (4)	24 (6)	24	0
19	CG275	148 (20)	149 (19)	148,5	0,3
20	CG289	39 (6)	48 (9)	43,5	10,3
21	CG295	29 (4)	38 (8)	33,5	13,4
22	CG301	27 (6)	40 (8)	33,5	19,4
23	CG303	588 (80)	536 (64)	562	4,6
24	CG305	204 (30)	219 (28)	211,5	3,5
25	CG325	135 (20)	139 (19)	137	1,4
26	CG329	110 (20)	119 (17)	114,5	3,9
27	CG333	603 (80)	529 (63)	566	6,5
28	CG360	69 (10)	78 (12)	73,5	6,1
29	CG361	71 (10)	80 (13)	75,5	6,0
30	CG367	235 (30)	242 (31)	238,5	1,5
31	CG380	41 (6)	46 (9)	43,5	5,7
32	CG392	70 (10)	76 (12)	73	4,1
33	CG401	76 (10)	79 (13)	77,5	1,9
34	CG436	148 (20)	139 (19)	143,5	3,1
35	CG451	20 (4)	26 (6)	23	13,0
36	CG477	266 (40)	264 (34)	265	0,4
37	CG504	129 (20)	169 (22)	149	13,4
38	CG534	103 (20)	111 (16)	107	3,7
39	CG535	131 (20)	137 (19)	134	2,2
40	CG536	74 (10)	75 (12)	74,5	0,7
41	CG545	228 (30)	229 (30)	228,5	0,2



Kad se posmatraju rezultati šestomjesečnih mjerenja koncentracija aktivnosti radona u stanovima pomoću svih uparenih Radtrack2 i RSKS detektora, kako zimi tako i ljeti (83 para), dobija se da za koncentracije radona sa karakteristikama: opseg 7–1341 Bq/m<sup>3</sup>, srednja vrijednost 144 Bq/m<sup>3</sup> i medijana 74 Bq/m<sup>3</sup>, razlike rezultata mjerenja pojedinim detektorima u paru imaju karakteristike: opseg 0–34,3%, srednja vrijednost 4,5% i medijana 3,1%.

Ako se odbaci jedan očigledni par, ljetni par na lokaciji RO5, sa  $\delta = 34,3\%$ , tada je za 82 para detektora opseg relativne razlike u njihovom mjerenju radona 0–19,4% a srednja vrijednost 4,2%.

### 3. Zaključak

Razlike u koncentracijama aktivnosti radona u stanovima u Crnoj Gori, iz opsega 7–1340 Bq/m<sup>3</sup>, koje su dobijene šestomjesečnim mjerenjima sa 83 para pasivnih detektora Radtrack2 (firme Landauer Nordic) i RSKS (firme Radosys), kreću se od 0% do 34,3%, sa veoma malom srednjom vrijednošću - 4,5%. Ove vrijednosti potvrđuju veoma dobru međusobnu saglasnost rezultata mjerenja koncentracija radona pomoću Radtrack2 i RSKS detektora u realnim uslovima dugotrajnih mjerenja u zatvorenom prostoru.

### 4. Literatura

- [1] P. Vukotic, N. Antovic, R. Zekic, N. Svrkota, T. Andjelic, R. Svrkota, R. Mrdak, A. Djurovic, A. Dlabac, N. Bjelica, T. Djurovic, M. Bogicevic. Main findings from radon indoor survey in Montenegro. *Radiat. Prot. Dosim.* Published on March 06, 2019 as doi:10.1093/rpd/ncz022 (Epub ahead of print).
- [2] P. Vukotic, N. Antovic, A. Djurovic, R. Zekic, N. Svrkota, T. Andjelic, R. Svrkota, R. Mrdak, N. Bjelica, T. Djurovic, A. Dlabac, M. Bogicevic. Radon survey in Montenegro – A base to set national reference and “urgent action” level. *J. Environ. Radioact.* 196, 2019, 232–239.

**COMPARISON OF THE RESULTS OF RADON  
CONCENTRATION MEASUREMENTS WITH PASSIVE  
DETECTORS RADTRACK2 AND RSKS**

**Ranko ZEKIĆ<sup>1</sup>, Perko VUKOTIĆ<sup>2</sup>, Nevenka ANTOVIĆ<sup>3</sup>, Tomislav ANĐELIĆ<sup>1</sup>  
and Nikola SVRKOTA<sup>1</sup>**

*1) Centre for Ecotoxicological Research, Podgorica, Montenegro,  
[ranko.zekic@ceti.co.me](mailto:ranko.zekic@ceti.co.me), [tomislav.andjelic@ceti.co.me](mailto:tomislav.andjelic@ceti.co.me),  
[nikola.svrkota@ceti.co.me](mailto:nikola.svrkota@ceti.co.me)*

*2) Montenegrin Academy of Sciences and Arts, Podgorica, Montenegro,  
[pvukotic@canu.ac.me](mailto:pvukotic@canu.ac.me)*

*3) University of Montenegro, Faculty of Natural Sciences and Mathematics, Podgorica,  
Montenegro, [antovicn@yahoo.com](mailto:antovicn@yahoo.com)*

**ABSTRACT**

Radon concentration was measured in 530 dwellings in Montenegro during the two consecutive six-month periods in 2014/2015 – ‘winter’ (October–March) and ‘summer’ (April–September). Radtrack2 passive detectors of the Landauer Nordic, Sweden, were used for the measurements. In order to have control over accuracy of the measurement results, at approximately every tenth measurement location, Radosys' detector of RSKS type, purchased from the AGES, Austria, was placed side-by-side with Radtrack2 detector. Paired detectors were exposed equally long (6 months), and then sent for etching and counting to the laboratories of companies of which they were purchased.

During the ‘winter’ measurements there were 42 pairs of these detectors, and 41 pair during the ‘summer’ measurements. Radon activity concentrations in dwellings, measured with all 83 pairs of detectors, are found to be in a range 7–1341 Bq/m<sup>3</sup>, with a mean value of 144 Bqm<sup>-3</sup> and a median of 74 Bqm<sup>-3</sup>. The relative differences between radon concentrations obtained with detectors in pairs are in a range 0–34,3%, with a mean value 4,5% and a median of 3,1%. This confirms a very good agreement between measurement results of radon activity concentration obtained by using Radtrack2 and RSKS detectors in real conditions of prolonged indoor measurement.

## ODREĐIVANJE EMANACIJE $^{222}\text{Rn}$ IZ PRIRODNOG GIPSA I FOSFOGIPSA

**Predrag KUZMANOVIĆ<sup>1,2</sup>, Nataša TODOROVIĆ<sup>1</sup>, Sofija FORKAPIĆ<sup>1</sup>,  
Jovana KNEŽEVIĆ<sup>1</sup>, Leposava FILIPOVIĆ PETROVIĆ<sup>2</sup>, Jovana NIKOLOV<sup>1</sup>  
i Bojan MILJEVIĆ<sup>3</sup>**

- 1) *Univerzitet u Novom Sadu, Prirodno-matematički fakultet, Departman za fiziku, Novi Sad, Srbija, [predrag.kuzmanovic@df.uns.ac.rs](mailto:predrag.kuzmanovic@df.uns.ac.rs), [natasa.todorovic@df.uns.ac.rs](mailto:natasa.todorovic@df.uns.ac.rs), [jovana.knezevic@df.uns.ac.rs](mailto:jovana.knezevic@df.uns.ac.rs), [jovana.nikolov@df.uns.ac.rs](mailto:jovana.nikolov@df.uns.ac.rs), [sofija@df.uns.ac.rs](mailto:sofija@df.uns.ac.rs)*
- 2) *Visoka medicinska i poslovno-tehnološka škola strukovnih studija, Laboratorija za fiziku, Šabac, Srbija, [predrag.kuzmanovic@vmpts.edu.rs](mailto:predrag.kuzmanovic@vmpts.edu.rs), [leposavafp@gmail.com](mailto:leposavafp@gmail.com)*
- 3) *Univerzitet u Novom Sadu, Tehnološku fakultet, Katedra za inženjerstvo materijala, Novi Sad, Srbija, [miljevic@uns.ac.rs](mailto:miljevic@uns.ac.rs)*

### SADRŽAJ

*Fosfogips je otpad koji nastaje pri proizvodnji veštačkih đubriva i veoma je sličan prirodnom gipsu, te je moguća njegova upotreba u građevinskoj industriji. U svom sastavu obično sadrži povećanu koncentraciju aktivnosti  $^{226}\text{Ra}$ . Cilj ovog rada je određivanje koeficijenta emanacije radona iz prirodnog gipsa i fosfogipsa. Gamaspektrometrijskim merenjima određena je koncentracija aktivnosti  $^{226}\text{Ra}$ , dok je koncentracija aktivnosti  $^{222}\text{Rn}$  u uzorcima merena u posebno konstruisanim komorama različitih zapremina alfa spektrometrom RAD7. Ispitivan je uticaj zapremina mernih komora na dobijene vrednosti koeficijenta emanacije radona.*

### 1. Uvod

Fosfogips je otpad iz proizvodnje veštačkih đubriva koji nastaje pri proizvodnji fosforne kiseline. Prema svom sastavu je  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  i veoma je sličan prirodnom gipsu, i zbog toga se može upotrebljavati u građevinskoj industriji. Glavne karakteristike koje ga razlikuju od prirodnog gipsa su povećan sadržaj radijuma ( $^{226}\text{Ra}$ ), kao i drugih nečistoća u vidu teških metala, koji mu ograničavaju upotrebu [1]. Nivo koncentracije aktivnosti radijuma u fosfogipsu može varirati od 200 – 3000 Bq kg<sup>-1</sup> [2], što može prelaziti dozvoljenu vrednost od 370 Bq kg<sup>-1</sup> da bi se mogao koristiti u građevinskoj industriji [3]. Prosečne vrednosti koncentracija aktivnosti  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ , i  $^{40}\text{K}$  za materijale koji se koriste u građevinarstvu u svetu iznose 50 Bq kg<sup>-1</sup> za  $^{226}\text{Ra}$ , 50 Bq kg<sup>-1</sup> za  $^{232}\text{Th}$  i 500 Bq kg<sup>-1</sup> za  $^{40}\text{K}$  [4]. Vrednosti koncentracija aktivnosti  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  i  $^{40}\text{K}$  u prirodnom gipsu su obično daleko ispod prosečnih vrednosti [5, 6], tako da se ovaj materijal u odnosu na fosfogips može smatrati potpuno radiološki bezbednim. Koncentracije aktivnosti  $^{232}\text{Th}$  i  $^{40}\text{K}$  u fosfogipsu su obično ispod prosečnih vrednosti, te glavni doprinos izloženosti zračenju od upotrebe fosfogipsa daje  $^{226}\text{Ra}$ , čiji povećan sadržaj u ovom materijalu predstavlja kako opasnost od gama zračenja, tako i opasnost od inhalacije  $^{222}\text{Rn}$  [7].

Radon je radioaktivni gas perioda poluraspada 3,8 dana, koji predstavlja veliki zdravstveni hazard (zajedno sa svojim potomcima) za izloženost ljudi. Veoma je mobilan iz zemlje, ali doprinos ukupnoj koncentraciji u zatvorenom prostoru može doprineti i sam građevinski materijal usled povećanog sadržaja  $^{226}\text{Ra}$  [7, 8]. Kada se radon stvara iz raspada  $^{226}\text{Ra}$  u čvrstim zrnima građevinskog materijala, jedan deo radona uspe da izađe u pore između čvrstih zrnaca. Odnos količine radona koji ulazi u pore između zrnaca u odnosu na količinu generisanog radona naziva se koeficijent emanacije [7]. Određivanjem koeficijenta emanacije radona daje se veoma važna karakteristika datog građevinskog materijala.

Neki autori smatraju da je za određivanje koeficijenta emanacije radona iz građevinskih materijala prikladnije koristiti manje zapremine komore od 3 – 7 l [7, 9-11], dok drugi koriste veće zapremine preko 50 l [6, 8].

Cilj ovog rada je ispitivanje uticaja manjih zapremina na vrednosti koeficijenta emanacije radona iz prirodnog gipsa, fosfogipsa i mešavine prirodnog gipsa i fosfogipsa od kojih mogu biti potencijalno izrađene gips-karton ploče u građevinarstvu. Ovaj rad predstavlja prvo istraživanje emanacije radona iz fosfogipsa proizvedenog u Srbiji.

## 2. Materijal i metode

Fosfogips je uzet sa deponije jedne od hemijskih industrija veštačkih đubriva u Srbiji, dok je prirodni gips pribavljen iz lokalnih marketa. Uzorci su sušeni na temperaturi od  $110^{\circ}\text{C}$  8 – 10 h, nakon čega su samleveni i homogenizovani. Ovako pripremljeni uzorci su korišćeni za sva merenja u ovom radu. Metodom nisko-fonske gama spektrometrije određena je koncentracija aktivnosti  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  i  $^{40}\text{K}$  u uzorcima. Tipično vreme merenja je iznosilo 72 000 sekundi. Gama spektrometrijska merenja su vršena nakon 40 dana od pripreme pošto je bila uspostavljena sekularna radioaktivna ravnoteža između  $^{222}\text{Rn}$  i  $^{226}\text{Ra}$ . Merenje uzoraka je sprovedeno u zapečaćenim cilindričnim posudama dimenzija 6,7 cm visine i 6,2 cm u prečniku. Koncentracija aktivnosti  $^{226}\text{Ra}$  određena je iz pikova  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{214}\text{Pb}$  i  $^{214}\text{Bi}$  na 186,1 keV, 351,9 keV i 609,3 keV. Koncentracija aktivnosti  $^{232}\text{Th}$  je određena iz gama linija  $^{212}\text{Pb}$  i  $^{228}\text{Ac}$  na 238,6 keV, 911,2 keV i 969,1 keV, dok je koncentracija aktivnosti  $^{40}\text{K}$  određena iz njegove gama linije na 1460,8 keV [12]. Korišćenjem HPGe gama spektrometra proizvođača Canberra, nominalne efikasnosti 36% i rezolucije od 1,9 keV, određen je sadržaj radionuklida u uzorcima. Oko detektora je izrađena pasivna zaštita od olova debljine 12 cm i bakra debljine 3 mm [12]. Prikupljanje i analiza gama spektara izvršeni su pomoću Canberra Genie 2000 softvera. Merne nesigurnosti su date na nivou poverenja od 95%.

### 2.1 Određivanje koeficijenta emanacije radona ( $\epsilon$ )

Koeficijent emanacije radona iz datog građevinskog materijala se može odrediti iz odnosa datog relacijom (1) [6, 11]:

$$\epsilon = \frac{C_{eq}V}{C}$$

gde je  $C_{eq}$  ravnotežna koncentracija aktivnosti radona u  $\text{Bq m}^{-3}$  nakon vremena od  $t \approx 40$  dana;  $V$  je zapremina komore u kojoj se meri koncentracija aktivnosti radona;  $C_{Ra}$  je koncentracija aktivnosti  $^{226}\text{Ra}$  u  $\text{Bq kg}^{-1}$  izmerena gama spektrometrijom i  $M$  je masa uzorka izražena u kg [6, 10].

Koeficijent emanacije ( $\varepsilon$ ) obično se kreće od 1% do 30% i zavisi od vrste građevinskog materijala koji se ispituje, njegove poroznosti, gustine, veličine čestica, kao i od spoljašnjih uslova: temperature, atmosferskog pritiska, relativne vlažnosti i drugih fizičkih faktora [8-10, 13]. Za određivanje koeficijenta emanacije prema relaciji (1) korišćena su dva alfa spektrometra RAD7, istih karakteristika, mereći koncentraciju radona iz pripremljenih uzoraka u  $\text{Bq m}^{-3}$ . Za merenja su korišćeni praškasti uzorci prirodnog gipsa, fosfogipsa, kao i mešavine prirodnog gipsa i fosfogipsa (maseni udeo fosfogipsa 50%) u cilindričnoj geometriji dimenzija 5 cm u prečniku i visine 10 cm upakovanih u mikro fiber filter papir kao u radu [9].



**Slika 1. (1) Alfa spektrometar RAD7, (2) komora od debelog stakla sa metalnim zatvaračem, (3) uzorak, (4) apsorber vlage ( $\text{CaSO}_4$ ), (5) i (6) plastične cevi, (7) i (8) slavine za puštanje radonskog gasa iz komore u sistem.**

Za ovaj eksperiment korišćena je aparatura prikazana na Slici 1. Uzorak je smešten u posebnu komoru od debelog stakla sa metalnim zatvaračem zapremina 1,5 l; 2,5 l i 4,25 l sa dve slavine koje služe za puštanje radonskog gasa u sistem (elementi 2, 7 i 8 na Slici 1). Vazduh sa radonom kruži kroz sistem brzinom  $0,7 \text{ l min}^{-1}$  zahvaljujući pumpi koja je integralna komponenta alfa spektrometra RAD7. Smer kruženja radona u sistemu je prikazan strelicama. Za apsorpciju vlage u sistemu korišćena je kolona sa kalcijum sulfatom ( $\text{CaSO}_4$ ), (element 4 na Slici 1). Merenje emanacije radona iz uzoraka je vršeno 4 dana (96 h) u ciklusima po 1 h.

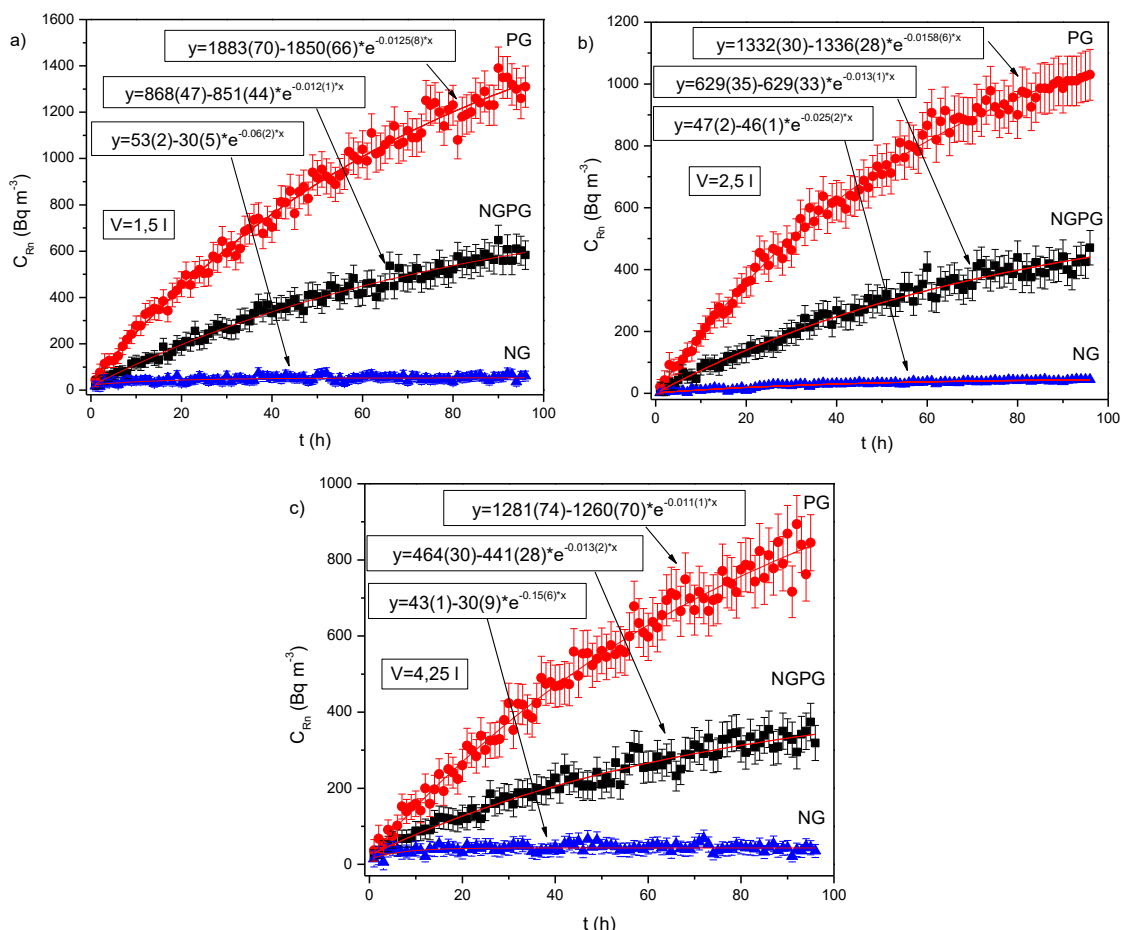
### 3. Rezultati i diskusija

Izmerene koncentracije aktivnosti  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  i  $^{40}\text{K}$  za ispitivane uzorke fosfogipsa (PG), prirodnog gipsa (NG) i mešavine prirodnog gipsa i fosfogipsa (sa udelom fosfogipsa od 50%) (NGPG) dati su u tabeli 1. Dobijene vrednosti koncentracije aktivnosti  $^{226}\text{Ra}$  u uzorcima PG i NGPG su iznad proseka u svetu od  $50 \text{ Bq kg}^{-1}$ , dok su koncentracije aktivnosti  $^{232}\text{Th}$  i  $^{40}\text{K}$  ispod prosečnih vrednosti u svetu od  $50 \text{ Bq kg}^{-1}$  i  $500 \text{ Bq kg}^{-1}$ , respektivno [4]. Izmerena vrednost koncentracije aktivnosti  $^{226}\text{Ra}$  u uzorku fosfogipsa prelazi dozvoljenu vrednost od  $370 \text{ Bq kg}^{-1}$  za korišćenje u građevinarstvu [3] i iznosi  $528 \pm 23 \text{ Bq kg}^{-1}$ , dok su vrednosti koncentracije aktivnosti  $^{226}\text{Ra}$  za prirodni gips (NG) i mešavinu prirodnog gipsa i fosfogipsa (NGPG) ispod te vrednosti.

Tabela 1. Izmerene koncentracije aktivnosti  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  i  $^{40}\text{K}$  u PG, NG i NGPG uzorcima.

Uzorak	Koncentracija aktivnosti ( $\text{Bq kg}^{-1}$ )		
	$^{226}\text{Ra}$	$^{232}\text{Th}$	$^{40}\text{K}$
PG	$528 \pm 23$	$10 \pm 2$	$89 \pm 7$
NG	$9,2 \pm 0,3$	$2,8 \pm 0,2$	$168 \pm 14$
NGPG	$275 \pm 3$	$6,1 \pm 0,6$	$105 \pm 9$

Krive emanacije dobijene pri merenju koncentracije aktivnosti radona u različitim zapreminama komora: 1,5 l; 2,5 l; i 4,25 l prikazane su na Slici 2. Nakon fitovanja eksperimentalnih tačaka optimalnim eksponencijalnim funkcijama izvršena je procena ravnotežnih koncentracija radona ( $C_{\text{eq}}$ ) pri  $t \rightarrow \infty$ . Dobijeni rezultati ravnotežne koncentracije radona, kao i koeficijenta emanacije radona za prirodni gips (NG), fosfogips (PG) i mešavine prirodnog gipsa i fosfogipsa (NGPG) dati su u tabeli 2.



Slika 2. Krive emanacije radona iz PG, NG i NGPG uzoraka za zapremine mernih komora od 1,5 l; 2, 5 l i 4, 25 l.



**Tabela 2. Mase uzoraka, vrednosti ravnotežne koncentracije aktivnosti radona ( $C_{eq}$ ) i vrednosti koeficijenta emanacije radona  $\varepsilon$  (%) za PG, NG i NGPG uzorke.**

Uzorak	M (g)	$C_{eq}$ (Bq m <sup>-3</sup> )			$\varepsilon$ (%)		
		V = 1,5 l	V = 2,5 l	V = 4,25 l	V = 1,5 l	V = 2,5 l	V = 4,25 l
PG	168,6	1883±70	1332±30	1281±74	3,17±0,18	3,74±0,18	6,12±0,44
NG	189,2	53±2	47±2	43±1	5,13±0,23	6,75±0,36	10,5±0,4
NGPG	179,5	868±47	629±35	464±30	2,81±0,15	3,19±0,18	3.99±0,26

Sa slike 2 može se zapaziti značajno odstupanje efektivne konstante raspada od same konstante raspada radona ( $0.00755 \text{ h}^{-1}$ ), odnosno njeno smanjenje sa porastom zapremine merne komore. Ovo se može pripisati činjenici izračenijeg efekta povratne difizije radona kroz uzorak sa smanjenjem zapremine merne komore. Uočava se smanjenje vrednosti ravnotežne koncentracije aktivnosti radona sa povećanjem zapremine merne komore, što se jasno zapaža kod svih kriva emanacije datih na Slici 2. Dobijena vrednost ravnotežne koncentracije radona za PG uzorak za zapreminu merne komore od 1,5 l je 1,4 puta veća nego u komori od 2,5 l i 1,5 puta veća nego vrednost za komoru zapremine 4,25 l. Dobijena vrednost za NG uzorak čija je koncentracija aktivnosti merena u komori zapremine 1,5 l je 1,1 puta veća u odnosu na komoru zapremine 2,5 l i 1,2 puta veća u odnosu na vrednost dobijenu za komoru od 4,25 l. Dobijena vrednost ravnotežne koncentracije aktivnosti radona za NGPG uzorak merena u komori zapremine 1,5 l je 1,4 puta veća u odnosu na onu dobijenu za komoru zapremine 2,5 l i 1,9 puta veća u odnosu na vrednost dobijenu u komori zapremine 4,25 l. Dobijene vrednosti koeficijenta emanacije radona za PG uzorak merenog u komori zapremine 4,25 l su 1,6 puta veće u odnosu na vrednost dobijenu za komoru zapremine 2,5 l i 1,9 puta veće u odnosu na vrednost dobijenu za komoru zapremine 1,5 l. Koeficijent emanacije radona dobijen za NG uzorak meren u zapremini komore od 4,25 l je 1,6 puta veći nego vrednost za komoru zapremine 2,5 l i 1,3 puta veći u odnosu na vrednost dobijenu za zapreminu komore od 1,5 l. Dobijene vrednosti koeficijenata emanacije su uporedive sa očekivanim vrednostima za građevinske materijale koje su u rasponu od 1 – 30% za [10, 11] za uzorke merene u sve tri zapremine komora.

#### 4. Zaključak

U radu su dati rezultati merenja koeficijenta emanacije radona iz uzoraka fosfogipsa, prirodnog gipsa i mešavine prirodnog gipsa i fosfogipsa koji bi se potencijalno mogli koristiti za proizvodnju gips-karton ploča. Na osnovu dobijenih koeficijenata emanacije, zaključuje se da ove vrednosti izrazito zavise od zapremine merne komore i rastu sa povećanjem zapremine iste. Iz ovog razloga korišćenjem manjih zapremina mernih komora mogu se, ovom metodologijom, dobiti rezultati koji su drastično manji od onih izmerenih u većim zapreminama mernih komora. Uzrok ovoga leži i drastičnoj promeni efektivne konstante raspada radona u zavisnosti veličine merne komore zbog izračenijeg efekta povratne difizije kroz uzorak pri manjim zapreminama merne komore. Zbog toga se preporučuje korišćenje većih zapremina mernih komora (većih i do 10 puta od zapremine uzorka) prilikom određivanja koeficijenta emanacije iz fosfogipsa ili prirodnog gipsa. Na taj način se bolje reprezentuju realni uslovi u prostorijama koje su potencijalno obložene ovakvim materijalima, a ujedno zanemaruje postojeći efekat.



### 5. Zahvalnica

Autori se zahvaljuju Ministarstvu prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije za realizaciju ovog rada u okviru naučnih projekata br. 171002, 43002 i 45008.

### 6. Literatura

- [1] D. Nizevičiene, D. Vaičiukyniene, B. Michalik, M. Bonczyk, V. Vaitkevucius, V. Jusas. The treatment of phosphogypsum with zeolite to use it in binding material. *Constr. Build. Mater.* 180, 2018, 134–142.
- [2] Report to Congress on Special Wastes from Mineral Processing: Summary and Findings, United States Environmental Protection Agency (USEPA), Washington, 1990.
- [3] National emission standards for hazardous air pollutants subpart R. United States Environmental Protection Agency (USEPA), Washington, 2002.
- [4] Sources, Effects and risks of ionizing radiation, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), United Nations New York, 1993.
- [5] R. Gul, S. Ali, M. Hussain. Estimation of radioactivity level and associated radiological hazards of limestone and gypsum used as raw building materials in Rawalpindi/Islamabad region of Pakistan. *Radiat. Prot. Dosim.* 158, 2014, 340–349.
- [6] N. M. Hassan, N. A. Mansour, M. Fayez-Hassan. Evaluation of radionuclide concentrations and associated radiological hazard indexes in building materials used in Egypt. *Radiat. Prot. Dosim.* 157, 2013, 214-220.
- [7] N. M. Hassan, T. Ishikawa, M. Hosoda, K. Iwaoka, A. Sorimachi, S. K. Sahoo, M. J., C. Kranrod, H. Yonehara, M. Fukushi, S. Tokonami. The effect of water content on the radon emanation coefficient for some building materials used in Japan. *Radiat. Meas.* 46, 2011, 232-237.
- [8] D. Al-Azmi, I.C. Okeyode, O.O. Alatise, A.O. Mustapha. Setup and procedure for routine measurements of radon exhalation rates of building materials. *Radiat. Meas.* 112, 2018, 6-10.
- [9] D.C. Narloch, S.A. Paschuk, J.N. Correa, Z. Rocha, W. Mazer, C.A. Montenegro Peddis Torres, F. Del Claro, V. Denyak, H. Reuters Schelin. Characterization of radionuclides present in portland cement, gypsum and phosphogypsum mortars. *Radiat. Phys. Chem.* 155, 2019, 315-318.
- [10] I. Bikit, D. Mrda, S. Grujic, U. Kozmidis-Luburic. Granulation effects on the radon emanation rate. *Radiat. Prot. Dosim.* 145, 2011, 184–188.
- [11] F. Del Claro, S. A. Paschuk, J. N. Corrêa, V. Denyak, J. Kappke, A. F. N. Perna, M. R. Martins, T. O. Santos, Z. Rocha, H. R. Schelin,. Radioisotopes present in building materials of workplaces. *Radiat. Phys. Chem.* 140, 2017, 141-145.
- [12] N. Todorovic, S. Forkapic, I. Bikit, D. Mrdja, M. Veskovic, S. Todorovic. Monitoring for exposures to TENORM Sources in Vojvodina region. *Radiat. Prot. Dosim.* 144, 2011, 655–658.

- [13] K. Gijbels, R. I. Iacobescu, Y. Pontikes, N. Vandevenne, S. Schreurs, W. Schroeyers. Radon immobilization potential of alkali-activated materials containing ground granulated blast furnace slag and phosphogypsum. *Constr. Build. Mater.* 184, 2018, 68–75.

## DETERMINATION OF $^{222}\text{Rn}$ EMANATION FROM NATURAL GYPSUM AND PHOSPHOGYPSUM

**Predrag KUZMANOVIĆ<sup>1,2</sup>, Nataša TODOROVIĆ<sup>1</sup>, Jovana KNEŽEVIĆ<sup>1</sup>, Jovana NIKOLOV<sup>1</sup>, Lepasava FILIPOVIĆ PETROVIĆ<sup>2</sup>, Bojan MILJEVIĆ<sup>3</sup> and Sofija FORKAPIĆ<sup>1</sup>**

- 1) *University of Novi Sad, Faculty of Sciences, Department of Physics, Novi Sad, Serbia, [predrag.kuzmanovic@df.uns.ac.rs](mailto:predrag.kuzmanovic@df.uns.ac.rs), [natasa.todorovic@df.uns.ac.rs](mailto:natasa.todorovic@df.uns.ac.rs), [jovana.knezevic@df.uns.ac.rs](mailto:jovana.knezevic@df.uns.ac.rs), [jovana.nikolov@df.uns.ac.rs](mailto:jovana.nikolov@df.uns.ac.rs), [sofija@df.uns.ac.rs](mailto:sofija@df.uns.ac.rs)*
- 2) *Higher medical and business-technological school of applied studies in Sabac, Laboratory for Physics, Šabac, Serbia, [predrag.kuzmanovic@vmpts.edu.rs](mailto:predrag.kuzmanovic@vmpts.edu.rs), [leposavafp@gmail.com](mailto:leposavafp@gmail.com)*
- 3) *University of Novi Sad, Faculty of Technology, Department of Materials Engineering, Novi Sad, Serbia, [miljevic@uns.ac.rs](mailto:miljevic@uns.ac.rs)*

### ABSTRACT

Phosphogypsum is a waste occurring in the production of fertilizers and is very similar to natural gypsum, thus its use in the construction industry is possible. Its composition usually contains an increased activity concentration of  $^{226}\text{Ra}$ . The aim of this paper is to determine the emanation coefficient of radon from natural gypsum and phosphogypsum. Activity concentration of  $^{226}\text{Ra}$  was determined by gamma spectrometry method, while the  $^{222}\text{Rn}$  was measured in specially designed chambers of different volumes with the RAD7 alpha spectrometer. The influence of chamber volumes on the value of the radon emanation coefficient was examined.

## АНАЛИЗА УТИЦАЈА РАЗЛИЧИТИХ ГРАЂЕВИНСКИХ МАТЕРИЈАЛА НА НИВО РАДОНА У КУЋАМА СТАРИЈЕ ГРАДЊЕ

Љиљана ГУЛАН, Ђорђе ИВАНОВИЋ и Биљана ВУЧКОВИЋ

Универзитет у Приштини са привременим седиштем у Косовској Митровици,  
Природно-математички факултет, Косовска Митровица, [ljiljana.gulan@pr.ac.rs](mailto:ljiljana.gulan@pr.ac.rs),  
[djordje.lesak@gmail.com](mailto:djordje.lesak@gmail.com), [biljana.vuckovic@pr.ac.rs](mailto:biljana.vuckovic@pr.ac.rs)

### САДРЖАЈ

Грађевински материјали (гранит, песак, шљунак, камен, и др.) садрже природне радионуклиде пореклом из земље. Да би анализирали утицај грађевинских материјала на концентрацију радона у објектима старије градње, спроведено је истраживање у седам специфичних кућа на простору северног дела Косова и Метохије. Изабране су породичне куће са подрумом, старости од 30-120 година, изграђене од различитих грађевинских материјала. Детектори радона Airthings Sorentium Home, засновани на алфа спектрометријском методу су постављани недељу дана у подруму и просторији изнад подрума (спаваћа соба, кухиња или дневни боравак) у току лета 2018. Истовремено је спроведено мерење јачине дозе гама зрачења детектором RADEX RD1503<sup>+</sup>. Измерене вредности концентрација радона су биле у опсегу 44-117 Bq/m<sup>3</sup> у подрумима и 9-113 Bq/m<sup>3</sup> у изабраним просторијама на спрату. Измерене вредности јачине дозе гама зрачења у свим објектима су биле у опсегу 0,14-0,29  $\mu$ Sv/h. На основу резултата мерења концентрација радона и доза гама зрачења унутар и ван објекта, утврђено је да грађевински материјал није извор радона у кућама, већ земљиште, тј. геолошка подлога. Добијене вредности концентрације радона показују да и навике укућана (добра вентилација) и порозна дрвена столарија утичу на смањење акумулације гаса радона у затвореном простору.

### 1. Увод

Радон и продукти његовог распада доприносе годишњој дози коју становништво прима од природних извора зрачења више од 50% [1]. Најјачи извор радона у затвореним просторијама је земљиште. Грађевински материјали који се добијају прерадом разних материјала из земље садрже радијум, предак радона, па такође могу представљати значајан извор радона у затвореном простору. Пукотине у земљишту испод објекта омогућавају ефикасан транспорт радона процесима дифузије и адвекције. Допринос концентрацији у близини објекта зависи и од јачине еманације, дебљине и чврстине грађевинског објекта.

У свету је спроведено десетине истраживања о утицају сезонских варијација, спратности и утицају различитих грађевинских материјала на ниво радона у боравишним објектима [2-7]. Варијације у концентрацији радона у затвореним просторијама зависе од више параметара: врсте објекта, извора радона, навика укућана, вентилације и грејања објекта. Највећа концентрација радона је најчешће

у подземним спратовима кућа и зграда, подрумима и гаражама. У приземљу је концентрација мања него у подруму, а на првом спрату је још мања. Са порастом спратности концентрација радона углавном опада, па је на спратовима вишим од трећег у граници грешке мерног инструмента [4]. Истраживања хоризонталне расподеле концентрације радона показују приближну уједначеност у различитим просторијама на истом спрату објекта. Ако су зидови, подови и плафони од истог грађевинског материјала на истом спрату, евентуалне разлике у концентрацији радона између две просторије на истом спрату могу потицати од навика укућана, грејања и вентилације [8].

Варијације у концентрацији радона могу бити последица коришћења различитих материјала у изградњи објекта. Студије су показале да је грађевински материјал такође важан параметар који утиче на концентрацију радона. У истраживању спроведеном у Турској у 71 кући које су грађене од бетона, концентрација радона је већа у оним које се налазе у подручју са високим садржајем радијума и урана у земљишту, у близини раседа и да је концентрација радона већа у кућама са бетонском плочом, јер се радон акумулира у плочи пре него доспе у објекат [9]. Неки аутори су извели закључак да не постоји увек корелација између радона и радијума у земљишту (геологије), и да је разлог томе понашање укућана, пермеабилност земљишта, дизајн објекта, климатски услови [5,10,11].

У истраживању у Индији концентрација радона у затвореном била је висока у кућама од блата у поређењу са кућама од бетона и цигле које су имале исту вентилацију [6]. Ово је можда последица већег садржаја радиоактивности у земљишту у односу на материјал зграде и бетон. У истраживању утицаја грађевинског материјала на ниво радона у неусељеним становима на вишим спратовима, услед коришћења мермера утврђене су високе концентрације радона. Остали грађевински материјали за производњу бетона (песак, цемент, гипс, креч) нису показали високе вредности ексхалације радона [12].

Радиоактивност грађевинског материјала зависи од минерала који су коришћени за његову израду (нпр. гранит, алуминијумски шкриљци и вулканске стене имају висок садржај природних радионуклида). Песак и шљунак имају специфичну вредност активности радијума која је блиска средњој вредности за земљиште.

Употреба секундарних сировина има за последицу повећање садржаја природних радионуклида у грађевинском материјалу. Јачину ексхалације радона из грађевинског материјала смањује високотемпературска обрада материјала, јер доводи до збијања микрочестица и затварања пукотина. Црвена цигла, пепео, цемент и шљака поседују мали коефицијент еманаације  $\eta=1\%$ , док материјали попут силикатне цигле, шљунка и песка који требају да се термички обраде имају далеко већи коефицијент еманаације  $\eta=10\%$ .

Вентилација представља ефикасан начин да се изврши елиминација радона из затворених просторија (нпр. отварање врата и прозора) што значајно утиче на смањење нивоа радона. Јачина вентилације се дефинише као број измена укупне количине ваздуха у току једног сата. Јачина вентилације од  $1h^{-1}$  одговара добро вентилисаним просторијама. Спољашњи услови (нпр. слаб ветар) могу довести до наглог повећања нивоа радона у затвореним просторијама [11].

### 2. Место истраживања и метод мерења

Да би анализирали утицај грађевинских материјала на концентрацију радона у објектима старије градње спроведено је истраживање у седам специфичних кућа на простору северног дела Косова и Метохије, на основу неколико критеријума:

- различите врсте грађевинских материјала који су се користили за изградњу;
- различите године изградње;
- различите намене просторија.

Изабране су искључиво самосталне, породичне куће са подрумима у којима није рађена хидроизолација. Карактеристичан изглед куће приказан је на слици 1. У свакој од кућа (старости од 30-120 година) су недељу дана у две просторије били постављени детектори за мерење концентрације радона на висини 1-1.5 m од пода у центру подрума, тј. удаљени од предмета. Уређаји су постављани у подруму и просторији изнад (спаваћа соба, дневна соба или кухиња). Мерење је спроведено од средине јула до средине септембра 2018.

У сврхе мерења концентрације радона у овом истраживању коришћен је детектор Airthings Corentium Home који у кратком временском интервалу (од једног дана па до недељу и месец дана) може дати прецизне податке о просечној концентрацији радона у боравишним просторијама.

Airthings Corentium Home није конструисан да даје тренутне резултате, већ просечне вредности у току времена. Прво читавање је могуће након 24 h; детектор показује усредњену дневну вредност (из сата у сат), а недељна (усредњена за сваких 24 h) вредност се добија за претходних седам дана.

Рад детектора Airthings Corentium Home заснован је на процесу дифузије радона у комору. То је дигитална верзија детектора базирана на алфа спектрометријском методу. Тачност мерења је у овом случају  $\pm 5\%$  од резултата референтних монитора, а прецизност у оквиру интервала од  $\pm 20\%$  од средње вредности.



Слика 1. Карактеристичан изглед куће изабране за истраживање.



Истовремено са мерењима концентрације радона извршено је мерење јачине дозе гама зрачења унутар и ван објекта Гајгер-Милеровим бројачем RADEX 1503<sup>+</sup>. Принцип рада овог детектора се заснива на мерењу средње јачине амбијенталног еквивалента дозе гама зрачења у ваздуху на основу четири извршена мерења за амбијенталне гама дозе у интервалу од 0,05 до 9,99  $\mu\text{Sv/h}$ . Мерна несигурност бројача је  $\pm 15\%$ . Мерење јачине дозе гама зрачења изведено је у подруму и ван објекта да би се утврдило да ли постоји значајна разлика у измереним вредностима унутар и ван објекта. Такође су мерене јачине дозе гама зрачења у просторији изнад подрума (на поду и на 1 m висине, и растојању 0,5 m од зида; на 2-4 места у просторији при чему су избегавани отвори). Пошто је детектору својствено да у току мерења усредњава вредности забележено је последње мерење које даје најтачнију вредност.

### 3. Резултати и дискусија

Концентрације мерене у току недељу дана дале су вредности које су у четири објекта биле скоро уједначене и у подрумима и изабраној просторији на спрату (табела 1). Након мерења од недељу дана у три објекта концентрације радона у просторијама су се разликовале тако да је у подрумима измерена већа вредност.

Измерене вредности концентрација радона у свим породичним објектима су биле у опсегу 44-117  $\text{Bq/m}^3$  у подрумима (табела 1), и 9-113  $\text{Bq/m}^3$  у изабраним просторијама на спрату (табела 2).

Измерене вредности јачине дозе гама зрачења у обе просторије свих објеката су биле у опсегу 0,14-0,29  $\mu\text{Sv/h}$ , с тим да је највећа измерена разлика у јачини дозе гама зрачења унутар и ван објекта 0,07  $\mu\text{Sv/h}$  (табеле 1 и 2). Ако се узме у обзир грешка мерења, ова разлика може указати да и грађевински материјал-камен у извесној мери доприноси концентрацији радона [13]. Међутим, измерена концентрација радона у подруму објекта износи 75  $\text{Bq/m}^3$ , под је земљани, што наводи на закључак да је земља доминантан извор.

Земљиште, тј. геолошка подлога је најјачи извор радона, јер се јачине дозе гама зрачења унутар и ван објекта не разликују значајно да би грађевински материјал био извор радона. Грађевински материјал је извор радиоактивности у неким објектима ако се јачина дозе гама зрачења унутар и ван објекта разликује од 100-200  $\text{nSv/h}$  [13]. Међутим, ни тада се не може извести закључак да је грађевински материјал доминантан извор радона, јер повећање јачине дозе гама зрачења може бити условљено радионуклидима из торијумовог низа који није извор радона Rn-222. Једно истраживање је показало да унутрашње излагање услед ексхалације радона из грађевинских материјала може бити веће од спољашњег излагања њиховим прекурсорима од којих се садрже [14]. С друге стране, бетонска плоча/зидови могу у извесној мери спречити улаз радона, али не и креч при површинској обради зидова. Измерене вредности концентрације радона показују да и навике укућана (добра вентилација) и порозна дрвена столарија утичу на смањење акумулације гаса радона у затвореном простору. Утисак је да и употреба савремене PVC (поливинил хлорид) столарије у једном од објекта може доприносити нагомилавању радона [15].



Табела 1. Концентрација радона, јачина дозе гама зрачења и грађевинске карактеристике подрумских просторија.

Концентрација радона ( $Bq/m^3$ )	75	97	117	44	94	104	110
Јачина дозе гама зрачења ( $\mu Sv/h$ )*	0,29/0,22	0,20/0,19	0,23/0,21	0,14/0,17	0,14/0,16	0,20/0,20	0,17/0,19
Локација детектора	Подрум	Подрум	Подрум	Подрум	Подрум	Подрум	Подрум
Фасада	камен	-	бетон	малтер	стиропор	малтер	малтер
Зидови	камен	камен	бетон	камен	бетон	блок	блок
Обрада зидова	-	-	-	-	креч	цемент	креч
Врста пода	земља	земља	земља	земља	бетон	земља	земља
Врста прозора*	ЈД	ЈД	-	ЈД	ЈМ	ЈД	ЈД
Вентилација	добра	добра	-	добра	добра	добра	добра
Година изградње	1900.	1900-1944.	1920-1944.	1950.	1985.	1985.	2003.

\* унутра/ван;

\*\* ЈД - једноструки дрвени; ЈМ - једноструки метални.

Табела 2. Концентрација радона, јачина дозе гама зрачења и грађевинске карактеристике просторија на спрату.

Концентрација радона ( $Bq/m^3$ )	15	30	113	45	17	101	9
Јачина дозе гама зрачења ( $\mu Sv/h$ )*	0,18	0,17	0,21	0,14-0,18	0,19-0,24	0,18	0,16-0,18
Локација детектора**	С.С.	С.С.	Кухиња	Д.С.	Р.С.	Трпезарија	Д.С.
Фасада	креч	земља	малтер	малтер	стиропор	малтер	малтер
Зидови	дрво/земља	дрво/земља	камен/блок	цигла	цигла	цигла	цигла
Обрада зидова	креч	креч	креч	креч	нема	масна боја	креч
Врста пода	даска/земља	бродски под	бродски под	бродски под	бетон	панел	бродски под
Врста прозора**	ЈД	ЈД	ЈД	ДД	ЈД	Д (PVC)	Д (PVC)
Вентилација	Добра	добра	добра	добра	добра	добра	добра
Година изградње	1900.	1900-1944.	1920-1944	1950.	1985.	1985.	2003.

\*- вредност/опсег у просторији; \*\*- С.С. – спаваћа соба; Д.С. – дневна соба; Р.С. – радна соба;

\*\*\* - ЈД - једноструки дрвени; ДД - двоструки дрвени; Д (PVC) – двоструки, поливинил-хлорид.

#### 4. Закључак

У овом раду је анализиран утицај различитих грађевинских материјала и земљишта на ниво радона у боравишним просторијама. Иако различити грађевински материјали коришћени у изградњи старијих објеката могу у извесној мери бити извор радона, на основу резултата мерења концентрација радона и доза гама зрачења унутар и ван објекта у овом истраживању то није утврђено. Земљиште, тј. геолошка подлога је главни извор, јер јачине дозе гама зрачења унутар и ван објекта се не разликују значајно да би грађевински материјал био извор радона. С друге стране, измерене вредности концентрације радона показују да и навике укућана (добра вентилација) и порозна дрвена столарија утичу на смањење акумулације гаса радона у затвореном простору.

#### 5. Захвалница

Овај рад је урађен у оквиру пројекта ИИИИ41028 Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије.

#### 6. Литература

- [1] UNSCEAR, 2008. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and effects of ionizing radiation. *Annex B: Exposure of the public and workers from various sources of radiation*. New York: United Nations.
- [2] A. Kurnaz, B. Kucukomeroglu, U. Cevik and N. Celebi, Radon level and indoor gamma doses in dwellings of Trabzon, Turkey. *Appl. Radiat. Isotopes*. 69, 2011, 1554-1559.
- [3] D. Popović, D. Todorović, Radon indoor concentrations and activity of radionuclides in building materials in Serbia. *Facta Universitatis: Physics, Chemistry and Technology* 4, 2006, 11-20.
- [4] C.Y.H. Chao, T.C.W. Tung, J. Burnett, Influence of ventilation on indoor radon level. *Build. Environ.* 32(6), 1997, 527-534.
- [5] R.S. Kher, M.S.K. Khokhar, V.B. Rathore, T.V. Ramachandran, Measurement of indoor radon and thoron levels in dwellings and estimation of uranium, thorium and potassium in soil samples from central part of India. *Radiat. Meas.* 43, 2008, S414–S417.
- [6] A. Kumar, R.P. Chauhan, Measurement of indoor radon–thoron concentration and radon soil gas in some North Indian dwellings. *J. Geochem. Explor.* 143, 2014, 155–162.
- [7] A.V. Sundal, H. Henriksen, O. Soldal, T. Strand, The influence of geological factors on indoor radon concentrations in Norway. *Sci. Total Environ.* 328, 2004, 41–53.
- [8] G. Jonson, About Radon-where, when and how? Student litteraturatur Publ.Comp., Lund, Swedish, 1-112 (1992), In: *Radon measurements by etched track detectors: Applications in radiation protection, earth sciences and the environment*. Durrani S.A. and Ilic R., World Scientific, Singapore, 1997.

- [9] N. Celik, U. Cevik, A. Celik, B. Kucukomeroglu, Determination of indoor radon and soil radioactivity levels in Giresun, Turkey, *J. Environ. Radioactiv.* 99, 2008, 1349–1354.
- [10] Lj. Gulan, J.M. Stajic, F. Bochicchio, C. Carpentieri, G. Milic, D. Nikezic, Z.S. Zunic, Is high indoor radon concentration correlated with specific activity of radium in nearby soil? A study in Kosovo and Metohija. *Environ. Sci. Pollut. R.* 24, 2017, 19561-19568.
- [11] Lj. Gulan. *Radon i toron u vazduhu zatvorenih prostoriya na Kosovu i Metohiji: korelacija i mape rizika*, Monografija, Akademska misao, Beograd, 2015.
- [12] B.M. Moharram, M.N. Suliman, N.F. Zahran, S.E. Shennawy and A.R. El Sayed,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  content and radon exhalation rate in some Egyptian building materials. *Ann. Nucl. Energy.* 45, 2012, 138-143.
- [13] M. V. Zhukovsky, V. B. Gurvich, I. V. Yarmoshenko, *Radon Building Safety*, Yekaterinburg, Russia: UB RAS, 2000.
- [14] P. Ujić, I. Čeliković, A. Kandić, I. Vukanac, M. Đurašević, D. Dragosavac, Z.S. Žunić, Internal exposure from building materials exhaling  $^{222}\text{Rn}$  and  $^{220}\text{Rn}$  as compared to external exposure due to their natural radioactivity content. *Appl. Radiat. Isotopes.* 68 (1), 2010, 201-206.
- [15] Lj. Gulan, An analysis of factors affecting the high indoor radon concentration in different types of houses, *The University Thought-Publication in Natural Science.* 7(1), 2017, 51-54.

---

## ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF DIFFERENT CONSTRUCTION MATERIALS ON THE RADON LEVEL IN THE OLD HOUSES

**Ljiljana GULAN, Đorđe IVANOVIĆ and Biljana VUČKOVIĆ**

*University in Pristina, Kosovska Mitrovica, Faculty of Sciences, Kosovska Mitrovica,  
Serbia, [ljiljana.gulan@pr.ac.rs](mailto:ljiljana.gulan@pr.ac.rs), [djordje.lesak@gmail.com](mailto:djordje.lesak@gmail.com), [biljana.vuckovic@pr.ac.rs](mailto:biljana.vuckovic@pr.ac.rs)*

### ABSTRACT

Building materials (granite, sand, gravel, stone, etc.) contain natural radionuclides originating from the soil. In order to analyze the impact of building materials on radon concentration in buildings of older construction, a survey was carried out in seven specific houses in the area of the northern part of Kosovo and Metohija. Selected family houses with a cellar, aged from 30-120 years, were built from various construction materials. Radon detector Airthings Corentium Home, based on the alpha spectrometric method, was set up for a week in the cellar and room above the basement (bedroom, kitchen or living room) during 2018. At the same time, the gamma dose rate was measured with RADEX RD1503+. The measured values of radon concentrations were in the range 44-117 Bq/m<sup>3</sup> in basements and 9-113 Bq/m<sup>3</sup> in the selected rooms on the floor. The measured values of gamma dose rate in all objects were in the range of 0.14-0.29 µSv/h. Based on the results of the measurements of radon concentrations and gamma dose rates inside and outside the houses, it was found that construction material is not the source of radon in the houses, but soil is, i.e. geological background. The obtained values of radon concentration show that behavior of habitants (good ventilation) and porous wooden joinery influence the reduction of radon gas accumulation in the indoor environment.

## RADON U VODI ZA PIĆE NA PODRUČJU OPŠTINE ZVEČAN NA SEVERU KOSOVA I METOHİJE

Biljana VUČKOVIĆ<sup>1</sup>, Nataša TODOROVIĆ<sup>2</sup>, Jovana NIKOLOV<sup>2</sup>,  
Jelena ŽIVKOVIĆ RADOVANOVIĆ<sup>1</sup> i Ljiljana GULAN<sup>1</sup>

1) Univerzitet u Prištini, sa privremenim sedištem u Kosovskoj Mitrovici,  
Prirodno-matematički fakultet, Kosovska Mitrovica, Srbija,

[biljana.vuckovic@pr.ac.rs](mailto:biljana.vuckovic@pr.ac.rs), [jelena.zivkovic.radovanovic@pr.ac.rs](mailto:jelena.zivkovic.radovanovic@pr.ac.rs),  
[ljiljana.gulan@pr.ac.rs](mailto:ljiljana.gulan@pr.ac.rs)

2) Univerzitet u Novom Sadu, Prirodno-matematički fakultet, Departman za  
fiziku, Novi Sad, Srbija, [natasa.todorovic@df.uns.ac.rs](mailto:natasa.todorovic@df.uns.ac.rs),  
[jovana.nikolov@df.uns.ac.rs](mailto:jovana.nikolov@df.uns.ac.rs)

### SADRŽAJ

*Rizik od radona u vodi za piće je znatno niži u poređenju sa ukupnim inhaliranim radonom, ali nije zanemarljiv. Rezultati prezentovani u ovom radu usmereni su ka detekciji radona u vodi za piće na 10 lokacija opštine Zvečan, na severu Kosova i Metohije. U tu svrhu korišćen je RAD7 H<sub>2</sub>O sistem (DURRIDGE Co.). Koncentracije radona kretale su se u intervalu od (3,3±1,6) Bq l<sup>-1</sup> do (46,3±6,3) Bq l<sup>-1</sup>, sa srednjom vrednošću od 17,3 Bq l<sup>-1</sup>. Za izmerene vrednosti koncentracije radona određene su godišnje efektivne doze ingestije i inhalacije. Prilikom uzorkovanja izmerena je temperatura vode kao i njena pH vrednost.*

### 1. Uvod

Brojne epidemiološke studije su pokazale da se prisustvo radona u okolini smatra drugim najvažnijim uzročnikom maligniteta pluća (odmah nakon dugotrajne izloženosti duvanskom dimu) [1-4]. To je gas bez boje, mirisa i ukusa i s toga se ne može otkriti ljudskim čulima. U organizam se može uneti na dva načina: inhalacijom i ingestijom. Kao gas, on prodire u zidove i zemljište i akumulira se u zatvorenim prostorijama i tada u organizam unosi inhalacijom. Zdravstveni rizik od radona u vodi za piće je obično nizak u poređenju sa ukupnim inhaliranim radonom, ali kako je radon akvafobik, ekshalacijom iz vode pojačava svoje prisustvo u zatvorenim prostorijama, a samim tim poveća i svoj pogubni uticaj na zdravlje [5-7]. Radon je obično prisutan u značajnim koncentracijama u onim podzemnim vodama koje su bile u kontaktu sa granitnim stenama, škriljcima, kao i peščarima i krečnjakom. Na koncentraciju radona u vodi utiču i drugi faktori, među kojima se ističu: putevi cirkulacije vode, prisustvo rastvorljivih gasova, temperatura i pritisak [8]. Još jedan parametar koji svojom vrednošću je moguć pokazatelj na pojačano prisustvo radona je niska pH vrednost, ispod 7 [9]. Za takve vode važi da su kisele, dok one kod kojih je pH iznad 7, priradaju grupu alkalnih voda sa manjom zastušljenošću radona. Kada se voda obogaćena radonom koristi za piće, ili u neke druge svrhe, direktno sa izvorišta postoji potencijalni rizik po zdravlje stanovništva. Zato je veoma važno istraživati i kontrolisati koncentraciju radona u vodi na izvorima i javnim česmama i tako utvrditi njihova radiloška ispravnost. Prema

preporuci Evropske komisije, gornja granica koncentracije radona u podzemnim vodama koje se mogu koristiti za piće je  $100 \text{ Bq l}^{-1}$  [10,11].

## 2. Geološka građa istraživanog područja

U ovom radu predstavljeni su rezultati istraživanja zastupljenosti radona u vodi sa javnih česmi na 10 pažljivo izabranih lokacija na široj teritoriji opštine Zvečan, na severu Kosova i Metohije (slika 1). Zvečan se nalazi na  $20^{\circ} 08' \text{ E}$  i  $42^{\circ} 09' \text{ N}$ . Geološku građu područja opštine Zvečan predstavljaju stene paleozojske, mezozojske i kenozojske starosti (sedimenti krede, tercijara i kvartara) različite moćnosti, zastupljenosti i mineraloško-petrografskog sastava. Prema načinu postanka ove stene su sedimentnog i magmatskog porekla. Magmačke stene koje učestvuju u građi terena zapadno od Zvečana pripadaju grupi vezanih stena, a paleozojski škriljci preovlađuju severoistočno od Zvečana [12].



Slika 1. Mapa istraživanih lokaliteta.

## 3. Materijal i metod istraživanja

Uzorki voda prikupljeni u jednom danu u plastičnim flašama zapremine 1,5 litara, kod kojih se proces difuzije radona može zanemariti [5]. Kako je radon poznati akvafobik i lako napušta vodu, flaše su punjene do samog vrha i zatvarane pod mlazom kako bi se sprečila pojava praznog prostora ispod zatvarača i tako onemogućilo nagomilavanje radona. Koncentracija radona u vodi određena je alfa spektrometrijskom metodom pomoću RAD7 detektora (DURRIDGE Co.) [13]. Unutrašnjost RAD7 uređaja čini polusfera zapremine 0,7 l, koja u centru ima silicijumski implantiran ravan alfa-detektor. Jako električno polje u unutrašnjosti napona reda veličine 2000 - 2500 V usmerava naelektrisane čestice ka površini detektora. Njihovo prisustvo reflektuje se u vidu električnih signala, čiji su intenziteti proporcionalni energijama detektovanih alfa-čestica. Ono što uređaj registruje je prisustvo kratkoživećeg radonovog potomka polonijuma ( $^{218}\text{Po}$ ,  $T_{1/2} = 3 \text{ min}$ ), a ignoriše potomke sa relativno dugim vremenom polurastada koji ostaju u komori od prethodnog merenja ( $^{214}\text{Po}$ , sa  $T_{1/2} = 27 \text{ min}$ ). Uređaj ima sposobnost da odredi od kog izotopa potiče emitovana alfa-čestica, da razdvoji “stari” od “novog” radona, radon od torona i signal od šuma.



Dodatak za određivanje radona u vodi je RAD7 H<sub>2</sub>O. Ceo sistem je zatvorenog tipa. Aeracija vodenog uzorka odvija se pomoću pumpe, i tako oslobođeni radon odlazi u komoru. Sistem dostiže ravnotežu u roku do 5 minuta. Tačna vrednost efikasnosti izdvajanja radona je gotovo uvek veća od 90%. Pre svakog merenja detektor mora biti oslobođen zaostalog radona i suv, što se postiže prođuvavanjem instrumenta. Minimalna dekteabilna aktivnost od 0,37 Bq l<sup>-1</sup> za 20 minuta merenja može se dobiti jedino ako se sav zaostali radon eliminiše iz sistema.

#### 4. Rezultati istraživanja

U tabeli 1, predstavljeni su sumirani rezultati istraživanja na području opštine Zvečan. Prilikom samog uzorkovanja izmerene su pH vrednost uzorkovanih voda, kao i njena temperatura. Pošto se koncentracija zastupljenog radona nije mogla izmeriti prilikom samog uzorkovanja, vodilo se računa da se vreme od uzorkovanja do merenja koncentracije svede na minimum. Tako da u tabeli postoje dve kolone sa koncentracijama radona: C<sub>Rn</sub> – koncentracija radona izmerena u Laboratoriji za ispitivanje radioaktivnosti uzoraka i doze jonizujućeg i nejonizujućeg zračenja Prirodno-matematičkog fakulteta, Univerziteta u Novom Sadu, i C<sub>corr</sub> – korigovana vrednost koncentracije radona numerički određena po formuli [5]:

$$C_{corr} = C_{Rn} e^{-(\ln 2/T_{1/2})t} \quad (1)$$

gde je t vreme proteklo od uzorkovanja do merenja koncentracije radona.

**Tabela 1. Rezultati istraživanja na području opštine Zvečan.**

Br	Lokacija	T (°C)	pH	C <sub>Rn</sub> (Bq l <sup>-1</sup> )	C <sub>corr</sub> (Bq l <sup>-1</sup> )	E <sub>ing</sub> (mSv y <sup>-1</sup> )	E <sub>inh</sub> (μSv y <sup>-1</sup> )
1	Zvečan	15	6,8	22,8±2,3	32,8±3,3	0,24	91,84
2	Rudare	16	7,2	32,3±4,3	46,3±6,3	0,34	129,64
3	Grabovac	14	7,1	19,0±1,6	27,6±2,3	0,19	77,28
4	Srbovac	16	7,5	2,3±1,1	3,3±1,6	0,02	9,24
5	Banjska 1	18	7,4	10,4±1,6	15,1±2,3	0,11	42,28
6	Banjska 2	14	7,6	12,9±3,1	18,7±4,5	0,14	52,36
7	Banjska 3	47	7,1	2,8±0,8	4,8±1,4	0,03	13,44
8	Žerovnica	11	7,3	3,6±0,3	6,1±0,5	0,04	17,08
9	Žitkovac	18	7,2	5,4±2,6	9,1±4,3	0,06	25,48
10	Valač	18,5	7,6	5,3±0,7	8,9±1,2	0,06	24,92

Na teritoriji opštine Zvečan koncentracija radona u vodi kretala se u rasponu od (3,3±1,6) Bq l<sup>-1</sup> do (46,3±6,3) Bq l<sup>-1</sup>, srednje vrednosti od 17,3 Bq l<sup>-1</sup>. Maksimalna vrednost koncentracije radona izmerena je na lokalitetu Rudare – (46,3±6,3) Bq l<sup>-1</sup>, a nešto niže vrednosti su izmerene u uzorcima sa lokaliteta Zvečan – (32,8±3,3) Bq l<sup>-1</sup> i Grabovac – (27,6±2,3) Bq l<sup>-1</sup>. Ova nešto izraženija koncentracija radona je posledica

geološke strukture terena na kome se лежи општина Zvečan: u гради североистоћног дела терена преовлађују палеозојски шкриљци (ћесме u Rudaru i Grabovcu), док је присуство магматских стена карактеристично за западни део терена (ћесма u центру Zvečана). Na осталим локалитетима се не може говорити о појачаном присуству u води.

Raspon temperature voda izmerene prilikom samog uzorkovanja je od 11°C – Žerovnica do 47 °C – Banjska 3, srednje vrednosti 18,75 °C. Може се рећи да су воде овог подручја сличних температура, ако се изузме јако топла вода узоркована на ћесми Banjska 3. Raspon pH vrednosti je od 6,8 - Zvečan до 7,6 – Valač i Banjska 2, srednje vrednosti 7,28. Тако да на основу ових параметара ове воде се могу сврстати u групу хладних, благо алкалних вода. Коefицијенти корелација између концентрације радона u води i pH vrednosti - 0,2, као i између концентрације радона u води i njene temperature - 0,1, не показују њихову међузависност.

Vrednosti koncentracije radona koje su prezentovane u okviru ових истраживања су нешто више него што су вредности концентрације радона u неким деловима Србије: (4,6±8,5) Bq l<sup>-1</sup> – (18,6±1,3) Bq l<sup>-1</sup> [5], као i (7±1) Bq l<sup>-1</sup> – (21±2) Bq l<sup>-1</sup>, осим вредности од (149±12) Bq l<sup>-1</sup> карактеристичне за Нишку Банју [14], али i u региону: (4,0 – 17,4) Bq l<sup>-1</sup> [15] i (214 – 3702) mBq l<sup>-1</sup> [9], али је ипак нижа од препорученог референтног нивоа од 100 Bq l<sup>-1</sup>[11].

### **Godišnje efektivne doze internog zračenja**

Detekcija radona u vodi je јако битна i са дозиметријског аспекта. Ukupna efektivna doza internog ozračivanja radonom rastvorenim u vodi састоји се од две компоненте: прву дефинише efektivna doza ingestije, док другу дефинише efektivna doza inhalacije radona.

Voda bogata radonom ide direktno u želudac, odakle dalje radon može prodreti u organizam kroz zidove želudca. Deo unetih radionuklida može ostati na istim mestima дуго времена, а неки се пак могу везати за макрофаге i пренети даље до лимфних ћелија. Ове ћелије могу примити радијационе дозе алфа-ћестика емитованих прilikом raspada radona i његових краткоживећих потомака u зиду желуца [10]. Efektivna doza primljena pri ingestiji radona i његових потомака односи се на желудаћно tkivo, изражена u mSv y<sup>-1</sup> одређује се на следећи начин [16]:

$$E_{ing} = K \times C_{Rn} \times KM \times t \quad (2)$$

где је: K конверзиони фактор вредности 10<sup>-8</sup> Sv Bq<sup>-1</sup> за одрасле i 2 × 10<sup>-8</sup> Sv Bq<sup>-1</sup> за децу [16]; C<sub>Rn</sub> је концентрација радона; KM је фактор конзумирања (2 l/d); t је време од 365 дана [17]. Пошто концентрација радона u води током времена опада, efektivna doza ingestije се односи на почетну концентрацију радона u води [16]. Vrednost efektivne doze ingestije је u rasponu од 0,02 mSv y<sup>-1</sup> – Srbovac до 0,34 mSv y<sup>-1</sup> – Rudare, srednje vrednosti од 0,12 mSv y<sup>-1</sup>, што је мало изнад препоручене вредности од 0,1 mSv y<sup>-1</sup> [10].

Treba naglasiti da radijaciona doza u plućima uglavnom potiče od radonovih краткоживећих потомака nataloženih na bronhijama, а мање од самог радона. Radon се највећим делом враћа натраг изdahnutim vazduhom. Efektivna doza inhalacije коју прими плућно tkivo добија се multipliciranjem концентрације радона u води конверзионим фактором од 2,8 μSv Bq<sup>-1</sup> m<sup>3</sup> [10]. Raspon efektivne doze inhalacije је од minimalne вредности 9,24 μSv y<sup>-1</sup> - Srbovac до 129,64 μSv y<sup>-1</sup> – Rudare, srednje vrednosti од 48,35 μSv y<sup>-1</sup>.

### 5. Zaključak

Istraživanja sprovedena na ovih deset izabраних lokacija na području opštine Zvečan su prva istraživanja ovog tipa na ovom prostoru. Rezultati pokazuju da je koncentracija radona u vodi u intervalu od  $(3,3 \pm 1,6)$  Bq l<sup>-1</sup> do  $(46,3 \pm 6,3)$  Bq l<sup>-1</sup>, srednje vrednosti od 17,3 Bq l<sup>-1</sup>, ispod preporučene vrednosti od 100 Bq l<sup>-1</sup>. Najveća koncentracija radona u vodi izmerena je u uzorku vode sa česme u Rudaru –  $(46,3 \pm 6,3)$  Bq l<sup>-1</sup>, a nešto niže vrednosti izmerene su u uzorcima voda sa česmi u Grabovcu –  $(27,6 \pm 2,3)$  Bq l<sup>-1</sup> i u Zvečanu –  $(32,8 \pm 3,3)$  Bq l<sup>-1</sup>. U ostalim uzorcima koncentracija radona nije bila tako izražena. Koeficijenti korelacija između koncentracije radona u vodi i pH vrednosti ( $R_1^2=0,2$ ), kao i između koncentracije radona u vodi i njene temperature ( $R_2^2=0,1$ ), ne pokazuju njihovu međuzavisnost. Sa druge strane, na varijaciju koncentracije radona u vodi jedini uticaj ima geološka struktura terena, jer su veće vrednosti radona izmerene na lokalitetima u kojima preovlađuju paleozojski škriljci (Rudare i Grabovac), i magmatske stene (česma u centru Zvečana) nego na ostalim lokalitetima. Srednje vrednosti efektivnih doza inhalacijom i ingestijom unetog radona na godišnjem nivou su 48,35 μSv y<sup>-1</sup> i 0,12 mSv y<sup>-1</sup>, i ukazuju da sa radiološkog aspekta vode sa ovih javnih česmi mogu se bezbedno koristiti za piće ali i u druge svrhe.

### 6. Zahvalnica

Rad je realizovan u okviru projekta IJ01-17 Prirodno-matematičkog fakulteta, Univerziteta u Prištini, sa privremenim sedištem u Kosovskoj Mitrovici.

### 7. Literatura

- [1] F. Manzoor, A.S. Alaamer, S.N.A. Tahir. Exposures to <sup>222</sup>Rn from consumption of underground municipal water supplies in Pakistan, *Radiat. Prot. Dosim.* 130(3), 2008, 392–396. A. Author, C. Corresponding. Title of the article. *Sci. Total Envir.* 46, 2005, 140–145.
- [2] K. Mitev, I. Dimitrova, V. Zhivkova, S. Georgiev, G. Gerganov, D. Pressyanov, T. Boshkova. Measurement of Rn–222 in water by absorption in polycarbonates and liquid scintillation counting, *Nucl. Instrum. Meth.* 677, 2012, 31–40.
- [3] K.A. Aleissa, A.S. Alghamdi, F.I. Almasoud, M.S. Islam. Measurement of radon levels in groundwater supplies of Riyadh with liquid scintillation counter and the associated radiation dose, *Radiat. Prot. Dosim.* 154(1), 2013, 95–103.
- [4] L. Inacio, S. Soares, P. Almeida. Radon concentration assessment in water sources of drinking of Cavilha's county, Portugal, *Journal of Radiat. Research and Applied Sciences* 10, 2017, 135-139.
- [5] N. Todorovic, J. Nikolov, S. Forkapic, I. Bikit, D. Mrdja, M. Krmar, M. Veskovic. Public exposure to radon in drinking water in SERBIA., *Appl. Radiat. Isot.* 70, 2012a, 543–549.
- [6] Z.S. Žunić, I. Kobal, J. Vaupotič, K. Kozak, K., J. Mazur, A. Birovljev, M. Janik, I. Čeliković, P. Ujić, A. Demajo, G. Krstić, B. Jakupi, M. Quarto, F. Bochicchio. High natural radiation exposure in radon spa areas: a detailed field investigation in Niska Banja (Balkan region), *J. Environ. Radioact.* 89, 2006, 249–260.

- [7] J. Nikolov, N. Todorović, T. Petrović Pantić, S. Forkapić, D. Mrdja, I. Bikit, M. Krmar, M. Vesković. Exposure to radon in the radon spa Niška Banja, Serbia, *Radiation Measurements* 47, 2012, 443–450.
- [8] N. Todorović, J. Nikolov, T. Petrović Pantić, J. Kovačević, I. Stojković, M. Krmar, *Radon in Water – Hydrogeology and Health Implication*, Eds: Audrey M. Stacks, Nova Science Publishers, 2005, New York.
- [9] A. Kasić, A. Kasumović, F. Adrović, F., M. Hodžić. Radon measurements in well and spring water of the Tuzla area, Bosnia and Herzegovina, *Arh. Hig. Rad. Toksikol.* 67, 2016, 332-339.
- [10] WHO, World Health Organisation. *Guidelines for drinking water quality*. 3rd ed. WHO Press, 2004, Geneva.
- [11] EURATOM, European Commission. Council Directive 2013/51/. Laying down requirements for the protection of the health of the general public with regard to radioactive substances in water intended for human consumption, Off J. Eur. Commun. 2013,12-21.
- [12] Geološka karta Srbije, Geološka mapa br.2 – drugo izdanje, 1:2.000000. Ministarstvo rudarstva i energetika Srbije i Geomagnetski Institut, Barex, 1999, Beograd.
- [13] RAD7 RAD H<sub>2</sub>O, Radon in Water Accessory, DURRIDGE Co.
- [14] B. Vuckovic, L. Gulan, G. Milic, F. Adrovic, D. Radovanovic, D. Overview of radon concentrations in air and in water in Serbian spas, *Proceedings of Second East European Radon Symposium SEERAS*, 27-30 may 2014, Nis, Serbia, 2014, 39-42.
- [15] V. Radolić, I. Šarić, I. Miklavčić, I. Radon u vodi gradskih vodovoda u naseljima Požeško-slavonske županije [Radon in public waterworks of the cities of Požega-Slavonia County, in Croatian]. In: Barišić D, Grahek Ž, Krajcar Bronić I, Miljanić S, editors. *Proceedings of the Seventh Symposium of the Croatian Radiation Protection Association*; 29-31 May 2008, Opatija, Croatia 2008, 294-299.
- [16] WHO, World Health Organisation. *Guidelines for drinking water quality. Health Criteria and Other Information*. WHO Press, 2003, Geneva.
- [17] USEPA, US Environmental Protection Agency. *Radon in drinking water health risk reduction and cost analysis*. EPA Federal Register 64 (USEPA, Office of Radiation Programs), 1999, Washington, DC.

**RADON IN DRINKING WATER AT THE MUNICIPALITY OF  
ZVEČAN ON THE NORTHERN PART OF KOSOVO AND  
METOHIJA**

**Biljana VUCKOVIC<sup>1</sup>, Natasa TODOROVIC<sup>2</sup>, Jovana NIKOLOV<sup>2</sup>,  
Jelena ZIVKOVIC RADOVANOVIC<sup>1</sup> and Ljiljana GULAN<sup>1</sup>**

- 1) *University in Pristina, Kosovska Mitrovica, Faculty of Sciences, Kosovska Mitrovica, Serbia, [biljana.vuckovic@pr.ac.rs](mailto:biljana.vuckovic@pr.ac.rs), [jelena.zivkovic.radovanovic@pr.ac.rs](mailto:jelena.zivkovic.radovanovic@pr.ac.rs), [ljiljana.gulan@pr.ac.rs](mailto:ljiljana.gulan@pr.ac.rs)*
- 2) *University of Novi Sad, Faculty of Science, Department of Physics, Novi Sad, Serbia, [natasa.todorovic@df.uns.ac.rs](mailto:natasa.todorovic@df.uns.ac.rs), [jovana.nikolov@df.uns.ac.rs](mailto:jovana.nikolov@df.uns.ac.rs)*

**ABSTRACT**

The risk from radon in drinking water is significantly lower compared with the total inhaled radon, but not negligible. This study presents the results of detection of radon in drinking water at 10 locations of the municipality of Zvecan, in northern part of Kosovo and Metohija. Concentrations of radon in water were measured by RAD7 H<sub>2</sub>O system (DURRIDGE Co.). Radon concentrations ranged from  $(3.3 \pm 1.6)$  Bq l<sup>-1</sup> to  $(46.3 \pm 6.3)$  Bq l<sup>-1</sup>, with a mean value of 17.3 Bq l<sup>-1</sup>. For the measured radon concentration values, annual effective doses of ingestion and inhalation are determined. During sampling and investigating the values of water temperature and pH were measured.

## MERENJE RADONA U VODI – REM 2018 RADON-IN-WATER PT

**Jelena KRNETA NIKOLIĆ, Gordana PANTELIĆ, Ivana VUKANAC,  
Milica RAJAČIĆ, Marija JANKOVIĆ, Nataša SARAP, Dragana TODOROVIĆ  
i Mirjana RADENKOVIĆ**

*Univerzitet u BEOGRADU, Institut za nuklearne nauke Vinča, Beograd, Srbija,  
jnikolic@vinca.rs, pantelic@vinca.rs, vukanac@vinca.rs, milica100@vinca.rs,  
marijam@vinca.rs, natasas@vinca.rs, beba@vinca.rs, mirar@vinca.rs*

### SADRŽAJ

*Godine 2018. Laboratorija za zaštitu od zračenja i zaštitu životne sredine je učestvovala u interkomparaciji “REM 2018 radon-in-water proficiency test”. Zadatak je bio izmeriti koncentraciju radona u dostavljenom uzorku vode. Ovaj uzorak je meren gama spektrometrijski na HPGe detektoru. Najpre je merenje izvršeno na uzorku u nativnom obliku, bez otvaranja boce u kojoj je dostavljen. Zatim je sadržaj boce prebačen u Marineli geometriju i ponovo izmeren na istom detektoru. Pri proračunu aktivnosti korišćen je transfer efikasnosti programom EFFTRAN i kalibracija QA/QC uzorkom vode, dostavljenim u okviru interkomparacije IAEA-TEL-2018-03. Poređenjem dobijenih rezultata i referentne vrednosti date u preliminarnom izveštaju organizatora interkomparacije, utvrđeno je da postoji značajna zavisnost rezultata od pristupa merenju i proračunu aktivnosti. U ovom radu su predstavljeni rezultati oba pristupa i analiza i komentar tačnosti i preciznosti rezultata.*

### 1. Uvod

Približno 80% izloženosti populacije jonizujućem zračenju potiče od prirodnih izvora, a od toga, približno 52% potiče od izloženosti radonu [1]. Takođe, u studijama je utvrđeno da izloženost povišenim koncentracijama radona povećava rizik od dobijanja kancera pluća [2]. Zbog toga je međunarodna zajednica izuzetno posvećena ispitivanju koncentracije radona u životnoj i radnoj sredini, vodi i vazduhu. Kao rezultat ove posvećenosti, u okviru dokumenta EURATOM Treaty, u članu 35 je definisano da su države potpisnice u obavezi da organizuju kontinuirani monitoring radioaktivnosti u zemljištu, vazduhu i vodi i osiguraju usklađenost rezultata sa standardima koji su propisani ovim i drugim dokumentima [3]. Shodno ovom zahtevu, zemlje potpisnice su u obavezi da imaju monitoring radona u vodi.

U cilju poboljšanja sposobnosti evropskih laboratorija da mere radon u vodi, organizovana je interkomparacija u kojoj je zadatak bio izmeriti koncentraciju radona u vodi uzorkovanoj na javnim česmama (podzemni izvor) u Austriji i Nemačkoj. Mnogo specifičnih problema je vezano kako za uzorkovanje vode u kojoj se nalazi radon, tako i za merenje. Osnovni problem se sastoji u tome što radon lako isparava iz uzorka, te je neophodno da se posuda za uzorkovanje puni tako da voda ima laminaran tok, da se napuni do vrha ne ostavljajući pri tome mehur vazduha i da se u periodu između uzorkovanja i merenja uskladišti na temperaturi koja je niža od temperature prilikom



uzorkovanja, ali iznad 0°C. Takođe, radonovi potomci se lako adsorbuju na zidove suda koji je napravljan od PVC-a ili polistirena, tako da je poželjno da je uzorak smešten u staklenu bocu [4].

Problemi vezani za uzorkovanje su relativno poznati i istraženi. Posebnu problematiku predstavlja merenje takvog uzorka. Većina laboratorija za merenje tečnih uzoraka ima proceduru koja podrazumeva koncentrisanje uparavanjem i/ili prebacivanje u geometriju merenja. U slučaju merenja koncentracije radona u vodi, ova procedura nije primenjiva u potpunosti, već se mora prilagoditi tako da se gubitak radona iz vode minimizuje.

U ovom radu biće opisana procedura merenja radona u vodi u Laboratoriji za zaštitu od zračenja i zaštitu životne sredine Instituta za nuklearne nauke Vinča, primenjena za potrebe interkomparacije “REM 2018 radon-in-water proficiency test”. Poređenjem referentne vrednosti koja je data u preliminarnom izveštaju organizatora interkomparacije i rezultata merenja dobijenih u laboratoriji, utvrđeno je da postoji značajna zavisnost rezultata od pristupa merenju i proračunu aktivnosti. U ovom radu će to poređenje biti diskutovano i zaključci vezani za specifičnosti merenja radona u vodi definisani.

### 2. Materijal i metode

U laboratoriju je dostavljen uzorak vode u staklenoj boci zapremine 1L, zatvoren plastičnim poklopcem sa aluminijumskom folijom na unutrašnjoj strani. Izmerena je masa uzorka sa bocom, provereno je da li postoji mehur vazduha i da li je u toku transporta došlo do curenja uzorka. Nakon što je ustanovljeno da je uzorak u neoštećenom stanju dostavljenu Laboratoriju, pristupilo se merenju.

Merenje je vršeno na HPGe detektoru p-tipa, relativne efikasnosti 20%. Najpre je uzorak izmeren u nativnom stanju, bez prebacivanja u drugu geometriju merenja. Zatim je uzorak vode pažljivo presut iz boce u kojoj je dostavljen, u Marineli geometriju. Marineli posuda je prethodno bila adekvatno pripremljena i oprana, a između presipanja i merenja je prošlo više od 3h, tako da je ravnoteža između radona u uzorku i njegovih potomaka ponovo uspostavljena. Zbog potrebe da se rezultati brzo saopšte, merenje nije ponavljano posle 30 dana. U Marineli geometriju staje manje od 1L uzorka, tako da nije bilo potrebno spirati originalnu ambalažu.

Spektri su analizirani programom GENIE2000, a koncentracija aktivnosti radona je određena preko potomaka  $^{214}\text{Pb}$  (energije 295 i 352 keV) i  $^{214}\text{Bi}$  (energije 609, 1120 i 1764 keV).

Za merenje izvršeno u originalnoj boci, izvršen je transfer efikasnosti programom EFFTRAN [5] uz korišćenje kalibracije laboratorijskim standardom u geometriji boce od 250 ml kao početne kalibracije. U laboratorijskom standardu je bila smeša sledećih radionuklida:  $^{241}\text{Am}$  (640,9 Bq),  $^{109}\text{Cd}$  (2943,9 Bq),  $^{139}\text{Ce}$  (191,1 Bq),  $^{57}\text{Co}$  (160 Bq),  $^{60}\text{Co}$  (487,3 Bq),  $^{137}\text{Cs}$  (357,1 Bq),  $^{203}\text{Hg}$  (358,9 Bq),  $^{113}\text{Sn}$  (557 Bq),  $^{85}\text{Sr}$  (767,4 Bq) i  $^{88}\text{Y}$  (769,8 Bq). Takođe, kao drugi pristup, za merenje u originalnoj ambalaži urađena je i kalibracija efikasnosti QA/QC uzorkom vode dostavljenim u okviru interkomparacije IAEA-TEL-2018-03 u adekvatnoj geometriji. U ovom uzorku su bili elementi  $^{210}\text{Pb}$  aktivnosti 47,9 Bq/kg,  $^{134}\text{Cs}$  aktivnosti 35,7 Bq/kg i  $^{137}\text{Cs}$  aktivnosti 16,1 Bq/kg na dan 01.01.2018. Celokupna količina QA/QC uzorka prebačena je u dobro ispranu bocu iz koje je najpre evakuisan uzorak vode sa radonom. Time je obezbeđeno da se oba uzorka mere u istoj geometriji. Kako količina QA/QC uzorka nije bila dovoljna da popuni bocu

do vrha, boca je dopunjena destilovanom vodom i razblaženje je uzeto u obzir prilikom izračunavanja efikasnosti.

Za merenje u Marineli geometriji, detektor je kalibrisan komercijalnim standardom u Marineli geometriji proizvođača Checz Metrological Institute, Prod. No. 08111v -1.647056, ukupne aktivnosti 80,63 kBq na dan 22.12.2017. Za korekciju kalibracije je iskorišćen identičan QA/QC uzorak vode kao i onaj korišćen za kalibraciju u slučaju merenja u originalnoj ambalaži, pažljivo prebačen u Marineli geometriju.

Aktivnost u uzorku je određena poznatom formulom:

$$A = \frac{NC_C}{mtP_\gamma \varepsilon} \quad (1)$$

gde je  $N$  broj impulsa u fotopiku na određenoj energiji,  $C_C$  je korekcionni faktor za koincidentno sumiranje,  $m$  je masa uzorka,  $t$  je vreme merenja (u ovom slučaju 60000s),  $P_\gamma$  je verovatnoća prelaza i  $\varepsilon$  je efikasnost detekcije na određenoj energiji.

S obzirom na to da mereni uzorak sadrži elemente koji podležu kaskadnom raspadu jezgra, bilo je potrebno naći korekzione faktore za koincidentno sumiranje [7]. Pošto je u pitanju Marineli geometrija, za računanje ovih faktora korišćen je program MEFFTRAN. Za transfer efikasnosti potreban prilikom merenja uzorka u originalnoj ambalaži, korišćen je program EFFTRAN. Kao polazna kalibraciona kriva za transfer efikasnosti, upotrebljena je kriva dobijena laboratorijskim standardom u geometriji plastične boce od 250 ml. Merna nesigurnost svih faktora dobijenih primenom programa EFFTRAN i MEFFTRAN nisu prelazili 3%. Faktori određeni ovim programima dati su u tabeli 1.

**Tabela 1. Korekcionni faktori za koincidentno sumiranje dobijeni programom MEFFTRAN i korekcionni faktori za transfer efikasnosti dobijeni programom EFFTRAN.**

Energija (keV)	Korekcionni faktori za koincidentno sumiranje		Korekcionni faktori za transfer efikasnosti
	Marineli geometrija	Originalna geometrija	
295	1,000	1,002	0,3237
352	1,001	1,000	0,3304
609	1,072	1,048	0,3505
1120	1,090	1,044	0,3719
1764	1,000	1,002	0,3866

Kombinovana relativna merna nesigurnost rezultata određena je na osnovu izraza [6]:

$$u(A) = \sqrt{(u(\varepsilon))^2 + (u(C_C))^2 + (u(m))^2 + (u(N))^2} \quad (2)$$

gde je  $u(\varepsilon)$  relativna merna nesigurnost efikasnosti, data u Jednačini (3) i Jednačini (4),  $u(C_C)$  je relativna merna nesigurnost korekcionnih faktora za koincidentno sumiranje dobijenih programom EFFTRAN i MEFFTRAN,  $u(m)$  je relativna merna nesigurnost merenja mase uzorka i  $u(N)$  je statistička merna nesigurnost broja impulsa u fotopiku. Merne nesigurnosti vremena merenja i verovatnoće prelaza su zanemarljive.

Kombinovana relativna merna nesigurnost efikasnosti određena je na osnovu izraza [6]:

$$u(\varepsilon) = \sqrt{(u(A_{ref}))^2 + (u(N_{ref}))^2 + (u(C_C))^2} \quad (3)$$

gde je  $u(A_{ref})$  relativna merna nesigurnost aktivnosti komercijalnog standarda definisana u sertifikatu,  $u(N_{ref})$  statistička merna nesigurnost broja impulsa u fotopiku pri merenju komercijalnog standarda i  $u(C_C)$  je relativna merna nesigurnost korekcionih faktora za koincidentno sumiranje.

Kombinovana relativna merna nesigurnost efikasnosti dobijene korišćenjem programa EFFTRAN, određena je na osnovu sledeće jednačine [6]:

$$u(\varepsilon) = \sqrt{(u(\varepsilon_{ref}))^2 + (u(C))^2 + (u_D)^2 + (u_S)^2} \quad (4)$$

gde je  $u(\varepsilon_{ref})$  relativna merna nesigurnost referentne efikasnosti (dato u Jednačini (2)),  $u(C)$  je merna nesigurnost transfer faktora izračunatih programom kao statistička nesigurnost Monte Karlo integracije ( $\approx 1,2\%$ ),  $u_D$  je merna nesigurnost vezana za definisanje geometrije detektora i  $u_S$  je merna nesigurnost vezana za karakterizaciju uzorka.

Kako se može videti iz Jednačina (1-3), parametri koji doprinose mernoj nesigurnosti su kombinovani kao nezavisne varijable.

### 3. Rezultati i diskusija

Rezultati merenja podeljeni prema geometriji merenja i prema primenjenoj kalibraciji, dati su u tabeli 2.

**Tabela 2. Aktivnost u Bq/kg za odabrane energije radonovih potomaka, dobijeni korišćenjem različitih geometrija i različitih kalibracija.**

Energija (keV)	Aktivnost (Bq/kg)		
	Marineli geometrija, kalibracija QA/QC uzorkom	Originalna geometrija	
		Kalibracija dobijena EFFTRAN-om	Kalibracija QA/QC uzorkom
295	143,9 ± 9,6	324 ± 22	188 ± 12
352	138,6 ± 8,8	324 ± 21	201 ± 13
609	136,3 ± 8,7	319 ± 20	238 ± 16
1120	146 ± 12	320 ± 26	326 ± 27
1764	142 ± 12	333 ± 27	429 ± 35

Kao što se vidi iz tabele 2, u slučaju Marineli geometrije se dobijaju značajno niži rezultati u odnosu na one dobijene merenjem neperturbovanog uzorka u originalnoj geometriji, za istu kalibracionu krivu. To pokazuje da je prilikom prenošenja uzorka iz originalne u Marineli geometriju došlo do značajnog gubitka radona. S' obzirom na to da je u pitanju gas rastvoren u tečnosti, najverovatnije je zbog perturbacije uzorka radon ispario iz rastvora. Takođe, radon ima sposobnost adsorpcije na zidove suda što je naročito izraženo ako je sud od plastike (PVC ili polistiren). Ova osobina radona dovodi do toga da uzorak u Marineli geometriji nema homogenu raspodelu radona i potomaka po zapremini, čime se u principu menja geometrija merenja i kalibracija rastvorom u

istoj geometriji koji jeste homogen, više nije adekvatna. Druga stvar koja se uočava je da kalibracija QA/QC uzorkom daje rezultate koji ukazuju na odsustvo radioaktivne ravnoteže između potomaka radona. Ovo ipak ne odlikava realno stanje, već je posledica kalibracije rastvorom u kojem nije bilo elemenata sa energijom bliskom energijama  $^{214}\text{Pb}$ . To, i činjenica da je za fitovanje kalibracione krive upotrebljena linearna zavisnost (zbog male širine opsega pokrivenog energijama elemenata u QA/QC uzorku), dovodi do pojave prividne neravnoteže između  $^{214}\text{Pb}$  i  $^{214}\text{Bi}$ . U ovom slučaju je za rezultat u razmatranje uzeta srednja vrednost aktivnosti po energijama  $^{214}\text{Bi}$ , koja iznosi  $(331 \pm 21)$  Bq/kg.

U slučaju merenja neperturbovanog uzorka u originalnoj geometriji i korišćenja programa EFFTRAN za transfer efikasnosti, dobijaju se rezultati koji se slažu po svim energijama i slažu se takođe sa rezultatom dobijenim za  $^{214}\text{Bi}$  sa kalibracijom QA/QC uzorkom. Srednja vrednost aktivnosti po svim energijama je  $(324 \pm 23)$  Bq/kg.

Stoga je kao krajnji rezultat prijavljena vrednost od  $(330 \pm 20)$  Bq/kg, što predstavlja srednju vrednost rezultata dobijenih uz pomoć transfera efikasnosti i rezultata dobijenih za  $^{214}\text{Bi}$  sa kalibracijom QA/QC uzorkom. Kako je referentna vrednost koju je dao organizator interkomparacije  $(320 \pm 16)$  Bq/kg [8], vidimo da je ovaj rezultat prihvatljiv i po kriterijumu tačnosti i po kriterijumu preciznosti.

#### 4. Zaključak

U okviru interkomparacije REM 2018 radon-in-water proficiency test, uzorak vode sa radonom meren je u Laboratoriji za zaštitu od zračenja i zaštitu životne sredine Instituta za nuklearne nauke Vinča. Poređenjem referentne vrednosti koja je data u preliminarnom izveštaju organizatora interkomparacije i rezultata merenja dobijenih u Laboratoriji, utvrđeno je da postoji značajna zavisnost rezultata od pristupa merenju i proračunu aktivnosti. U slučaju merenja uzorka u Marineli geometriji, dobijena vrednost aktivnosti je značajno niža od referentne vrednosti. Korekcije kalibracije korišćenjem QAQC uzorka vode dostavljenog u okviru interkomparacije IAEA-TEL-2018-03, dovele su do poboljšanja rezultata ali istovremeno i do pojave prividne neravnoteže između radonovih potomaka. U slučaju merenja neperturbovanog uzorka u originalnoj geometriji i korišćenja programa EFFTRAN za transfer efikasnosti, dobijaju se rezultati koji se slažu po svim energijama i takođe se slažu sa referentnom vrednošću. Sve ovo govori u prilog tome da je u specifičnoj situaciji merenja radona u vodi nepovoljno prebacivati uzorak iz originalne ambalaže u Marineli geometriju, jer perturbacija uzorka dovodi do gubitka radona iz rastvora. Takođe, može se zaključiti da kalibracija standardom sa silikonskom smolom nije adekvatna u ovoj situaciji. Najpovoljniji rezultat se dobija merenjem neperturbovanog uzorka uz korišćenje transfera efikasnosti.

#### 5. Zahvalnica

Ovaj rad je finansiran u okviru Projekta III43009 Ministarstva za prosvetu, nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije.

#### 6. Literatura

- [1] UNSCEAR 2008 Sources and effects of ionizing radiation, Report to the General Assembly, with scientific annexes, United Nations Scientific Committee, 2008.

- [2] WHO Handbook on Indoor Radon: A Public Health Perspective. Geneva: World Health Organization, 2009.
- [3] The EURATOM Treaty, Consolidated Version, European Union, 2016.
- [4] V. Jobbágy, H. Stroh, G. Marissens, M. Hult, Comprehensive study on the technical aspects of sampling, transporting and measuring radon – in - water, *J Environ. Radioact.* 197, 2019, 30–38.
- [5] T. Vidmar, EFFTRAN – A Monte Carlo Efficiency Transfer Code For gamma-ray spectrometry, *Nucl. Instr. Meth. A* 550, 2005, 603-608.
- [6] IAEA-TECDOC-1401, Quantification of Uncertainty in Gamma-Spectrometric Analysis of Environmental Samples, IAEA, Vienna 2004.
- [7] M.Garcia-Talavera, J.P. Laedermann, M.Decombaz, B. Quintana, M. J. Daza, Coincidence summing corrections for the natural decay series in gamma-ray spectrometry. *Journ. Radiat. Isot.* 54, 2001, 769-776.
- [8] EUROPEAN COMMISSION DIRECTORATE-GENERAL, JOINT RESEARCH CENTRE Directorate G - Nuclear Safety and Security Standards for Nuclear Safety, Security and Safeguards, Preliminary evaluation of the REM 2018 radon-in-water proficiency test.

### **MEASUREMENT OF RADON IN WATER – REM 2018 RADON-IN-WATER PT**

**Jelena KRNETA NIKOLIĆ, Gordana PANTELIĆ, Ivana VUKANAC,  
Milica RAJAČIĆ, Marija JANKOVIĆ, Nataša SARAP, Dragana TODOROVIĆ  
and Mirjana RADENKOVIĆ**

*University of Belgrade, Institute of Nuclear Sciences Vinča, Belgrade, Serbia,  
[jnikolic@vinca.rs](mailto:jnikolic@vinca.rs), [pantelic@vinca.rs](mailto:pantelic@vinca.rs), [vukanac@vinca.rs](mailto:vukanac@vinca.rs), [milica100@vinca.rs](mailto:milica100@vinca.rs),  
[marijam@vinca.rs](mailto:marijam@vinca.rs), [natasas@vinca.rs](mailto:natasas@vinca.rs), [beba@vinca.rs](mailto:beba@vinca.rs), [mirar@vinca.rs](mailto:mirar@vinca.rs)*

#### **ABSTRACT**

In 2018, Laboratory for Environment and Radiation Protection took part in the proficiency test “REM 2018 radon-in-water proficiency test”. The task of this proficiency test was to determine the concentration of radon in the water sample. This sample was measured by gamma spectrometry on HPGe detector. Firstly, the measurement was performed on the native sample, without opening the bottle in which the sample was delivered. After that, the sample was placed into Marinelli beaker and measured again on the same detector. To calculate the activity concentration of radon in the sample, the calibration was performed using QA/QC sample from the IAEA-TEL-2018-03 proficiency test and the efficiency transfer was performed using EFFTRAN software. Comparison of the obtained results with the reference value, provided in the preliminary report of the proficiency test, showed that there is a significant influence of the measurement geometry and the calculation approach. In this paper, the results of both approaches to the measurement and calculation will be presented and the trueness and precision of the results will be analyzed and commented.

# VREMENSKA ZAVISNOST EFIKASNOSTI DETEKCIJE RADONA I NJEGOVIH POTOMAKA U DIFUZIONIM KOMORAMA

Nenad STEVANOVIĆ, Vladimir M. MARKOVIĆ i Dragoslav NIKEZIĆ

Univerzitet u Kragujevcu, Prirodno-matematički fakultet, Kragujevac, Srbija,

[nstevanovic@kg.ac.rs](mailto:nstevanovic@kg.ac.rs), [vmarkovic@kg.ac.rs](mailto:vmarkovic@kg.ac.rs), [nikezic@kg.ac.rs](mailto:nikezic@kg.ac.rs)

## SADRŽAJ

*Određivanje efikasnosti detekcije radona i njegovih potomaka sa SSNTD u difuzionim komorama je jos uvek otvoren problem. Postoji veći broj teorijskih i eksperimentalnih radova u kojima je određivana efikasnost detekcije. U svim radovima, razmatrana je konstanta koncentracija radona na ulazu komore i da je raspodela radona i njegovih potomaka u komori homogena. S obzirom da se koncentracija radona u prostorijama menja tokom vremena, u ovom radu je razmatrana vremenska zavisnost koncentracije radona na ulazu komore i njen uticaj na gustinu tragova tokom merenja. Koncentracije radona i potomaka su računane numeričkim rešavanjem difuzione jednačine. Ustanovljeno je da raspodela radona i njegovih potomaka nije homogena, a da ukupna gustina tragova na detektoru zavisi od vremena. Ova osobina, koja do sada nije izučavana, može poslužiti za detekciju nagle promene koncentracije radona u sredinama sa SSNTD.*

## 1. Uvod

Merenje radona se obično izvodi koristeći čvrsti nuklearni trag detektor (SSNTD), koji je zatvoren u komori, pokrivenoj filter papirom ili nekom drugom propusnom membranom. Takav uređaj se naziva difuzna komora. U literaturi su opisane različite difuzione komore [1]. Za merenje radona ( $^{222}\text{Rn}$ ), torona ( $^{220}\text{Rn}$ ) i njihovih potomaka, raspadnuta i deponovana frakcija potomaka, kao i njihove raspodele moraju biti određene. Monte Karlo metodom je utvrđeno da slobodna frakcija radonovih potomaka iznosi oko 40% [2, 3]. Ponašanje kratkoživećih radonovih potomaka u difuzionoj komori je u [4] modelovano Brovnovim kretanjem. Utvrđeno je da slobodna frakcija  $^{218}\text{Po}$  iznosi do 23%, dok se  $^{214}\text{Pb}$  i  $^{214}\text{Bi}$  skoro potpuno deponuju. Utvrđeno je da je raspodela deponovanih potomaka nehomogena. Ponašanje torona i njegovih potomaka u komori je modelovano u [5]. Raspodele slobodnih i deponovanih potomaka su nehomogene. Slobodna frakcija  $^{216}\text{Po}$  je skoro 100%, a depozicija može biti zanemarena.  $^{212}\text{Pb}$  se skoro potpuno deponuje.

Zajednička pretpostavka u svim radovima je da je koncentracija  $^{222}\text{Rn}$  i  $^{220}\text{Rn}$  na ulazu u komoru konstantna. Međutim, difuzna komora zauzima mali deo prostorije u kojoj se vrši merenje. Koncentracija  $^{222}\text{Rn}$  i  $^{220}\text{Rn}$  unutar prostorije varira tokom vremena i stoga se ne može tretirati kao konstantna. U radu [6] je merena koncentracija radona u Solunu, tokom 1999–2000. Uočene su intenzivne varijacije koncentracije  $^{222}\text{Rn}$  u prostoriji tokom vremena. Slična zapažanja su pronađena u [7, 8]. Promenljive koncentracije radona i thorona u prostoriji utiču na procese difuzije unutar komore. Da bi se ispitala



raspodela radona i njegovog potomaka u komori kao funkcija od vremena, mora da se reši vremenski zavisna difuziona jednačina. Ova jednačina je rešena analitički u [9, 10] uz pretpostavku konstantne koncentracije radona u komori tokom vremena. U ovom radu, numerički je rešena difuziona jednačina za vremenski zavisnu koncentraciju radona, metodom konačnih razlika (FDM) [11]. Na osnovu toga prikazane su raspodele raspada i depozicije potomaka od vremena, kao promena gustine tragova na trag detektoru u funkciji od vremena.

## 2. Difuziona jednačina i granični uslovi

Difuziona komora se može modelovati kao cilindar radijusa  $R$  i visine  $H$ . Radon i toron difunduju u komoru u pravcu ose komore,  $z$ . Nakon njihovog raspada, nastali potomci difunduju unutar komore, raspadaju se i talože se na zidove komore. Difuzija  $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{220}\text{Rn}$  i njihovih potomaka se opisuje koeficijentom difuzije,  $D = 0.054 \text{ cm}^2/\text{s}$  [12]. Brojne koncentracije  $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{220}\text{Rn}$  i njihovih potomaka u komori, za aksijalno simetrični problem, mogu se opisati difuzionom jednačinom u cilindričnim koordinatama:

$$\frac{\partial C_n(t, r, z)}{\partial t} = D \cdot \left( \frac{\partial^2 C_n(t, r, z)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial C_n(t, r, z)}{\partial r} + \frac{\partial^2 C_n(t, r, z)}{\partial z^2} \right) - \lambda_n \cdot C_n(t, r, z) + \lambda_{n-1} \cdot C_{n-1}(t, r, z) \quad (1)$$

gde su  $\lambda_n$  ( $n=0,1,2,3$ ) konstante raspada za  $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{220}\text{Rn}$  i njihove potomke. Poslednji član na desnoj strani jednačine  $\lambda_{n-1} \cdot C_{n-1}(t, r, z)$  predstavlja formiranje potomka od njegovog nuklida pretka, dok  $\lambda_n \cdot C_n(t, r, z)$  opisuje raspad razmatranog potomka. Za računanje koncentracije  $^{222}\text{Rn}$  i  $^{220}\text{Rn}$  ( $n=0$ ) poslednji član je jednak nuli.

Koncentracija radona, torona i njihovih potomaka u komori, pre merenja, bila je jednaka nuli, pa sledi:

$$C_n(t = 0, r, z) = 0, \quad 0 \leq r \leq R; \quad 0 < z \leq H, \quad n = 0, 1, 2, 3 \quad (2)$$

Brojna koncentracija radona ili torona u prostoriji, odnosno na ulazu u komoru se može opisati vremenskom funkcijom  $C_0(t)$ , pa se može napisati da važi:

$$C_0(t, r, z = 0) = C_0(t), \quad 0 \leq r \leq R; \quad t > 0 \quad (3)$$

Član  $\frac{1}{r} \frac{\partial C_n(t, r, z)}{\partial r}$  jednačine (1) ima singularitet na osi komore  $r=0$ , pa se Lopitalovim pravilom može transformisati u:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial C_n(t, r, z)}{\partial r} \Big|_{r=0} = \frac{\partial^2 C_n(t, r, z)}{\partial r^2} \Big|_{r=0}, \quad 0 \leq z \leq H; \quad t > 0; \quad n = 0, 1, 2, 3 \quad (4)$$

Poznato je da se  $^{222}\text{Rn}$  i  $^{220}\text{Rn}$  ne deponuju na zidove komore. Čestice koji dođu do zida, vrata se natrag u unutrašnjost komore, odakle sledi da je fluks čestica na zidu komore jednak nuli, pa se može zapisati:

$$\frac{\partial C_0(t, r, z)}{\partial z} \Big|_{z=H} = \frac{\partial C_0(t, r, z)}{\partial r} \Big|_{r=R} = 0, \quad t > 0 \quad (5)$$

Za razliku od  $^{222}\text{Rn}$  i  $^{220}\text{Rn}$ , njihovi potomci se deponuju na zid, pa se može smatrati da je koncentracija potomaka u vazduhu u bilizni zida jednaka nuli

$C_n(t, r, z) = 0$ ,  $z = H$  ili  $r = R$ , gde je  $n=1,2,3$ , [9, 10].

Diferencijalna jednačina (1), sa navedenim graničnim uslovima, se može računati metodom konačnih razlika (FDM) [17]. Za tu svrhu korišćena je šema centralnog diferenciranja po koordinatama i unapred diferenciranje po vremenu. Na taj način jednačina (1) postaje:

$$\frac{C_{k+1ij}^n - C_{kij}^n}{\Delta t} = D \cdot \left( \frac{C_{ki+1j}^n - 2C_{kij}^n + C_{ki-1j}^n}{\Delta r^2} + \frac{C_{ki+1j}^n - C_{ki-1j}^n}{i \cdot 2\Delta r^2} + \frac{C_{kij+1}^n - 2C_{kij}^n + C_{kij-1}^n}{\Delta z^2} \right) - \lambda_n \cdot C_{kij}^n + \lambda_{n-1} \cdot C_{kij}^{n-1} \quad (6)$$

gde se indeksi  $i, j, k$  odnose na indeksiranje koraka  $\Delta r$ ,  $\Delta z$  i  $\Delta t$  za koordinate  $r, z$  i vreme  $t$ . Jednačina (6) predstavlja formulu za  $C_{k+1ij}^n$  na  $(k+1, i, j)$ -toj tački mreže. Pored diskretizacije jednačine, neophodno je diskretizovati i izraze za početne i granične uslove. Početna koncentracija  $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{220}\text{Rn}$  i njihovih potomaka:

$$C_{lij}^n = 0, 1 \leq i \leq i_{\max}, 1 \leq j \leq j_{\max}, n = 0, 1, 2, 3 \quad (7)$$

gde su  $i_{\max} = R/\Delta r$  i  $j_{\max} = H/\Delta z$ . Vremenska zavisnost koncentracije  $^{222}\text{Rn}$  ili  $^{220}\text{Rn}$  na ulazu u komoru postaje:

$$C_{ki1}^0 = C_0(k\Delta t), 1 \leq i \leq i_{\max}, 1 \leq k \leq k_{\max} \quad (8)$$

gde je  $k_{\max} = T/\Delta t$ , a  $T$  predstavlja vreme izlaganja komore u prostoriji.

Za osu komore,  $r=0$  ( $i=1$ ), za radon i njegove potomke ( $n=0,1,2,3$ ), primenjujući uslov  $\frac{C_{k2j}^n - C_{k0j}^n}{2\Delta r} \Rightarrow C_{0jk}^n = C_{2jk}^n$  i Lopitalovo pravilo, difuziona jednačina u diskretnoj formi postaje:

$$\frac{C_{k+11j}^n - C_{k1j}^n}{\Delta t} = D \cdot \left( 4 \frac{C_{k2j}^n - C_{k1j}^n}{\Delta r^2} + \frac{C_{k1j+1}^n - 2C_{k1j}^n + C_{k1j-1}^n}{\Delta z^2} \right) - \lambda_n \cdot C_{k1j}^n + \lambda_{n-1} \cdot C_{k1j}^{n-1} \quad (9)$$

Za omotač komore  $r=R$  ( $i=i_{\max}$ ) i za bazu komore, suprotno od detektora,  $z=H$  ( $j=j_{\max}$ ), granični uslovi su:

$$\frac{C_{kij_{\max}+1}^0 - C_{kij_{\max}-1}^0}{2\Delta z} = 0 \Rightarrow C_{kij_{\max}+1k}^0 = C_{ij_{\max}-1k}^0 \quad (10)$$

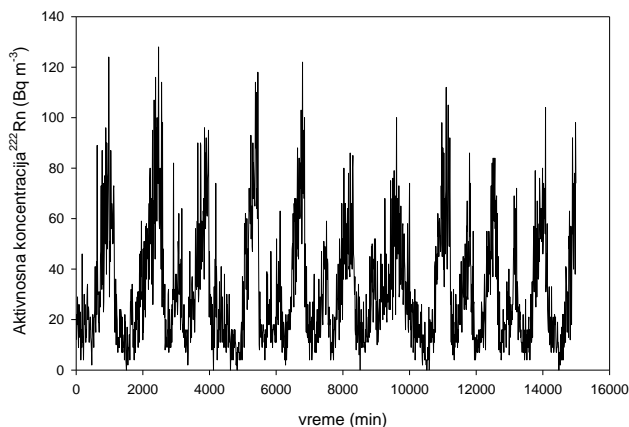
$$\frac{C_{ki_{\max}+1j}^0 - C_{ki_{\max}-1j}^0}{2\Delta r} = 0 \Rightarrow C_{ki_{\max}+1j}^0 = C_{i_{\max}-1j}^0$$

### 3. Rezultati

Promena aktivnosne koncentracije  $^{222}\text{Rn}$  tokom vremena je merena u [13]. Izmereni podaci se mogu predstaviti sledećom funkcijom:

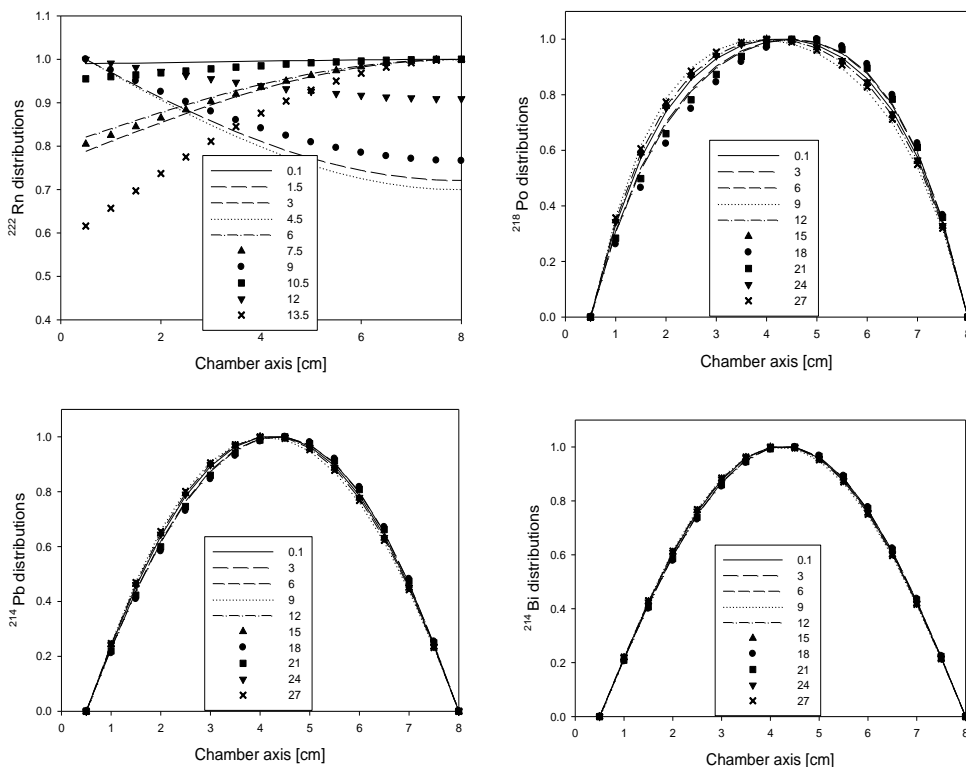
$$A_0 = 5 + (10 + a \cdot u_1) \left( \sin \left( \frac{2\pi}{T} t \right) \right)^2 \quad (11)$$

gde  $a = 40 + 80u_2$ ,  $u_1, u_2$  su slučajni brojevi od 0 do 1. Modelovana aktivnosna koncentracija je predstavljena na Slici 1.



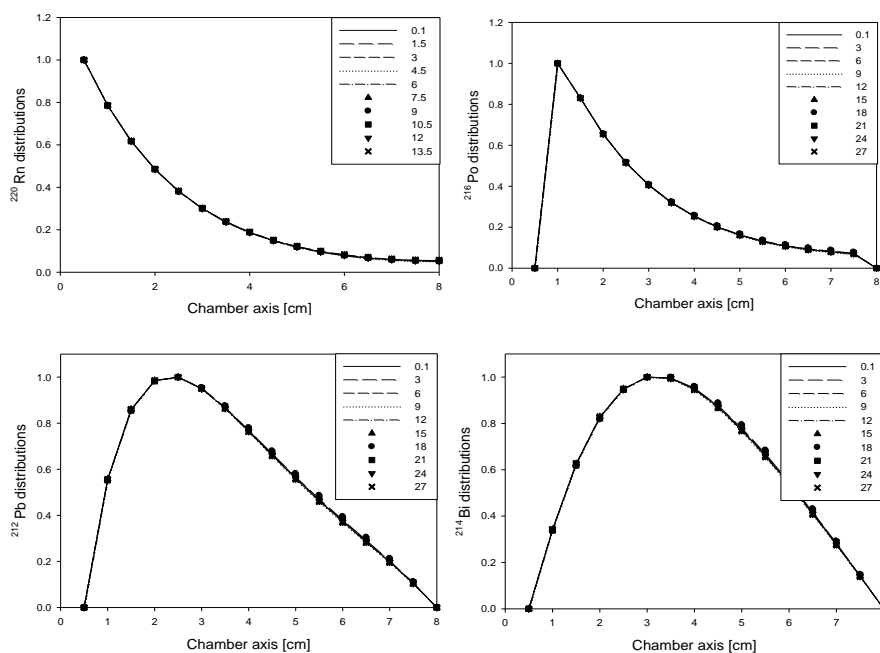
Slika 1. Aktivnosna koncentracija  $^{222}\text{Rn}$  u prostoriji [6].

Sa slike se može videti da se aktivnosna koncentracija  $^{222}\text{Rn}$  značajno menja tokom vremena i da je odnos maksimalnih i minimalnih vrednosti i do pet puta. Na sledećoj slici su prikazane normirane raspodele  $^{222}\text{Rn}$  i njegovih potomaka duž ose komore dobijene rešavanjem difuzione jednačine. Sa grafika se jasno vidi da raspodela  $^{222}\text{Rn}$  nije homogena, kao što se to tretira u literaturi i da je to posledica vremenski promenljive koncentracije u prostoriji.



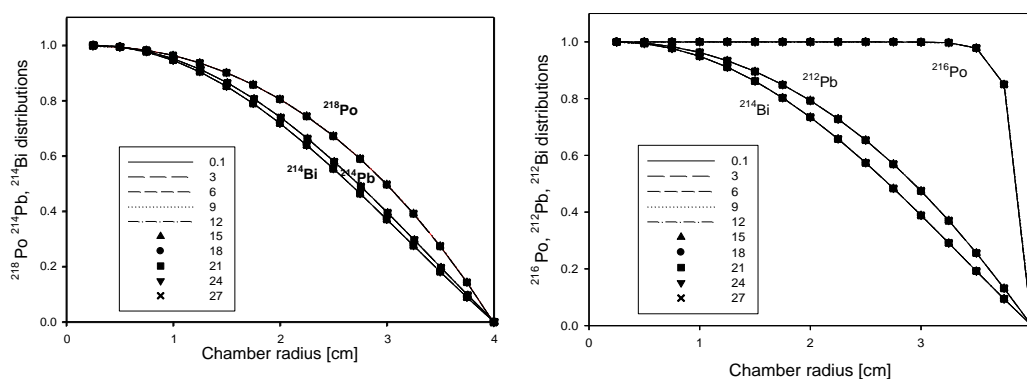
Slika 2. Raspodela  $^{222}\text{Rn}$  i potomaka duž ose komore u funkciji od vremena. Vreme je parametar izražen u danima.

Značajno je istaći da se i raspodela menja tokom vremena. Sa slike se vidi da je normirana raspodela potomaka duž ose komore nehomogena. Najveća koncentracija je na sredini komore i opada ka njenim bazama. Za razliku od  $^{222}\text{Rn}$ , normirana raspodela potomaka je stalna tokom vremena, ali se menjaju njihove aktivnosti. Distribucije  $^{220}\text{Rn}$  i njegovih potomaka duž ose komore je prikazana na sledećoj slici. Raspodele su nehomogene i sa maksimumom koji je poremeren ka ulazu komore, zbog veoma kratkog vremena poluraspada  $^{220}\text{Rn}$ . Sa grafika se može videti da se normirane raspodele ne menjaju tokom vremena.



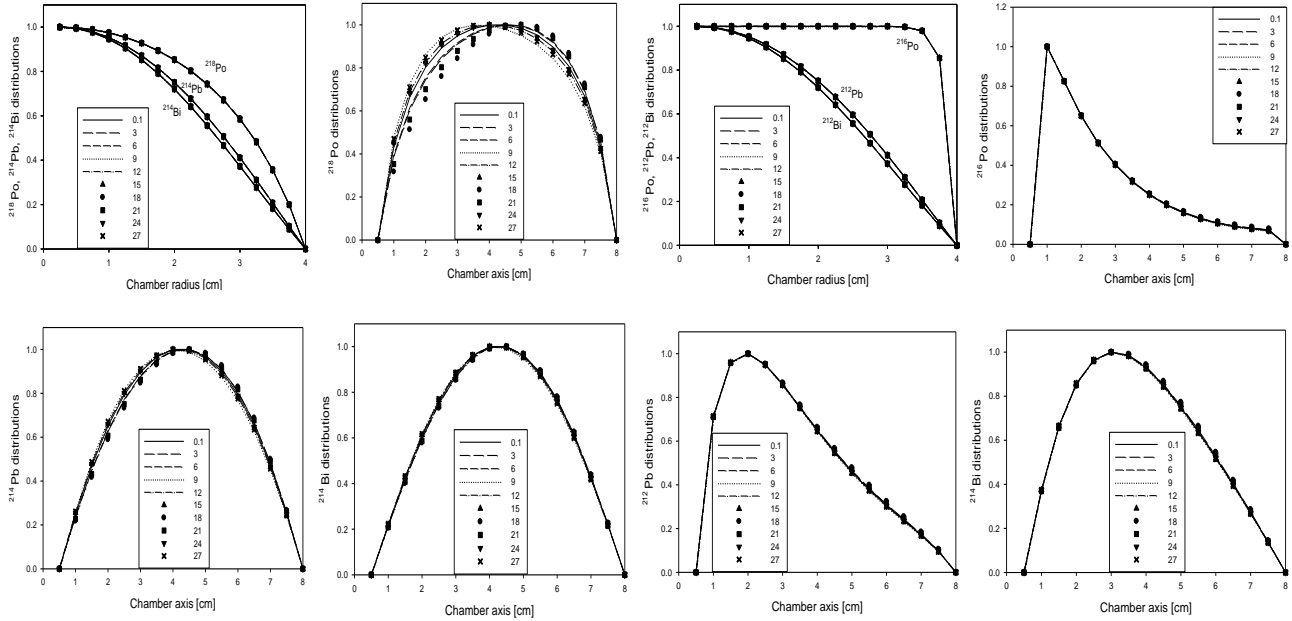
Slika 3. Raspodela  $^{220}\text{Rn}$  i potomaka duž ose komore u funkciji od vremena.

Raspodele  $^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$  potomaka po duž radijusa su prikazane na sledećem grafiku. Raspodela  $^{216}\text{Po}$  je homogena duž radijusa, jer zbog kratkog vremena života ne stigne da difunduje i raspadne se gde je i nastao, dok  $^{218}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Pb}/^{212}\text{Pb}$  i  $^{214}\text{Bi}/^{212}\text{Bi}$  imaju nehomogene raspodele sa najvećom koncentracijom na osi komore. Raspodele se ne menjaju tokom vremena.



Slika 4. Raspodela  $^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$  potomaka duž radijusa komore u funkciji od vremena.

Poznavanje depozicije potomaka na zidove komore (na omotaču i na osnovama) je od značaja za određivanje efikasnosti detekcije. Na sledećoj slici su date raspodele deponovanih potomaka na osnovi komore i na omotaču. Raspodele deponovanih čestica su slične raspodelama čestica u komori.



Slika 4. Raspodele  $^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$  potomaka deponovanih na zidove komore.

Pored raspodele slobodnih i nataloženih čestica, neophodno je poznavati njihove frakcije. Za određivanje frakcije korišćen je sledeći set jednačina:

$$N_{T\lambda}^n = 2\pi\lambda_n \sum_{i=1}^{i \max} \sum_{j=1}^{j \max} C_{k,i,j}^n (i\Delta r) \Delta r \Delta z \quad (12)$$

$$N_{dT}^n = 2\pi D \left( \sum_{i=1}^{i \max} \frac{\partial C}{\partial z} \Big|_{z=0} (i\Delta r) \Delta z + \sum_{i=1}^{i \max} \frac{\partial C}{\partial z} \Big|_{z=H} (i\Delta r) \Delta r \Delta z + \sum_{z=2}^{z \max-1} \frac{\partial C}{\partial r} \Big|_{r=R} (i_{\max} \Delta r) \Delta z \right) \quad (13)$$

$N_{T\lambda}^n$  i  $N_{dT}^n$  predstavljaju ukupan broj čestica koji se raspadne u komori i koji se deponuje u jedinici vremena. Frakcija raspadnutih čestica se određuje kao:

$$f_{nr} = \frac{N_{T\lambda}^n}{N_{T\lambda}^n + N_{dT}^n} \quad (15)$$

U literaturi se koristi i odnos aktivnosne koncentracije potomaka i  $^{222}/^{220}\text{Rn}$ , koji se može računati kao:

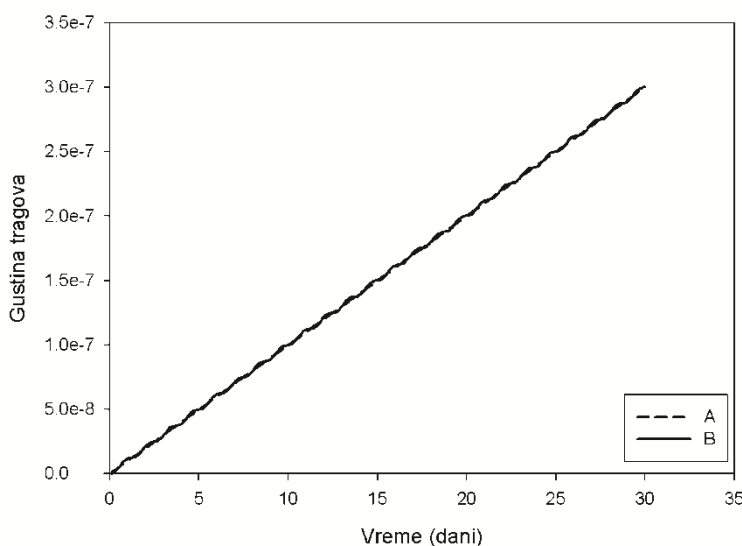
$$f_n = \frac{2\pi\lambda_n \sum_{i=1}^{i_{\max}} \sum_{j=1}^{j_{\max}} C_{k,i,j}^n (i\Delta r)\Delta r\Delta z}{2\pi\lambda_0 \sum_{i=1}^{i_{\max}} \sum_{j=1}^{j_{\max}} C_{k,i,j}^0 (i\Delta r)\Delta r\Delta z} \quad (16)$$

Frakcije su računane i date u tabeli 1.

**Tabela 1. Slobodne frakcije  $^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$  potomaka izražene u procentima.**

Progeny	Po		Pb		Bi	
	$f_{nr}$	$f_n$	$f_{nr}$	$f_n$	$f_{nr}$	$f_n$
$^{222}\text{Rn}$	2,74	6,18	0,034	0,079	1,13	0,0014
$^{220}\text{Rn}$	90,7	66,1	0,028	0,025	0,34	0,0001

Frakcije  $f_n$  su poređene sa [10] i dobijeno je dobro slaganje. Iz tabele se može videti da  $^{216}\text{Po}$  ima najveću slobodnu frakciju, zbog veoma kratkog vremena poluraspada od 0,158 s. Svi potomci osim  $^{216}\text{Po}$ , se skoro u potpunosti deponuju na zidove komore. Na sledećem grafiku prikazana je vremenska zavisnost gustine tragova u slučaju kada je koncentracija radona A) konstantna i B) promenljiva kao na slici 1. Vidi se da u slučaju da je koncentracija radona konstantna tada gustina tragova linearno raste vremenom, dok kada varira tokom vremena, tada gustina tragova se menja, osciluje, ali uvek raste.



**Slika 5. Gustina tragova alfa čestica kao funkcija od vremena**

#### 4. Zahvalnica

Rad je pomoglo Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja kroz projekat 171021.



### 5. Literatura

- [1] D. Nikezic, K.N. Yu, Formation and Growth of Tracks in Nuclear Track Materials. *Mater. Sci. Eng. R Rep.* 46,2004, 51-123.
- [2] V.S.Y. Koo, C.W.Y. Yip, J.P.Y. Ho, D. Nikezic, K.N. Yu, Experimental study of track density distribution on LR115 detector and deposition fraction of  $^{218}\text{Po}$  in diffusion chamber, *Nucl. Instr. and Meth. A* 491,2002, 470.
- [3] V.S.Y. Koo, C.W.Y. Yip, J.P.Y. Ho, D. Nikezic, K.N. Yu, Deposition fractions of  $^{218}\text{Po}$  in diffusion chambers, *Appl. Radiat. Isot.* 59, 2003, 49.
- [4] D. Nikezic, N. Stevanovic, Radon progeny behavior in diffusion chamber, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B* 239,2005, 399–406.
- [5] D. Nikezic, N. Stevanovic, Behavior of  $^{220}\text{Rn}$  progeny in diffusion chamber, *Nucl. Instrum. Methods A* 570,2007, 182-186.
- [6] A. Clouvas, S. Xanthos, M. Antonopoulos-Domis, Long term measurements of radon equilibrium factor in Greek dwellings, *Rad. Prot. Dosim.* 103,2003, 269–272.
- [7] J. Planinic, B. Vukovic, V. Radolic. Radon time variations and deterministic chaos, *J.Env. Rad.* 75, 2004, 35-45.
- [8] C.J. Groves-Kirkby, A.R. Denman, R.G.M. Crockett, P.S. Phillips, A.C. Woolridge, G.K. Gillmore. Time-integrating radon gas measurements in domestic premises: comparison of short-medium- and long-term exposures, *J. Env. Rad.* 86, 2006, 92-109.
- [9] D. Pressyanov, I. Rusinov, G. Simeonov, Radon progeny deposition in track-detection diffusion chambers, *Nucl. Instrum. and Meth. Phys. Res. A*, 435, 1999, 509-513.
- [10] D. Pressyanov, Radon progeny distribution in cylindrical diffusion chambers, *Nucl. Instrum. and Meth. Phys. Res. A* 596, 2008, 446-450.
- [11] M.N.O. Sadiku, Numerical techniques in Electromagnetic, Boca Raton, Fla.: CRC Press, USA, 1992.
- [12] W.W. Nazaroff, A.V. Nero, Radon and its Decay Products in Indoor Air, Wiley, New York, 1988.

## **TIME DEPENDENT EFFICIENCE OF DETECTION OF RADON AND ITS PROGENZ BY DIFFUSION CHAMBER**

**Nenad STEVANOVIĆ, Vladimir M. MARKOVIĆ and Dragoslav NIKEZIĆ**  
*Faculty of science, University of Kragujevac, Serbia, [nstevanovic@kg.ac.rs](mailto:nstevanovic@kg.ac.rs),  
[vmarkovic@kg.ac.rs](mailto:vmarkovic@kg.ac.rs), [nikezic@kg.ac.rs](mailto:nikezic@kg.ac.rs)*

### **ABSTRACT**

In this paper, the efficiency of detection for radon and its progeny in diffusion chamber was considered. It was done by calculating diffusion equation for radon and its progeny in diffusion chamber. The equation was calculated by finite difference method. In this paper it was shown that distributions of radon and its progeny are inhomogeneous and tracks density varies through the exposure time.

## ГУСТИНА ТРАГОВА ЧВРСТИХ ТРАГ ДЕТЕКТОРА ИЗЛАГАНИМ У ДИФУЗИОНИМ КОМОРАМА

Владимир МАРКОВИЋ, Ненад СТЕВАНОВИЋ, Јелена СТАЈИЋ,  
Биљана МИЛЕНКОВИЋ и Драгослав НИКЕЗИЋ

Универзитет у Крагујевцу, Природно-математички факултет, Србија,  
vmarkovic@kg.ac.rs, nstevanovic@kg.ac.rs, stajicjelena11052012@gmail.com,  
bmilenkovic@kg.ac.rs, nikezic@kg.ac.rs

### САДРЖАЈ

*У овом раду развијен је модел који омогућава одређивање густине трагова и осетљивости траг детектора CR-39 и LR-115 у дифузионим коморама. Модел укључује физичке процесе дифузије, депозиције и распада радона и његових потомака у цилиндричним дифузионим коморама, које су прекривене пермеабилном мембраном. Одређивање просторне расподеле концентрација радона и његових потомака унутар коморе и на њеним зидовима, омогућава одређивање броја видљивих трагова на траг детектору. Услов видљивости трагова по развијању, код CR-39 детектора, је да су алфа честице упале у детектор под углом који је већи од критичног угла. Критични угао зависи од услова развијања детектора и представља функцију од енергије упадних алфа честица. Код LR-115 детектора, критични угао у функцији од енергије се може заменити средњим критичним углом и енергетским прозором алфа честица. Резултати овога рада показују интересантну чињеницу да осетљивост траг детектора приказаног у виду једног броја није увек оправдано. Густина трагова на детектору не мора бити униформна, већ може зависити од радијуса.*

### 1. Увод

Дифузиона комора је једноставан уређај за мерење концентрације радона [1,2]. Састоји се од коморе, која је врло често цилиндричног облика, покривена са мембраном кроз коју дифундује радон [3]. Унутар коморе се налази SSNT детектор (Solid State Nuclear Detector). Латентни трагови, које формирају алфа честице емитоване од стране радона и његових потомака, се могу посматрати оптичким микроскопом, након процеса нагризања [2]. Видљиви трагови се затим пребројавају и доводе у везу са концентрацијом радона ван коморе [4,5]. Калибрацију коморе је могуће извршити експериментално [6], познавајући концентрацију радона у ваздуху у коме је комора постављена, или теоријским моделовањем. У овоме раду је приказан начин теоријског моделовања у којем су укључени сви релевантни физички процеси који се одигравају – дифузија, распад, депозиција и нагризање детектора.

## 2. Методологија

Радон гас из ваздуха у комору доспева дифузијом кроз пермеабилну мембрану. Затим се процесом дифузије дисрибуира унутар дифузионе коморе, где се временом распада. На месту распада настају радонови краткоживећи потомци, који настављају процес дифузије од места настанка. За разлику од самог радона, његови потомци се могу депоновати на зидове коморе.

Процес дифузије радона и његових поромака се може описати једначином дифузије која у цилиндричним координатама, узимајући у обзир аксијалну симетрију (независност од угла  $\varphi$ ), поприма облик [7]:

$$\frac{\partial C_n(r, z, t)}{\partial t} = D \cdot \left( \frac{\partial^2 C_n(r, z, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial C_n(r, z, t)}{\partial r} + \frac{\partial^2 C_n(r, z, t)}{\partial z^2} \right) - \lambda_n \cdot C_n(r, z, t) + \lambda_{n-1} \cdot C_{n-1}(r, z, t) \quad (1)$$

Даље поједностављивање процеса дифузије се може постићи претпостављајући константну концентрацију радона на улазу у комору  $C_{n=0}|_{z=0} = C_0$ . Узимајући почетне концентрације радона унутар саме коморе нултим, извор радона се налази само на почетку коморе. Овакав сценарио води до временски независне дифузије која описује равнотежно стање [7]:

$$D \cdot \left( \frac{\partial^2 C_n(r, z, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial C_n(r, z, t)}{\partial r} + \frac{\partial^2 C_n(r, z, t)}{\partial z^2} \right) - \lambda_n \cdot C_n(r, z, t) + \lambda_{n-1} \cdot C_{n-1}(r, z, t) = 0 \quad (2)$$

За решавање стационарне дифузионе једначине су потребни и гранични услови. За радон се може узети гранични услов нултог флукса ка зидовима  $J = -D \frac{\partial C_{Rn}}{\partial z} = -D \frac{\partial C_{Rn}}{\partial r} = 0$ , што води ка аксијалној дифузији. Радијална дифузија се не одиграва и једначина дифузије радона постаје:

$$D \frac{\partial^2 C_{Rn}(z)}{\partial z^2} - \lambda_{Rn} \cdot C_{Rn}(z) = 0 \quad (3)$$

Ова једначина поседује аналитичка решења облика

$$C_{Rn}(z) = c_1 e^{\omega z} + c_2 e^{-\omega z}, \quad (4)$$

где су  $\omega^2 = \frac{\lambda_{Rn}}{D}$  и  $c_1$  и  $c_2$  су константе које треба наћи на основу граничних услова [7].

Због различитих граничних услова за потомке, и чињенице да унутар саме коморе постоји извор потомака (тачке у којима родитељски радионуклиди доживљавају распад), дифузионе једначине за потомке није могуће аналитички решити. За решавање овог проблема могуће је упослити метод коначних разлика FDM (Finite Diference Method). У дискретној форми диференцијална једначина потомака има облик [7]:

$$\frac{C_{i+1j}^n - 2C_{ij}^n + C_{i-1j}^n}{\Delta r^2} + \frac{C_{i+1j}^n - C_{i-1j}^n}{2 \cdot i \cdot \Delta r^2} + \frac{C_{ij+1}^n - 2C_{ij}^n + C_{ij-1}^n}{\Delta z^2} - \frac{\lambda_n}{D} \cdot C_{ij}^n = \frac{\lambda_{n-1}}{D} C_{ij}^{n-1}, \quad (5)$$

где је  $i=1, M; j=1, N$ .  $M$  и  $N$  су бројеви тачака којим се дискретизује простор дуж радијуса и дубине коморе, респективно. Дискретизујући простор и саму диференцијалну једначину, проблем решавања диференцијалне једначине је могуће свести на проблем решавања  $M \times N$  независних линеарних једначина. Превођењем у матрични формализам, систем од  $M \times N$  једначина је могуће свести на једну матричну једначину [7]:

$$\mathbf{A}^n \times \mathbf{C}^n = \mathbf{B}^n, \quad (6)$$

где је  $\mathbf{A}^n$  квадратна матрица величине  $M \cdot N \times M \cdot N$  која садржи коефицијенте уз вредности концентрација,  $\mathbf{C}^n$  је матрица колона која представља непознате концентрације, а  $\mathbf{B}^n$  је матрица колона која садржи слободне чланове линеарних једначина. Индекс  $n = 1, 2, 3$  представља  $P_0, P_1$  и  $V_i$  респективно.

Решење једначине (6) су концентрације потомака унутар дифузионе коморе. Потомци, хемијски активни, имају способност да се депонују на зидове коморе, што доводи до акумулације депоноване фракције. Поред процеса депозиције, депонована фракције се може увећавати распадом већ депонованих родитељских радионуклида у случају олова и бизмута. Диференцијална једначина која описује депозицију  $i$ -тог потомка је облика:

$$\frac{dN_i}{dt} = S_i - \lambda_i N_i + \lambda_{i-1} N_{i-1}, \quad (7)$$

где члан  $\lambda_0 N_0$  у једначини (7) не постоји за полонијум. Са  $S$  је означена брзина депозиције која се може одредити рачунањем флукса ка зидовима:

$$J_R = -D \frac{\partial C}{\partial r} \Big|_{r=R}, \quad J_H = -D \frac{\partial C}{\partial z} \Big|_{z=H} \quad \text{и} \quad J_{H_0} = D \frac{\partial C}{\partial z} \Big|_{z=0} \quad (8)$$

Решења једначине (7) за почетне услове  $N_i(t=0) = 0, i = 1, 2, 3$  су:

$$\frac{A_1^k}{\Delta s_k} = \frac{\lambda_1 N_1^k}{\Delta s_k} = J_1^k (1 - e^{-\lambda_1 t}) \quad (9a)$$

$$\frac{A_2^k}{\Delta s_k} = \frac{\lambda_2 N_2^k}{\Delta s_k} = (J_1^k + J_2^k)(1 - e^{-\lambda_2 t}) + \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} J_1^k (e^{-\lambda_2 t} - e^{-\lambda_1 t}) \quad (9b)$$

$$\begin{aligned} \frac{A_3^k}{\Delta s_k} &= \frac{\lambda_3 N_3^k}{\Delta s_k} = (J_1^k + J_2^k + J_3^k)(1 - e^{-\lambda_3 t}) + \\ &+ \left[ \frac{\lambda_3 (\lambda_2 - \lambda_1)(J_1^k + J_2^k) - \lambda_2 \lambda_3 J_1^k}{(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_2)} \right] (e^{-\lambda_3 t} - e^{-\lambda_2 t}) + \frac{\lambda_2 \lambda_3}{(\lambda_3 - \lambda_1)(\lambda_2 - \lambda_1)} J_1^k (e^{-\lambda_3 t} - e^{-\lambda_1 t}) \end{aligned} \quad (9c)$$

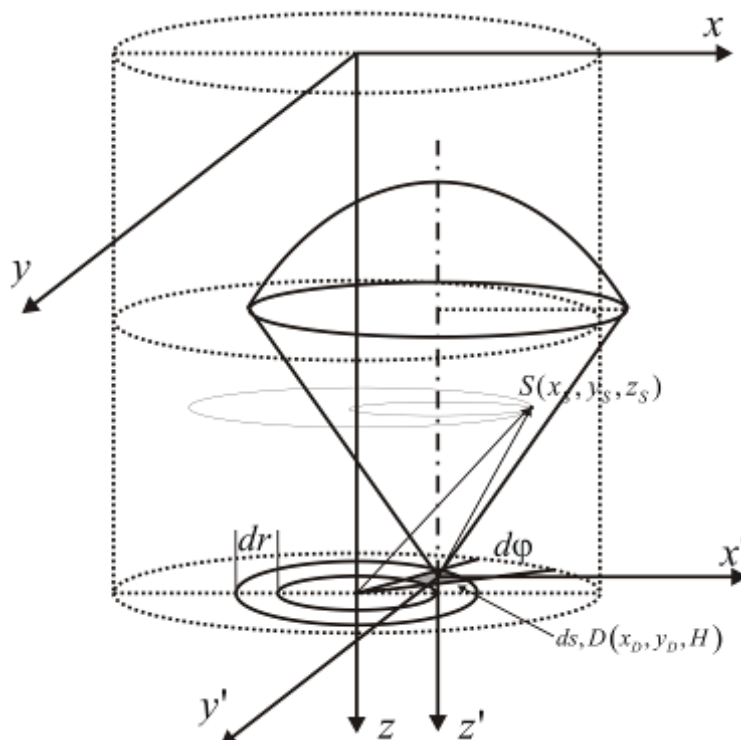
Познавањем дистрибуције концентрација, тј. активности на зидовима коморе и у ваздуху, могуће је одредити број латентних трагова на детектору постављеном на дну коморе. Процесом нагризања, не морају сви латентни трагови бити видљиви. Може се дефинисати критеријум видљивости трагова уводећи критични угао који зависи од услова нагризања. На тај начин број видљивих трагова ће бити одређен

дометом алфа честица и углом под којим упадају у детектор. Домет алфа честица дефинише запремину облика сфере из које је могуће детектовати алфа честице [7]. Критични угао дефинише конус у оквиру кога емитоване алфа честице могу формирати видљиве трагове. Комбинацијом ових геометрија добија се запремина која подсећа на корнет сладоледа, као на слици 1.

Математички ови услови су дефинисани једначинама сфере и конуса:

$$[r_s \cos \varphi_s - r_D \cos \varphi_D]^2 + [r_s \sin \varphi_s - r_D \sin \varphi_D]^2 + [H - z_s]^2 \leq Range^2, \quad (10a)$$

$$[r_s \cos \varphi_s - r_D \cos \varphi_D]^2 + [r_s \sin \varphi_s - r_D \sin \varphi_D]^2 \leq \tan^2 \theta_C \cdot [H - z_s]^2, \quad (10b)$$



Слика 1. Геометрија детекције трагова.

Густина трагова на детектору се може одредити интеграцијом по читавој запремини коморе и њеним зидовима, уз испуњене услове дате једначинама (10a и 10b):

$$J = \int_{V+S} \frac{dA \cdot I \cdot d\Omega}{ds}, \quad (11)$$

Где је  $dA$  активност у тачки,  $I$  принос алфа честица,  $d\Omega = \frac{d\vec{s}_D \cdot \vec{n}_0}{4\pi r_{SD}^2}$  просторни угао под којим се види елемент површине детектора  $ds$ . Зависност критичног угла од услова нагризања и енергије алфа честица  $\theta_C = \theta_C(E)$  је изведена од стране [8] за CR-39 детектор. Код LR-115 типа детектора критични угао

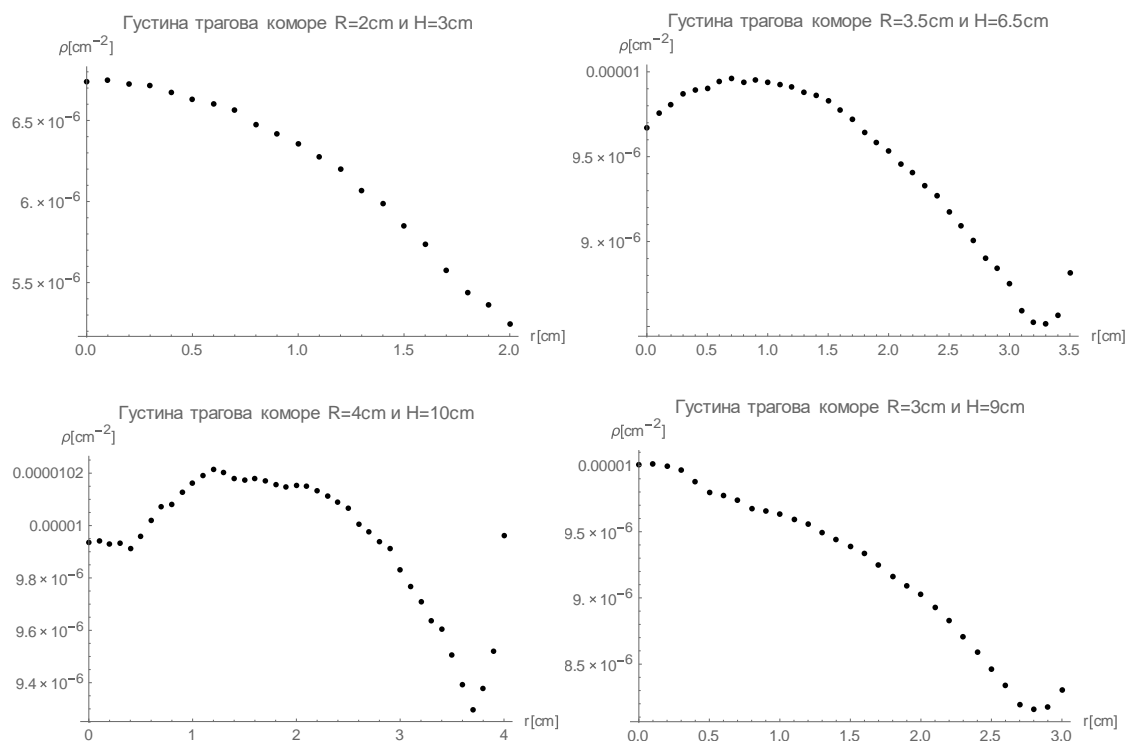
$\theta_c = \theta_c(E)$  се може заменити средњом вредношћу  $\langle \theta_c \rangle$ , уз постојање енергетског прозора [9,10].

### 3. Резултати и дискусија

Описана методологија омогућава да се теоријски изврши калибрација детектора. Оно што је интересантно је да овакав приступ омогућава раздвајање трагова појединачних потомака, тј. добијања спектра густине трагова у зависности од радионуклида. Овај приступ омогућава оптимизацију коморе и одређивање „идеалних“ димензија коморе за мерење концентрације радона. Још једна интересантна чињеница је да резултати показују да густина трагова на дну коморе није константна већ зависи од растојања од центра коморе. На сликама 2 и 3 је приказана густина трагова за различите димензије комора.

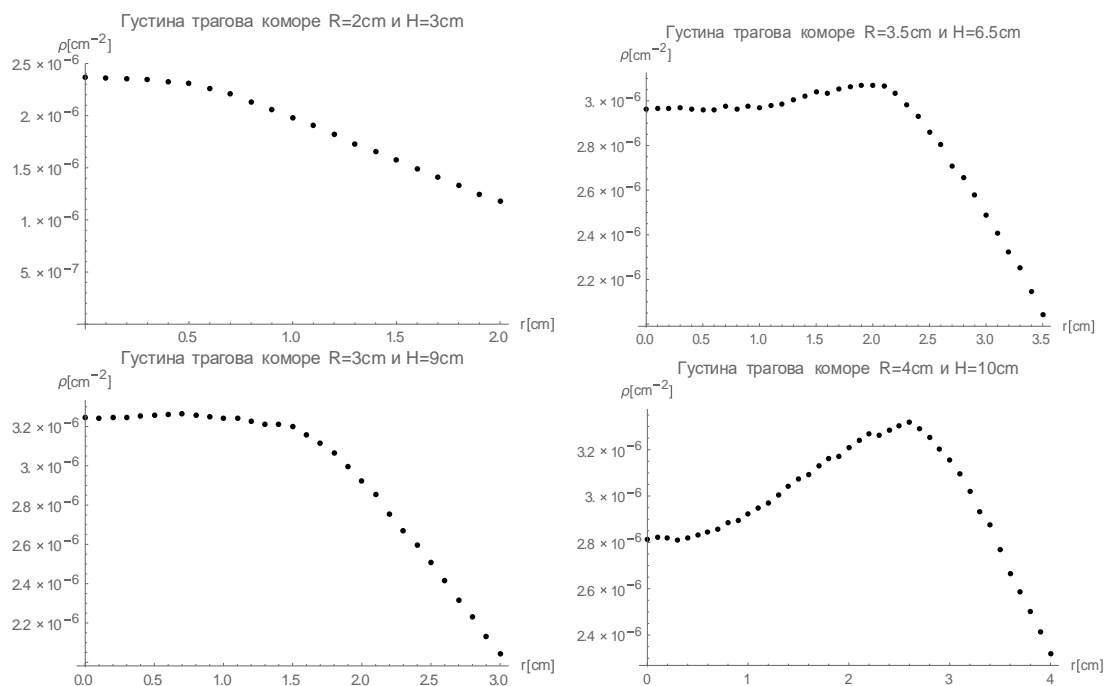
Са слика 2 и 3 се може видети да густина трагова није униформна и зависи од димензија коморе. Укупан број трагова на дну коморе представља суму видљивих трагова добијених од алфа честица радона и два полонијума. Сваки од ових радионуклида има своју дистрибуцију унутар и на зидовима коморе. Тако, укупна расподела трагова представља суму парцијалних трагова са појединих региона и од појединих радионуклида.

Природно је не очекивати униформну расподелу трагова на дну коморе. Код комора већег радијуса са CR-39 детектором, јасно је изражен допринос трагова од омотача цилиндра коморе на већем радијусу. Одатле потиче повећање густине трагова при крају радијуса код комора код којих је  $R = 3\text{ cm}$  и  $R = 4\text{ cm}$ .



Слика 2. Расподела густине трагова код CR-39 детектора.





Слика 3. Расподела густине трагова код LR-115 детектора.

#### 4. Захвалница

Овај рад је подржан од стране Министарства просвете, науке и технолошког развоја Србије, кроз пројекат N<sub>0</sub> 171021

#### 5. Литература

- [1] R.L. Fleischer. Radon in the environment – opportunities and hazards. *Nucl. Tracks Radiat. Meas.* 14 (4), 1988, 421-435.
- [2] V.A. Nikolaev, R. Ilic. Etched track radiometers in radon measurements: a review. *Radiat. Meas.* 30, 1999, 1–13.
- [3] H.A. Khan, I.E. Qureshi, M. Tufail. Passive Dosimetry of Radon and its Daughters Using Solid State Nuclear Track Detectors (SSNTDs). *Rad. Prot. Dos.* 46 (3), 1993, 149–170.
- [4] A. Danis, M. Oncescu, M. Ciubotariu. System for calibration of track detectors used in gaseous and solid alpha radionuclides monitoring. *Radiat. Meas.* 34, 2001, 155–159.
- [5] Matiullah. Determination of the calibration factor for CR-39 based indoor radon detector. *J. Radioanal Nucl. Chem.* 298, 2013, 369–373.
- [6] Abdalla, A.M., Hajry, A.A. Radon irradiation chamber and its applications. *Nucl. Instr. Methods Phys. Res. A*, 786, 2015, 78–82.
- [7] Markovic, V.M., Markovic, A.G., Stevanovic, N., Nikezic, D., Rn progeny diffusion, deposition and track distribution in diffusion chamber with permeable membrane, *Radiat. Meas.* 124, 2019, 146–157.

- [8] M. Calamosca, S. Penzo, G. Gualdrini. Experimental determination of CR-39 counting efficiency to particles to design the holder of a new radon gas dosimeter. *Radiat. Meas.* 36, 2003, 217 – 219.
- [9] M. Mansy, M.A. Sharaf, S.U. El-Kamees, M. Abo-Elmagd. Theoretical calculation of SSNTD response for radon measurements and optimum diffusion chambers dimensions. *Radiat. Meas.* 41, 2006, 222.
- [10] A. Pape, J.C. Adlo, R. Barillon, A. Haessler, A. Hoernel, A. Nourreddine, D. Oster, D. Weidmann. Quantitative  $\alpha$ -particle detection in a homogeneous medium with LR115. *Nucl. Instrum. Meth. B.* 143, 1998, 557-560.

## TRACK DENSITY IN SSNT DETECTORS

**Vladimir MARKOVIĆ, Nenad STEVANOVIĆ, Jelena STAJIĆ,  
Biljana MILENKOVIĆ and Dragoslav NIKEZIĆ**

Faculty of Science, University of Kragujevac, Serbia, [vmarkovic@kg.ac.rs](mailto:vmarkovic@kg.ac.rs),  
[nstevanovic@kg.ac.rs](mailto:nstevanovic@kg.ac.rs), [stajicjelena11052012@gmail.com](mailto:stajicjelena11052012@gmail.com), [bmilenkovic@kg.ac.rs](mailto:bmilenkovic@kg.ac.rs),  
[nikezic@kg.ac.rs](mailto:nikezic@kg.ac.rs)

### ABSTRACT

This paper presents model which can be used to determine track density in SSNT detectors placed in cylindrical diffusion chamber. Model includes dominant physical processes, such as diffusion, deposition, decay and etching processes. It is shown that track density can be dependent on dimensions of diffusion chamber. Furthermore, detector sensitivity, taken as constant, should be replaced with function which depends on radius. This was shown for CR-39 and LR-115 type detectors inside of diffusion chamber.

**МЕТОДЕ ДЕТЕКЦИЈЕ И МЕРНА  
ИНСТРУМЕНТАЦИЈА**



## EVALUATION OF DOSE RATE DATA PROVIDED BY NON-GOVERNMENTAL NETWORKS

Miloš ŽIVANOVIĆ<sup>1</sup>, Nikola KRŽANOVIĆ<sup>1</sup>, Giorgia IURLARO<sup>2</sup>,  
Steven BELL<sup>3</sup>, Viacheslav MOROSH<sup>4</sup>, Miloš ĐALETIĆ<sup>1</sup>  
and Gordana PANTELIĆ<sup>1</sup>

- 1) Vinca Institute of Nuclear Sciences, University of Belgrade, Belgrade, Serbia, [milosz@vinca.rs](mailto:milosz@vinca.rs), [krzanovic@vinca.rs](mailto:krzanovic@vinca.rs), [pantelic@vinca.rs](mailto:pantelic@vinca.rs)
- 2) Italian National Agency for New Technologies, Energy and Sustainable Economic Development (ENEA), Rome, Italy, [giorgia.iurlaro@enea.it](mailto:giorgia.iurlaro@enea.it)
- 3) NPL Management Limited, Teddington, United Kingdom, [steven.bell@npl.co.uk](mailto:steven.bell@npl.co.uk)
- 4) Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Braunschweig, Germany, [viacheslav.morosh@ptb.de](mailto:viacheslav.morosh@ptb.de)

### ABSTRACT

*In recent years, the number of non-governmental networks providing quasi real time dose rates is growing. This data is available to the general public via open access based platforms on the internet. The research on the non-governmental networks is scarce and the measurements represented there are mostly carried out using broadly available commercial simple hand-held devices. Without proper testing of these devices in metrological laboratories, there is a significant possibility for discrepancies between the official and non-governmental data, which may have wider implications. Within project 16ENV04 Preparedness, a systematic study of non-governmental networks produced a list of 16 types of dosimeters that are commonly used. Four dosimeters of each type were sourced and commissioned by project partners and are currently undergoing the testing. Test procedures are shortly described in this paper and preliminary results for 2 types of dosimeters are presented.*

### 1. Introduction

Government early warning networks have been in existence in Europe (EURDEP) for several decades [1]. An important event for their expansion was Chernobyl accident in 1986. As of 2017, there were more than 5500 stations monitoring ambient dose rate in Europe [2]. After the Fukushima accident, the number of non-governmental networks and monitoring stations started to increase rapidly. Proliferation of cheap equipment, which is usually sold on the internet, also helped the expansion of such networks. Large number of measurement locations can often rival or exceed the number of governmental monitoring stations. The main difference between instruments from governmental and non-governmental networks is that the former are in most cases subjected to regulatory control, testing and calibration, and the later are usually not. Some research has been conducted regarding the non-governmental networks [3, 4, 5, 6], but only a few networks and devices were studied. A comprehensive study is still needed.

Measuring instruments used in non-governmental networks (MINN) are studied within the EMPIR project “16ENV04 Preparedness, Metrology for mobile detection of

ionising radiation following a nuclear or radiological incident”. In the first step, a survey of non-governmental networks was conducted and 16 types of commonly used MINNs were identified, sourced and commissioned. Currently, testing of the MINNs is being conducted [7].

After the MINNs are tested, it will be decided whether the data provided by non-governmental networks are metrologically sound. This conclusion will help answer two main questions:

- 1) Is it possible to use non-governmental data for official purposes, such as emergency response?
- 2) Is the data provided by non-governmental networks likely to cause unwarranted panic in general public or to cause public to lose confidence in official data?

One of the possible uses of the crowd sourced data might be for European Data Exchange Platform – EURDEP [1].

### 2. Instruments selected for testing

Within the project, extensive survey of citizen networks was performed. One of the tasks of the survey was to identify 16 types of MINNs in order to be sourced and commissioned by project partners. These MINNs are tested within the project in order to evaluate them and to check the feasibility of using non-governmental data for official purposes. The instruments that were selected are presented in Table 1.

**Table 1. List of MINNs selected for testing.**

<b>Manufacturer</b>	<b>Type</b>	<b>Responsible Partner</b>
Gamma-Scout GmbH	Gamma Scout	PTB
Soeks	Quantum	PTB
Safecast	bGeigie Nano	PTB
MagnaSci	µRad Monitor Modell A	PTB
International Medcom	IMI Inspector Alert V2	NPL
International Medcom	RAD100	NPL
MagnaSci	µRad Monitor Modell A3	NPL
DIY Geiger Counter	Geiger Kit GK-B5	NPL
Quarta	RADEX RD1212-BT	ENEA
GQ Electronics	GMC-300E+ V4	ENEA
MAZUR Instrument	PRM-7000	ENEA
S.E. International Inc.	Radiation Alert Monitor 200	ENEA
GQ Electronics	GMC-320+	VINS
GQ Electronics	GMC-500+	VINS
MagnaSci	µRAD Monitor model KIT1	VINS
SE International	Monitor 4 Geiger Counter Kit	VINS

### 3. Testing design and locations

MINN testing is performed in 4 different institutes: Italian National Agency for New Technologies, Energy and Sustainable Economic Development (ENEA), Italy, Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Germany, National Physics Laboratory (NPL), England and Vinca Institute of Nuclear Sciences (VINS), Serbia.

Linearity test is performed by irradiating MINNs at different dose rates, between 300 nSv/h and 100  $\mu$ Sv/h. Each institute is performing irradiations on their own premises. For this purposes, S-Cs radiation quality is used, except in case of VINS, where S-Co radiation quality is used.

Energy dependence test is performed by irradiating MINNs in different standard radiation qualities, including S-Am, S-Cs, S-Co and X-ray qualities from narrow series (N-series). Each institute is performing irradiations on their own premises.

Other tests are performed only in PTB facilities. Inherent background of MINNs is determined in low background underground laboratory UDO II. Response to secondary cosmic radiation is performed on the floating platform on a lake in the vicinity of PTB Braunschweig. Sensitivity to small variations of ambient dose equivalent (several nSv/h) is tested at the plume simulation site in PTB, Braunschweig. Finally, dependence of MINN response on environmental conditions is tested in climatic test cabinet in PTB, Braunschweig.

### 4. Preliminary results and discussion

Preliminary tests were performed in VINS. First results were obtained for two types of dosimeters and include linearity and energy dependence. Range of dose rates was extended to 700  $\mu$ Sv/h, in order to perform non-linearity correction for energy dependence tests. Energy dependence tests were performed for mean beam energies between 33 keV (N-40) and 1250 keV (S-Co).

Both dosimeter types use the same GM-tube for the low dose rates corresponding to the tested range. There are three possible ways to read out the instrument indications: direct readout from the MINN display, using the program provided by the manufacturer for real time monitoring (the results can be saved) and by using the program to read the stored values from the MINN internal memory. All three ways were compared and have been shown to be equivalent, with one exception – the maximum indicated value is different for all three modes. Calibration coefficients are internally stored in the MINNs and can be read and changed by using the provided program. Instrument indications are not corrected for dead time in any of the three read-out modes.

Relative response for energy dependence test was corrected for instrument non linearity. Linearity and energy dependence graphs are shown in Figures 1 to 4.

The evaluation of the results was performed according to the criteria set in IEC 60846-1:2009 standard. The relative response due to the angle of incidence and photon energy should be within the range between 0.71 and 1.67, and due to the dose rate within the range between 0.85 and 1.22 [8].

Analysis of the results shows that all 8 MINNs have satisfying linearity within the tested range. For dose rates higher than 7  $\mu$ Sv/h, there is a clear trend of decreasing sensitivity, mainly due to the dead time. For lower dose rates, the statistical uncertainty becomes significant and no trend can be deduced.

Energy response of the instruments was normalized to response for  $^{137}\text{Cs}$ . GM tubes are not compensated, which causes high overestimates (up to 550 %) of dose rate for low



photon energies. The energy dependence is satisfactory for all 8 instruments only for mean energies between 164 keV (N-200) and 1.25 MeV (S-Co), which is lower than the minimum rated range according to the standard [8].

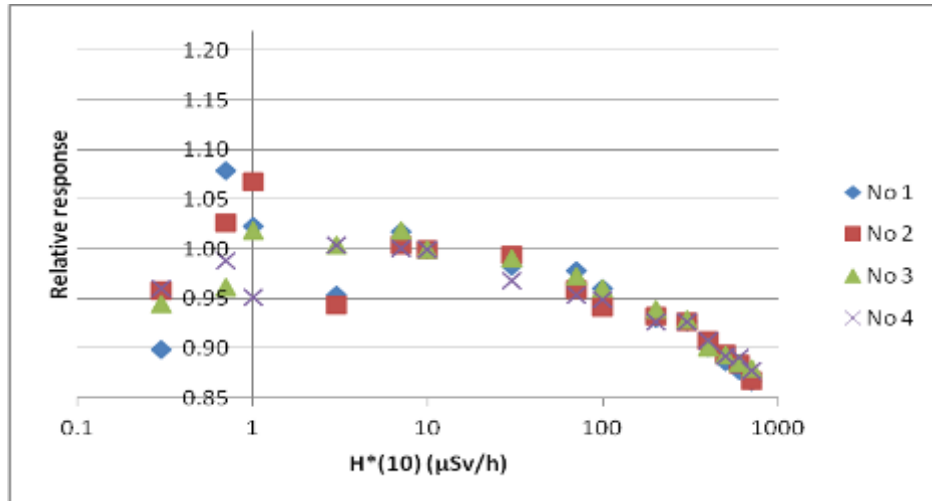


Figure 1. Dosimeter type 1 linearity.

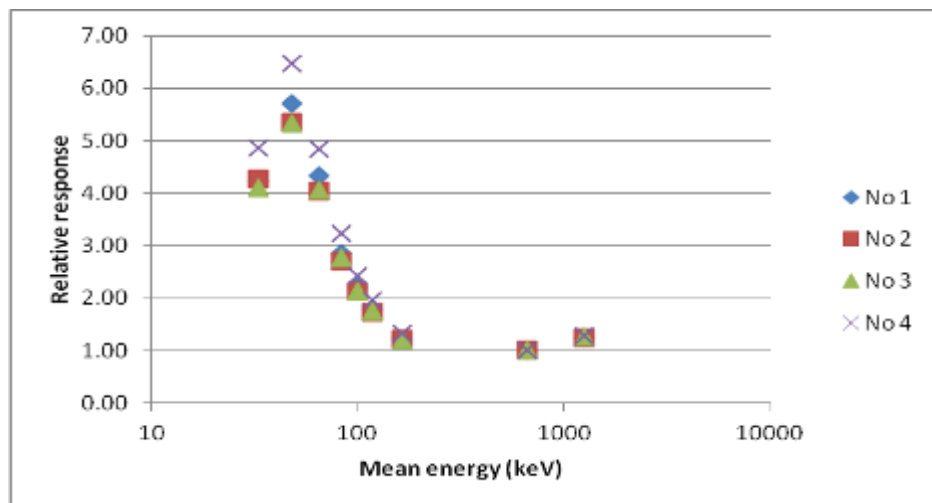


Figure 2. Dosimeter type 1 energy dependence.

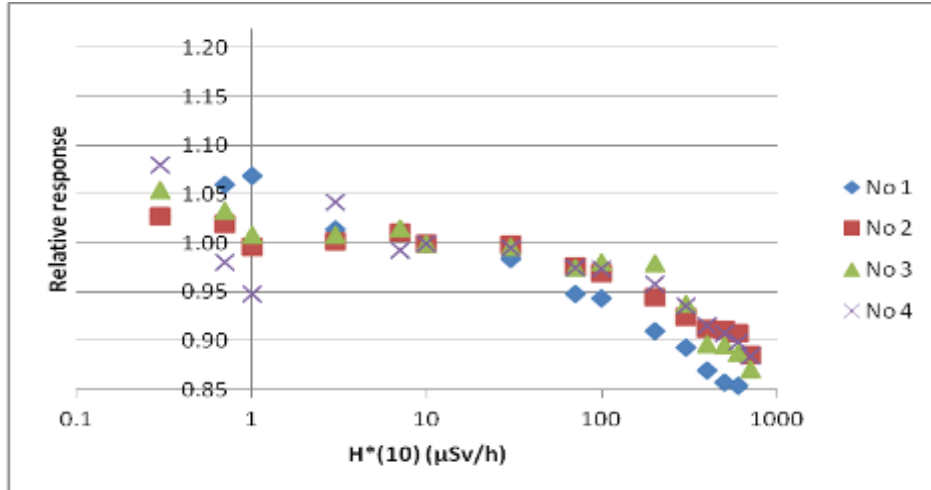


Figure 3. Dosimeter type 2 linearity.

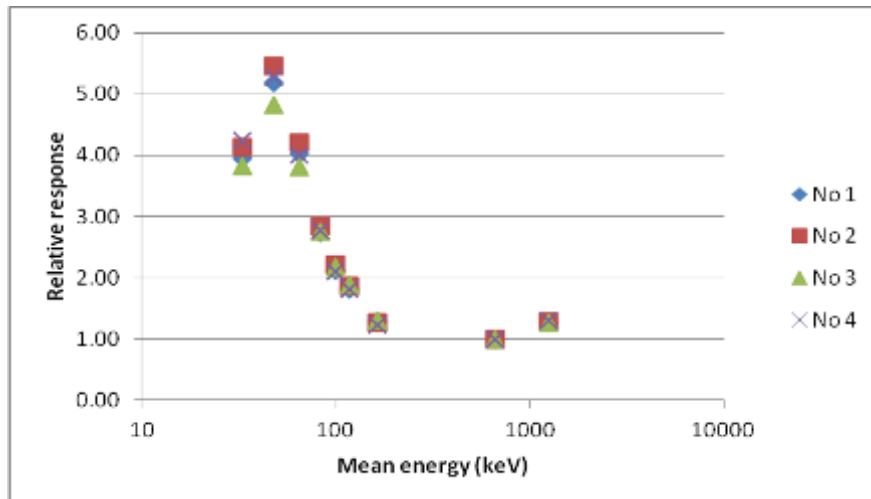


Figure 4. Dosimeter type 2 energy dependence.

## 5. Conclusion

Preliminary tests on MINNs commonly used in citizen networks show that at least some of the instruments have less than desirable properties and that further testing is needed. Even though many low cost instruments have good response in radionuclide fields ( $^{137}\text{Cs}$  and  $^{60}\text{Co}$ ) and good linearity, the situation is not so good when low energy photons are used. Other influence quantities, such as angle of incidence, temperature and humidity should also be considered to evaluate such instruments.

## 6. Acknowledgement

The research presented in this paper was realized within 16ENV04 Preparedness project. This project has received funding from the EMPIR programme co-financed by the Participating States and from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme.

### 7. Literature

- [1] EURDEP (EUropean Radiological Data Exchange Platform). Website: <https://eurdep.jrc.ec.europa.eu/Entry/Default.aspx>, accessed on 22.03.2019.
- [2] H. Dombrowski, M. Bleher, M. De Cort, R. Dabrowski, S. Neumaier and U. Stöhlkerb. Recommendations to harmonize European early warning dosimetry network systems. *J. Instrum.* 12, 2017, P12024.
- [3] SAFecast, <https://blog.safecast.org/>, accessed on 22.03.2019.
- [4] M. Coletti, C. Hultquist, W.G. Kennedy, G. Cervone. Validating Safecast data by comparisons to a U. S. Department of Energy Fukushima Prefecture aerial survey. *J. Environ. Radioact.* 171, 2017, 9-20
- [5] G. Cervone, C. Hultquist. Calibration of Safecast dose rate measurements. *J. Environ. Radioact.* 190–191, 2018, 51-65.
- [6] G. Iurlaro, L. Sperandio, J. Marganec, P. Kessler, K. Bogucarskis, S. Bell, L. Campani, M. De Cort, H. Dombrowski, A. Helbig, S. Ioannidis, D. Lazarevic, F. Mariotti, B. Morelli, G. Pantelic, A. Röttger, M. Zivanovic, C. Duff. Environmental measurements of radioactivity and radiation protection quantity available in non-governmental networks web sites. Book of abstracts, 3rd European Radiological Protection Research Week, October 2018, Rovinj, 110-111, [https://erpw2018.com/wp-content/uploads/2018/09/ERPW-abstracts-book\\_web\\_pages.pdf](https://erpw2018.com/wp-content/uploads/2018/09/ERPW-abstracts-book_web_pages.pdf).
- [7] 16ENV04 Preparedness, Publishable Summary for 16ENV04 Preparedness, Metrology for mobile detection of ionising radiation following a nuclear or radiological incident, February 2018, [http://www.preparedness-empir.eu/wp-content/uploads/16ENV04\\_Publishable\\_Summary-Feb-18.pdf](http://www.preparedness-empir.eu/wp-content/uploads/16ENV04_Publishable_Summary-Feb-18.pdf).
- [8] IEC 60846-1:2009, Radiation protection instrumentation - Ambient and/or directional dose equivalent (rate) meters and/or monitors for beta, X and gamma radiation - Part 1: Portable workplace and environmental meters and monitors, IEC, 2009.

**ISPITIVANJE VALJANOSTI PODATAKA O JAČINI DOZE  
DOBIJENIH IZ CIVILNIH MREŽA**

**Miloš ŽIVANOVIĆ<sup>1</sup>, Nikola KRŽANOVIĆ<sup>1</sup>, Giorgia IURLARO<sup>2</sup>,  
Steven BELL<sup>3</sup>, Viacheslav MOROSH<sup>4</sup>, Miloš ĐALETIĆ<sup>1</sup> i Gordana PANTELIĆ<sup>1</sup>**

1) *Institut za nuklearne nauke Vinča (VINS), Univerzitet u Beogradu, Beograd, Srbija,*  
*milosz@vinca.rs, krzanovic@vinca.rs, pantelic@vinca.rs*

2) *Italijanska nacionalna agencija za nove tehnologije (ENEA), Rim, Italija,*  
*giorgia.iurlaro@enea.it*

3) *NPL, Tedington, Velika Britanija, steven.bell@npl.co.uk*

4) *Fizičko-tehnička državna ustanova (PTB), Braunšvajg, Nemačka,*  
*viacheslav.morosh@ptb.de*

**SADRŽAJ**

Broj civilnih mreža koje pružaju kvazi-trenutne podatke o jačini doze je poslednjih godina u porastu. Ovi podaci su javno dostupni preko internet platformi sa slobodnim pristupom. Istraživanja na temu civilnih mreža su retka, a merenja čiji su rezultati u njima predstavljeni su uglavnom izvršena široko dostupnim jednostavnim ručnim dozimetrima. Bez detaljnog testiranja ovih uređaja u metrološkim laboratorijama, postoji velika verovatnoća javljanja značajnih razlika između zvaničnih podataka i podataka iz civilnih mreža, što može imati značajne posledice. U okviru projekta 16ENV04 Preparedness je sprovedeno sistematsko ispitivanje civilnih mreža. Tako je identifikovano 16 tipova uređaja koji se često koriste. Učesnici projekta su nabavili po 4 dozimetra od svakog tipa, čije je ispitivanje trenutno u toku. Procedura korišćena za ispitivanje je ukratko opisana u ovom radu i prikazani su preliminarni rezultati za 2 tipa dozimetara.

## ISPITIVANJE AKTIVNIH AMBIJENTALNIH DOZIMETARA UPOLJIMA POZADINSKOG ZRAČENJA NISKOG INTEZITETA

Miloš ĐALETIĆ<sup>1</sup>, Aleksandra SOKIĆ<sup>2</sup>, Nikola KRŽANOVIĆ<sup>1</sup>  
i Miloš ŽIVANOVIĆ<sup>1</sup>

- 1) Institut za nuklearne nauke „Vinča”, Laboratorija za zaštitu od zračenja i zaštitu životne sredine „Zaštita”, Beograd, Srbija, [djaletic@vinca.rs](mailto:djaletic@vinca.rs), [krzanovic@vinca.rs](mailto:krzanovic@vinca.rs), [milosz@vinca.rs](mailto:milosz@vinca.rs)
- 2) JP „Nuklearni objekti Srbije”, Beograd, Srbija, [aleksandra.sokic@nuklearniobjekti.rs](mailto:aleksandra.sokic@nuklearniobjekti.rs)

### SADRŽAJ

*Etaloniranje aktivnih ambijentalnih dozimetara izvodi se pri poznatim jačinama ambijentalnog doznog ekvivalenta pri čemu se vrši korekcija na vrednost prirodnog pozadinskog zračenja (fona). Izmerenu vrednost ambijentalnog doznog ekvivalenta zračenja u životnoj sredini uvećava vrednost inherentnog fona detektora. Cilj ovog rada je ispitivanje aktivnih ambijentalnih dozimetara na niskom nivou fona unutar čelične zaštite brojača gama-aktivnosti celog tela i određivanje inherentne vrednosti pozadinskog zračenja za svaki dozimetar. Rezultati ispitivanja pokazuju da inherentno pokazivanje dozimetra može imati značajan uticaj na izmerene vrednosti ambijentalnog doznog ekvivalenta pozadinskog zračenja.*

### 1. Uvod

U Laboratoriji za radijaciona merenja (u daljem tekstu LRM), Laboratorije za zaštitu od zračenja i zaštitu životne sredine „Zaštita” Instituta „Vinča”, vrši se etaloniranje aktivnih ambijentalnih dozimetara koji se koriste u oblasti zaštite od zračenja. Etaloniranje se vrši prema metodama iz dokumenta Međunarodne agencije za nuklearnu energiju IAEA SRS 16:2000 [1]. Etaloniranje se obavlja u opsegu koji obuhvata 8 redova veličine ambijentalnog doznog ekvivalenta ( $H^*(10)$ ). Referentne vrednosti su određene tako što se merni sklop pre početka merenja nulira, što eliminiše inherentni fon ali i prirodni fon. Zbog toga je pre etaloniranja korisničkih uređaja potrebno izvršiti očitavanja pokazivanja ukupnog fona, a zatim se ove vrednosti oduzimaju od pokazivanja pri svim vrednostima  $H^*(10)$ . Ovo je posebno važno za niske vrednosti  $H^*(10)$ , reda veličine  $10^{-7}$  do  $10^{-6}$  Sv/h, kada je referentna vrednost uporediva sa prirodnim fonom. Prema metodama SRS 16 [1] u slučajevima etaloniranja uređaja koji se koriste za merenje  $H^*(10)$  čiji je intezitet istog reda veličine kao i nivo prirodnog fona, neophodno je izvršiti korekciju na inherentni fon detektora. Inherentni fon detektora predstavlja izmerenu vrednost  $H^*(10)$  kada se detektor nalazi u sredini u kojoj je nivo zračenja veoma nizak. Inherentni fon je moguće ispitivati u takozvanim niskofonskim laboratorijama. Primer je laboratorija u rudniku soli, u kojoj je prirodni fon oko 2 nSv/h [2]. Ispitivanje dozimetara prikazanih u ovom radu vršeno je unutar

čelične zaštite brojača gama-aktivnosti celog tela (u daljem tekstu WBC – Whole Body Counter) koji pripada JP, „Nuklearni objekti Srbije“.

### 2. Postavka merenja i korišćeni instrumenti

Za merenje niskih vrednosti  $H^*(10)$  korišćen je Automess 6150 AD6 sa scintilacionom sondom 6150AD-b/H. Sonda sadrži plastični scintilator visoke osetljivosti i širokog energetskog opsega merenja. Pomenuta sonda je značajna za ova merenja budući da pruža mogućnost merenja  $H^*(10)$  reda nekoliko nSv/h usled niske vrednosti inherentnog fona i dobre energetske zavisnosti koja se kreće od -20% do +5% na celom energetskom opsegu (normalizovano na Cs-137). Tipične vrednosti inherentnog fona za ovu sondu su manje od 2 nSv/h [3]. Scintilaciona sonda je etalonirana u kvalitetu S-Co (srednja energija 1,25 MeV) u opsegu od 150 nSv/h do 10  $\mu$ Sv/h, sa korekcijom na prirodni fon.

Merenje na niskom nivou prirodnog zračenja vršeno je u WBC kabini. Svi uređaji su bili postavljeni na pod kabine. Referentne vrednosti su dobijene merenjem scintilacionom sondom, koja su obavljena istovremeno sa ostalim uređajima. Inherentni fon je određivan iz razlike pokazivanja uređaja i referentne vrednosti. Dodatna ispitivanja su izvršena u etalonskim poljima izvora Co-60. Referentne vrednosti su bile uvećane za prirodni fon izmeren scintilacionom sondom.

Testirani su uređaji *DMRZ-M15* [4], *DMRZ-M15A* [5] proizvedeni u Laboratoriji "Zaštita" INN Vinča i *GMC-320*, *GMC-500+* proizvođača GQ Electronics LLC, Seattle, USA.



Slika 1. Dozimetri prilikom merenja unutar WBC čelične kabine.

### 3. Rezultati ispitivanja

Na osnovu merenja scintilacionom sondom u WBC kabini, određena je srednja vrednost  $\dot{H}^*(10)$  od 16,9 nSv/h. S obzirom na deklarisanu inherentni fon za ovu sondu od

maksimalno 1 nSv/h, korigovana vrednost iznosi 16 nSv/h. Inherentni fon za ostale dozimetre određen je oduzimanjem ove vrednosti od odgovarajućih izmerenih vrednosti pri istim uslovima.

Rezultati ispitivanja dozimetara u niskofonskoj laboratoriji, kao i u referentnim poljima gama zračenja, dati su u tabelama 1 i 2. Primećuje se značajna razlika između referentne i izmerene vrednosti, posebno u poljima zračenja niskog inteziteta, što ukazuje na prisustvo inherentnog fona detektora.

**Tabela 1. Rezultati ispitivanja ambijentalnih dozimetara DMRZ-M15(A).**

Naziv ambijentalnog dozimetra					
DMRZ-M15 (1)		DMRZ-M15 (2)		DMRZ-M15A	
Jačina ambijentalne doze $\dot{H}^*(10)$ (nSv/h)					
Referentna	Izmerena	Referentna	Izmerena	Referentna	Izmerena
16,0	95,5	16,0	94,3	16,0	47,7
78,2	155,6	79,2	155,1	80,2	113,4
228,2	312,2	229,2	300,6	230,2	261,4
378,2	445,0	379,2	455,2	380,2	410,8
578,2	664,8	579,2	654,9	580,2	624,7
778,2	842,9	779,2	870,7	780,2	842,4
1078	1150	1079	1183	1080	1166
2078	2073	2079	2166	2080	–
3078	3191	3079	3318	3080	3269
5078	5242	5079	5380	5080	5405
10078	10121	10079	10448	10080	10674
20078	–	20079	20172	20080	20750

**Tabela 2. Rezultati ispitivanja ambijentalnih dozimetara GMC-320 i GMC-500+.**

Naziv ambijentalnog dozimetra							
GMC-320 (1)		GMC-320 (2)		GMC-500+ (1)		GMC-500+ (2)	
Jačina ambijentalne doze $\dot{H}^*(10)$ (nSv/h)							
Referentna	Izmerena	Referentna	Izmerena	Referentna	Izmerena	Referentna	Izmerena
16,0	71,2	16,0	65,2	16,0	73,5	16,0	75,3
73,4	142,1	73,4	131,3	73,4	132,0	73,4	139,4
373,4	416,7	373,4	427,8	373,4	440,7	373,4	450,2
773,4	907,5	773,4	859,9	773,4	859,4	773,4	854,5
1073	1176	1073	1207	1073	1172	1073	1135
3073	3023	3073	2969	3073	3076	3073	3119
10073	10200	10073	10141	10073	9788	10073	10038

U tabeli 3 date su uporedne vrednosti merenja u WBC kabini i pri prirodnom nivou pozadinskog zračenja. Vrednost apsolutnog doprinosa inherentnog fona detektora se kreće u granicama od 30 nSv/h do 80 nSv/h.

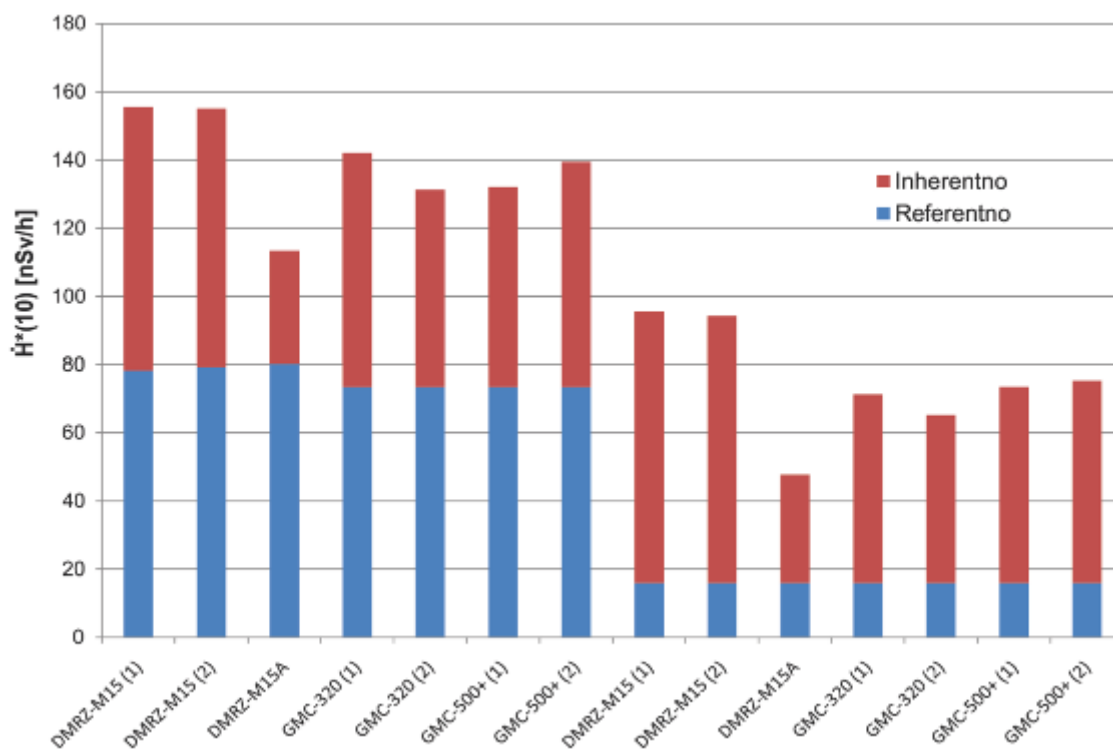
Na slici 2 prikazan je grafik na kojem se vidi odnos vrednosti inherentnog pokazivanja detektora i referentne jačine doze. U tabeli 4 su upoređene vrednosti referentnog i pomoćnog ambijentalnog dozimetra Automess 6150 AD-b/H. Međusobno odstupanje



izmerenih od srednjih vrednosti i od referentnih vrednosti odgovarajuće je za ovaj tip merenja

**Tabela 3. Uporedne vrednosti merenja u WBC kabini i pri prirodnom pozadinskom zračenju.**

Referentna vrednost $\dot{H}^*(10)$ (nSv/h)		Naziv ambijentalnog dozimetra	Izmerena vrednost $\dot{H}^*(10)$ (nSv/h)	Doprinos inherentnog fona $\dot{H}^*(10)$ (nSv/h)
Prirodni fon u laboratoriji	78,2	DMRZ-M15 (1)	155,6	77,4
	79,2	DMRZ-M15 (2)	155,1	75,9
	80,2	DMRZ-M15A	113,4	33,2
	73,4	GMC-320 (1)	142,1	68,7
	73,4	GMC-320 (2)	131,3	57,9
	73,4	GMC-500+ (1)	132,0	58,6
	73,4	GMC-500+ (2)	139,4	66,0
Nivo pozadinskog zračenja u WBC	16,0	DMRZ-M15 (1)	95,5	79,5
	16,0	DMRZ-M15 (2)	94,3	78,3
	16,0	DMRZ-M15A	47,7	31,7
	16,0	GMC-320 (1)	71,2	55,2
	16,0	GMC-320 (2)	65,2	49,2
	16,0	GMC-500+ (1)	73,5	57,5
	16,0	GMC-500+ (2)	75,3	59,3

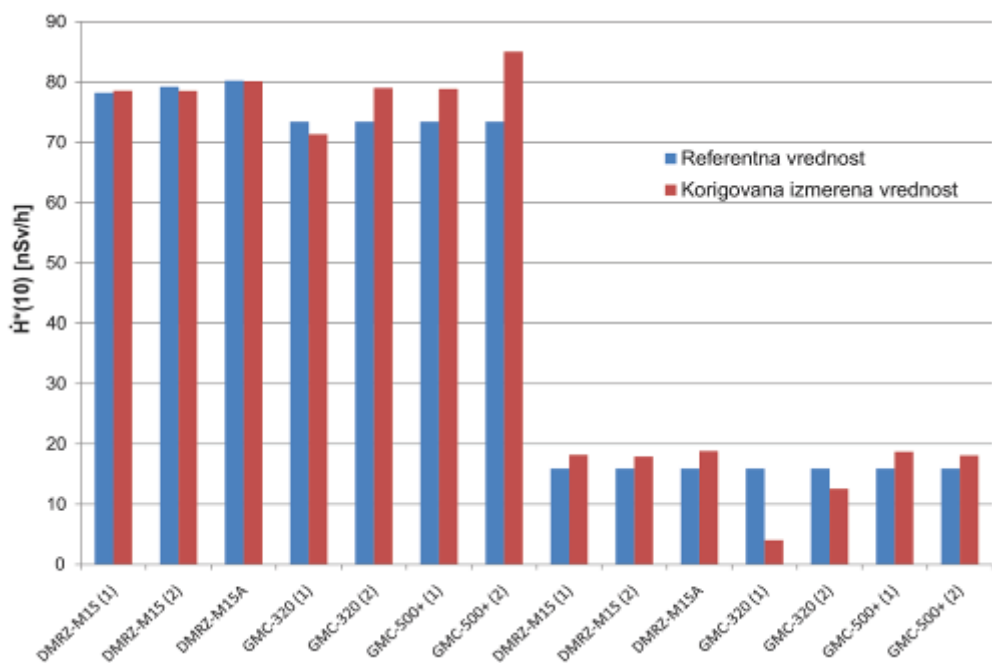


**Slika 2. Odnos vrednosti inherentne i referentne jačine doze u izmerenoj vrednosti.**

Tabela 4. Uporedno merenje referentnog i pomoćnog ambijentalnog dozimetra Automess 6150 AD-b/H.

Referentna vrednost $\dot{H}^*(10)$ (nSv/h)	Izmerena vrednost $\dot{H}^*(10)$ (nSv/h)		Korigovana vrednost $\dot{H}^*(10)$ (nSv/h)		Srednja vrednost $\dot{H}^*(10)$ (nSv/h)	Relativno odstupanje od srednje vrednosti (%)	
	Automess 6150 AD-b/H (1 ref) (bez korekcije)	Automess 6150 AD-b/H (2) (bez korekcije)	Automess 6150 AD-b/H (1 ref) (Nk = 0,966)	Automess 6150 AD-b/H (2) (Nk = 0,692)		Automess 6150 AD-b/H (1 ref) (Nk = 0,966)	Automess 6150 AD-b/H (2) (Nk = 0,692)
WBC	16	24	15,5	16,6	16,0	-3,59	3,59
Fon u etalonskom polju	78	111	82,1	81,0	81,5	0,70	-0,70
Fon u laboratoriji	85	117	75,3	76,8	76,1	-0,96	0,96
150 nSv/h	237	328	153,6	150,2	151,9	1,13	-1,13
300 nSv/h	392	544	303,3	299,6	301,5	0,61	-0,61
500 nSv/h	610	841	513,9	505,2	509,5	0,86	-0,86
3000 nSv/h	3256	4478	3070	3022	3046,0	0,79	-0,79

U tabeli 4 date su vrednosti inherentnog fona dobijene linearnim fitovanjem referentnih i izmerenih vrednosti. Relativno odstupanje korigovane i referentne vrednosti značajno je smanjeno nakon korekcije, što je takođe prikazano i na slici 3.



Slika 3. Uporedni prikaz referentne i korigovane jačine ambijentalnog doznog ekvivalenta nakon oduzimanja inherentnog fona detektora.

Tabela 4. Određivanje inherentnog fona i korekcija kalibracionog faktora.

Referentna vrednost $\dot{H}^*(10)$ (nSv/h)	Naziv ambijentalnog dozimetra	Izmerena vrednost $\dot{H}^*(10)$ (nSv/h)	Fitovana vrednost inherentnog fona $\dot{H}^*(10)$ (nSv/h)	Standardna greška $\dot{H}^*(10)$ (nSv/h)	Korekcija kalibracionog faktora	Merna nesigurnost kalibracionog faktora	Korigovana izmerena vrednost $\dot{H}^*(10)$ (nSv/h)	Relativno odstupanje korigovane vrednosti od referentne (%)	
Prirodni fon u laboratoriji	78,2	DMRZ-M15 (1)	155,6	77,7	6,3	1,004	0,019	78,52	0,41
	79,2	DMRZ-M15 (2)	155,1	76,1	2,1	0,997	0,0062	78,51	-0,87
	80,2	DMRZ-M15A	113,4	32,6	0,7	0,994	0,0032	80,11	-0,11
	73,4	GMC-320 (1)	142,1	63,5	9,5	0,949	0,043	71,32	-2,8
	73,4	GMC-320 (2)	131,3	53,0	4,8	1,005	0,022	78,99	7,6
	73,4	GMC-500+ (1)	132,0	56,9	0,35	1,028	0,0016	78,83	7,4
	73,4	GMC-500+ (2)	139,4	60,5	3,4	1,044	0,011	85,01	16
Nivo pozadinskog zračenja u WBC	16,0	DMRZ-M15 (1)	95,5	77,7	6,3	1,004	0,019	18,18	14
	16,0	DMRZ-M15 (2)	94,3	76,1	2,2	0,997	0,0062	17,90	13
	16,0	DMRZ-M15A	47,7	32,6	0,71	0,994	0,0032	18,82	18
	16,0	GMC-320 (1)	71,2	63,5	9,43	0,949	0,043	7,67	-75
	16,0	GMC-320 (2)	65,2	53,0	4,80	1,005	0,022	12,56	-21
	16,0	GMC-500+ (1)	73,5	56,9	0,35	1,028	0,0016	18,69	18
	16,0	GMC-500+ (2)	75,3	60,5	3,34	1,044	0,011	18,09	14

### 4. Zaključak

U radu su uspešno određene vrednosti inherentnih fonova ambijentalnih dozimetara različitih proizvođača. Korigovane vrednosti ambijentalnog doznog ekvivalenta pokazuju značajno manje odstupanje od referentnih vrednosti pozadinskog zračenja. Korišćenjem referentnog ambijentalnog dozimetra sa niskim inherentnim fonom i dobrim energetskim odzivom, moguće je proceniti vrednost jačine ambijentalnog doznog ekvivalenta. Pored kalibracionog faktora koji se dobija u uverenju o etaloniranju, za merenja niskih jačina doza bliskih prirodnom fonu, od velikog je značaja poznavanje inherentnog fona dozimetra. Time se obezbeđuje značajno manja greška merenja na vrednostima ambijentalnog doznog ekvivalenta do 1000 nSv/h, što je od značaja za merenja aktivnim ambijentalnim dozimetrima koji se koriste u mrežama rane najave usled pojave radijacionog akcidenta i ostalim situacijama u kojima je neophodno meriti niske vrednosti ambijentalnog doznog ekvivalenta. Određivanje inherentnog fona detektora na veoma niskim vrednostima pozadinskog zračenja u niskofonskim laboratorijama pri kontrolisanim laboratorijskim uslovima, bi proizvelo značajno pouzdanije rezultate.

### 5. Literatura

- [1] Safety Reports Series, No. 16, IAEA, Vienna, 2000.
- [2] A. Stochioiu, S. Bercea, The measurement of the natural radiation background in a salt mine. *Rom. Rep. Phys.* 56, 2011, 757–761.
- [3] SCINTILLATOR PROBE6150AD-b (/H, /E), Automess, [https://www.automess.de/Download/Prospekt\\_ADb\\_E.pdf](https://www.automess.de/Download/Prospekt_ADb_E.pdf) (pristupljeno 18.02.2019.)

**ASSAYING ACTIVE AMBIENT DOSIMETERS AT LOW  
BACKGROUND LEVELS**

**Miloš ĐALETIĆ<sup>1</sup>, Aleksandra SOKIĆ<sup>2</sup>, Nikola KRŽANOVIĆ<sup>1</sup>  
and Miloš ŽIVANOVIĆ<sup>1</sup>**

1) *Vinca Institute of Nuclear Sciences, Radiation and Environmental Protection  
Department, Belgrade, Serbia, [djaletic@vinca.rs](mailto:djaletic@vinca.rs), [krzanovic@vinca.rs](mailto:krzanovic@vinca.rs), [milosz@vinca.rs](mailto:milosz@vinca.rs)*

2) *Public Company "Nuclear facilities of Serbia", Belgrade, Serbia,  
[aleksandra.sokic@nuklearniobjekti.rs](mailto:aleksandra.sokic@nuklearniobjekti.rs)*

**ABSTRACT**

Calibration of active ambient dosimeters is performed by using known values of ambient dose rate and with instrument background value subtraction. Measured value of ambient dose rate is increased by intrinsic background of the instrument. The goal of this paper is to assay response of active ambient dosimeters at low background levels inside the shielding of a whole body counter installation and to assess the intrinsic background of the dosimeters. Test results show that intrinsic background of the instrument can substantially increase measured value of ambient dose rate in the environment.

## UNAPREĐENJA DIGITALNOG MERAČA RADIOAKTIVNOG ZRAČENJA DMRZ-M15 I PROTOTIP STACIONARNOG ALARMNOG MERAČA DMRZ-M15A

Miloš ĐALETIĆ

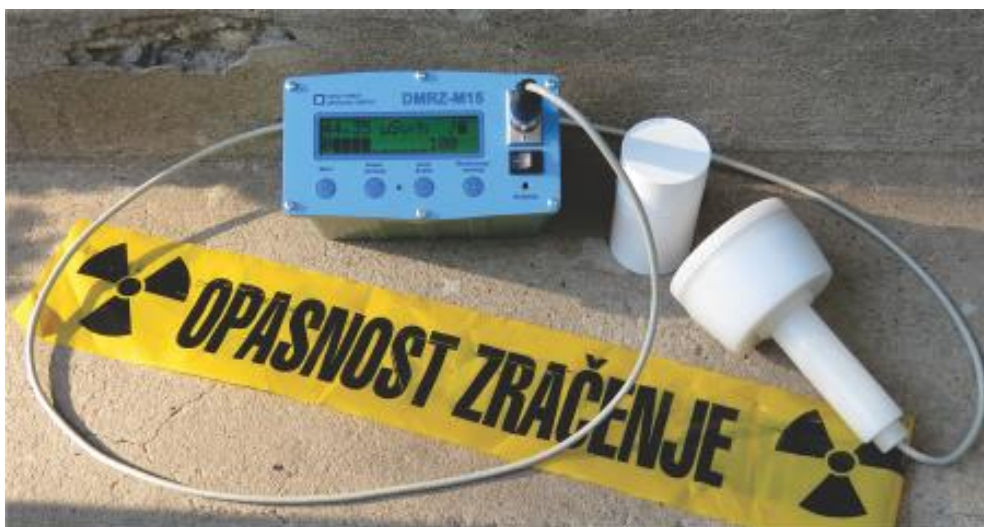
*Institut za nuklearne nauke „Vinča”, Laboratorija za zaštitu od zračenja i zaštitu životne sredine „Zaštita”, Beograd, Srbija, [djaletic@vinca.rs](mailto:djaletic@vinca.rs)*

### SADRŽAJ

*Korišćenjem merača DMRZ-M15 u svakodnevnom radu, dobijene su nove ideje za dalje unapređenje softvera i hardvera merača. U ovom radu su prikazana realizovana unapređenja. Hardversko unapređenje je mogućnost biranja dva zadata radna napona detektora, automatski pri odabiru sonde ili ručno u opštem slučaju kada se koristi nestandardna sonda. Softverska unapređenja daju veću funkcionalnost uređaju. Pored standardne opcije konstantnog vremena merenja, dodata je i opcija konstantne statističke greške merenja. Režim pokretnog usrednjavanja je razvijen za potrebe traženja kontaminacije i dozimetriju sa bržim odzivom merača. Usavršeno je i praćenje parametara rada merača i detekcija grešaka. Modifikacijom unapređene verzije DMRZ-M15 napravljen je prototip stacionarnog alarmnog digitalnog merača radioaktivnog zračenja DMRZ-M15A.*

### 1. Uvod

Unapređenja digitalnog merača radioaktivnog zračenja DMRZ-M15 se odnose na proširenje hardverskih i softverskih mogućnosti [1]. Na slici 1 prikazan je merač sa sondom S1 prilikom merenja.



Slika 1. Digitalni merač radioaktivnog zračenja DMRZ-M15.

## 2. Hardverska unapređenja

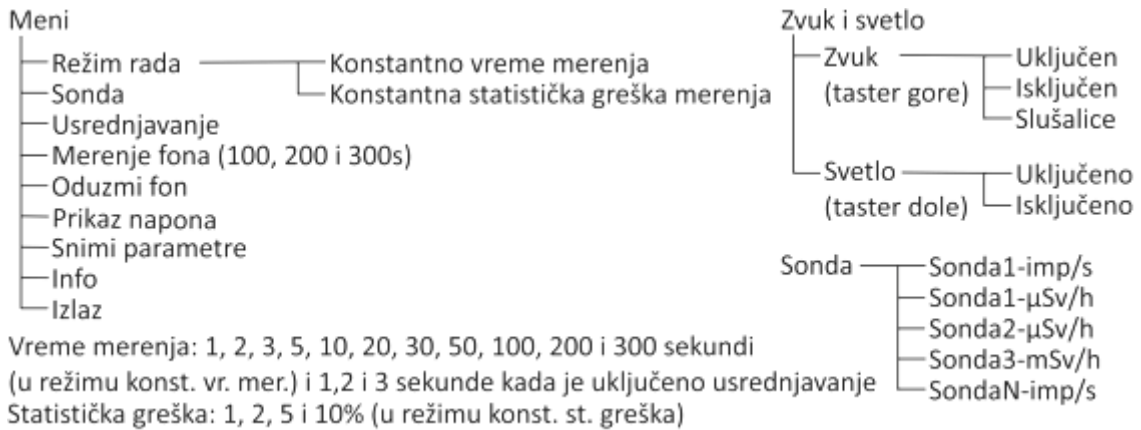
Prvo hardversko unapređenje je mogućnost izbora dve predefinisane vrednosti visokog napona, pa je moguće koristiti različite sonde koje rade na naponu od 400 V i od 550 V bez potrebe za ručnim podešavanjem vrednosti visokog napona. Drugo unapređenje se odnosi na izmene u delu regulatora napona, tj. povećana je maksimalna jačina izlazne struje na konektoru sonde. Ova modifikacija omogućava stabilnije napajanje sonde i mogućnost razvoja scintilacionih sondi sa sopstvenim izvorom visokog napona.

## 3. Softverska unapređenja

Upravljanje uređajem vrši se preko četiri tastera. Na svakom tasteru nacrtan je simbol koji označava funkciju tastera. U toku merenja, pritiskom na taster poziva se funkcija koja je ispisana iznad tog tastera. Tasterima gore i dole vrši se promena selektovane opcije ili promena vrednosti parametra, pritiskom na taster  $\checkmark$  potvrđuje se operacija, a pritiskom na  $\times$  se poništava. Izgled tastera i prikaz menija i funkcija prikazan je na slikama 2 i 3.



**Slika 2. Prikaz funkcija tastera.**



**Slika 3. Prikaz korisničkih menija.**

Izmenjen je glavni meni i dodate su opcije *Režim rada*, *Usrednjavanje* i *Snimi parametre*. Sada postoje dva režima rada: *Konstantno vreme merenja* i *Konstantna statistička greška merenja*. U režimu *Konstantno vreme merenja* merenje se vrši u izabranim vremenskim intervalima koji se biraju u meniju *Vreme merenja*. Oni mogu biti: 1, 2, 3, 5, 10, 20, 30, 50, 100, 200 i 300 sekundi. Ovaj režim ima opštu namenu. U prvom redu displeja se ispisuje izmerena vrednost i statusni simboli. U drugom redu se



iscrtava bar graf koji pokazuje izmerenu vrednost. Kada se izabere vreme merenja veće od 5 s, u drugom redu se iscrtava bargraf koji pokazuje proteklo i preostalo vreme do novog rezultata merenja u sekundama. Takođe, pritiskom na dugme **X** (*Resetovanje merenja*), resetuje se trenutno merenje i oglašava se zvučni signal. Ovaj režim podržava uključivanje usrednjavanja merenja. U režimu *Konstantna statistička greška merenja* merenje se vrši dok se ne registruje potreban broj impulsa potreban za zadatu statističku grešku. Ona može biti 1, 2, 5 ili 10% i bira se u meniju *Vreme merenja*. Ovaj režim je pogodan za merenje niskih nivoa zračenja, kontrolu prirodnog pozadinskog zračenja, laboratorijska merenja i sva ostala merenja gde je potrebno zadati maksimalnu statističku grešku merenja. Ovaj režim ne podržava usrednjavanje. Maksimalno vreme merenja je 1000 sekundi. Ako je intenzitet zračenja mali, a zadata greška je takođe mala, uređaj će obavestiti korisnika ispisivanjem poruke "Br. imp. je mali za datu tačnost!", jer bi trajanje jednog intervala merenja bilo veće od 1000 s. Ako merenje traje duže od 30 s, posle svakog novog rezultata merenja, uređaj emituje zvučni signal koji obaveštava korisnika o novom rezultatu. Takođe, u zavisnosti od jačine izvora zračenja i zadate tačnosti, u donjem redu displeja ispisuje se bargraf koji pokazuje vrednost merenja (kada je vremenski interval između dva merenja kratak) ili proteklo vreme i prikupljen broj impulsa.

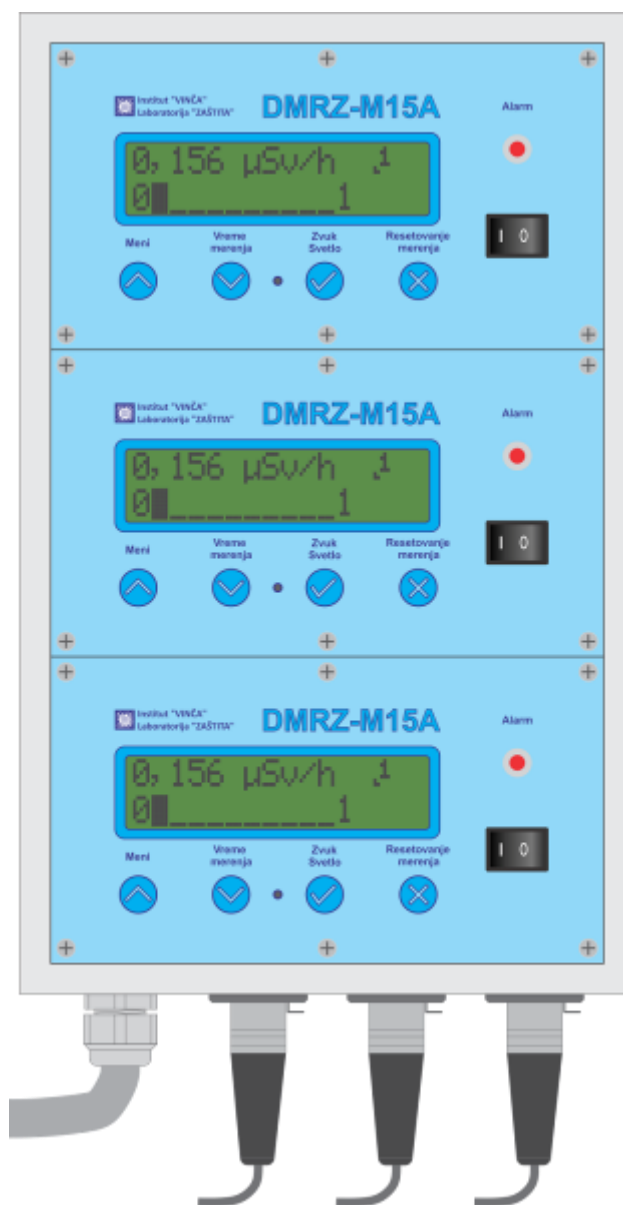
*Usrednjavanje* je opcija koja može da se uključi ukoliko je izabrani režim rada konstantno vreme merenja. Ova opcija prikazuje aritmetičku sredinu deset prethodno izmerenih vrednosti. Kada se uključi, tek posle desetog merenja se pokazuje prava usrednjena vrednost deset merenja i tada se korisnik obaveštava zvučnim signalom da je postignuta puna tačnost. Aritmetička sredina izračunata na osnovu manjeg broja izmerenih vrednosti ima manju tačnost. U ovom režimu rada, vreme merenja može biti 1, 2 ili 3 sekunde. Ovaj režim je pogodan za dozimetriju, kao i za detekciju izvora zračenja i kontaminacije uz korišćenje bar grafa i zvučne indikacije impulsa. Preporučuje se i za manje iskusne korisnike kao opšti režim rada uz podešavanje vremena merenja na 1 s kada je bitniji brži odziv merača, do 3 s kada je bitnija što manja statistička greška.

Prilikom odabira opcije *Merenje fona* korisnik ima na raspolaganju izbor vremena merenja od 100, 200 i 300 s. Opcija *Snimi parametre* snima trenutno odabrane parametre kao podrazumevane i oni se koriste prilikom svakog uključivanja uređaja. Parametri su korišćena sonda i merna jedinica. Dodata je i opcija oduzimanja vrednosti inherentnog pozadinskog zračenja samog detektora od rezultata merenja i još uvek je u eksperimentalnoj fazi testiranja. Ova vrednost se upisuje tokom etaloniranja prilikom upisa kalibracionih faktora.

Kako bi se povećala pouzdanost merača, funkcija samotestiranja je proširena i obuhvata testiranje prisustva i režima rada sonde, testiranje vrednosti visokog napona i napona baterije i testiranje integriteta memorije. Testiranje integriteta memorije je veoma bitno jer su u njoj upisane vrednosti kalibracionih faktora sonde i drugi parametri kritični za pravilan rad uređaja. Samotestiranje se obavlja prilikom svakog uključivanja uređaja i tokom rada. Ukoliko se prilikom samotestiranja otkrije greška, ispisuje se opis greške na displeju. Hardversko unapređenje koje se odnosi na mogućnost izbora dve vrednosti visokog napona prati i modifikacija softvera. Prilikom etaloniranja, uz kalibracione faktore se bira i radni napon sonde. Krajnji korisnik prilikom korišćenja uređaja ne mora da brine o izboru radnog napona, jer se on automatski podešava na osnovu izabrene sonde. Prilikom odabira sonde *SondaN* od korisnika se traži da odabere radni napon 400V ili 550V.

## 4. Prototip stacionarnog alarmnog merača DMRZ-M15A

Kako bi se zadovoljile potrebe tržišta za stacionarnim alarmnim meračem radioaktivnog zračenja, modifikacijom prenosnog merača DMRZ-M15 nastao je merač DMRZ-M15A. Uporedo sa razvojem mernog dela, razvijena je i nova sonda sa povećanom osetljivošću za potrebe monitoringa gama zračenja. Na slici 4 prikazan je merni sistem sastavljen od tri merača u zajedničkom kućištu i zajedničkim napajanjem. Sistem se napaja mrežnim naponom od 220 V. Modularnost sistema obezbeđuje međusobnu nezavisnost mernih jedinica i brzu zamenu u slučaju otkaza neke od jedinica.



Slika 4. Merni deo alarmnog sistema DMRZ-M15A.

Korisnički interfejs je skoro identičan modelu DMRZ-M15. Dodata je signalna LE dioda na prednjem panelu merača koja pruža svetlosnu indikaciju alarmnog stanja uz

zvučnu indikaciju piezo zvučnika. Po potrebi mogu se dodati električno izolovani izlazi za napajanje dodatne alarmne signalizacije mrežnim naponom.

Unutar korisničkog menija dodata je opcija *Prag alarma* kojom se postavlja alarmni nivo merača. Odziv merača je od 1 s do 5 s u zavisnosti od vrednosti izmerene jačine doze. Softver prati i nivo srednje vrednosti izmerene jačine doze  $\dot{H}^*(10)$ , pa je pored fiksnog praga alarma moguće zadati i relativni prag izražen u procentima srednje izmerene vrednosti prirodnog fona. Merna jedinica ima i memoriju, pa se u nju upisuju podaci o aktiviranju alarma (vreme, izmerena vrednost...).

Kućište sonde je napravljeno od prohroma i unutrašnost je zaštićena od spoljnih atmosferskih faktora. U kućištu se nalaze dve Gajger–Milerove cevi visoke osetljivosti i prateći elektronski sklopovi. Dužina kabla između sonde i merne jedinice može biti do 150 m. Preliminarne specifikacije sonde date su u tabeli 1.

**Tabela 1. Specifikacije sonde merača DMRZ-M15A.**

[1] Detektor	[2] Dve GM cev
[3] Opseg merenja ambijentalne jačine doze $\dot{H}^*(10)$	[4] 0,04 $\mu\text{Sv/h}$ - 1000 $\mu\text{Sv/h}$
[5] Opseg merenja u impulsima u sekundi	[6] 0 - 7000 imp/s
[7] Napon napajanja	[8] 400 V
[9] Sopstveni fon	[10] < 2 imp/s
[11] Mrtvo vreme	[12] < 200 $\mu\text{s}$
[13] Radni vek detektora	[14] $\geq 10^{10}$ impulsa
[15] Maksimalna dopuštena jačina ekspozicione doze $\gamma$ zračenja kojoj se detektor sme izložiti	[16] 3 Sv/h (u intervalu kraćem od 1 minuta)
[17] Opseg ambijentalne temperature u toku rada	[18] Od -40 do +60 °C
[19] Aktivna površina	[20] 66 cm <sup>2</sup>
[21] Srednja osetljivost sonde na Co-60	[22] 0,052 $\mu\text{Sv/h}$ / imp/s
[23] Srednja osetljivost sonde na Cs-137	[24] 0,061 $\mu\text{Sv/h}$ / imp/s
[25] Srednja osetljivost sonde na N-60 (48 keV)	[26] 0,136 $\mu\text{Sv/h}$ / imp/s
[27] Dužina kabla	[28] Do 150 m
[29] Dimenzije	[30] Dužina 370 mm, širina 200 mm, [31] visina 109 mm

## 5. Zaključak

Predstavljena hardverska unapređenja merača DMRZ-M15 povećala su mu merne mogućnosti, a softverska unapređenja su obezbedila nove režime rada koji olakšavaju korišćenje uređaja. Pouzdanost je povećana dodatnim funkcijama samotestiranja pri uključivanju i u toku rada uređaja.

Predstavljeni prototip novog alarmnog stacionarnog merača DMRZ-M15A predstavlja odgovor na zahteve tržišta.

## 6. Literatura

- [1] Miloš Đaletić, Đorđe Lazarević, Digitalni merač radioaktivnog zračenja DMRZ-M15, *Zbornik radova XXVIII simpozijuma Društva za zaštitu od zračenja Srbije i Crne Gore*, 2015, 537–541.

**IMPROVEMENTS OF DIGITAL SURVEY METER DMRZ-M15  
AND PROTOTYPE OF STATIONARY ALARM MONITOR  
DMRZ-M15A**

**Miloš Đaletić**

*Vinca Institute of Nuclear Sciences, Radiation and Environmental Protection  
Department, Belgrade, Serbia, [djaletic@vinca.rs](mailto:djaletic@vinca.rs)*

**ABSTRACT**

Everyday use of DMRZ-M15 survey meter inspired new ideas for further software and hardware improvements of the meter. Made improvements are described in this paper. Main hardware improvement is the possibility of selecting two separate detector working voltages, automatically when selecting a probe or manually in the general case when a non-standard probe is used. Software improvements give greater functionality to the device. In addition to the standard setting of constant measurement time, the measurement with the constant statistical error is added. Moving average setting was developed for the purpose of searching for a contamination and dosimetry with a faster response time of the meter. The monitoring of the meter operational parameters and detection of errors was improved. Prototype of the stationary alarm digital meter DMRZ-M15A was developed by modifying the improved version of DMRZ-M15 survey meter.

# UNAPREĐENJE SOFTVERA UREĐAJA GMC7 ZA KONTINUALNO MERENJE JAČINE DOZE GAMA ZRAČENJA U ŽIVOTNOJ SREDINI

Miloš DALETIĆ

*Institut za nuklearne nauke „Vinča”, Laboratorija za zaštitu od zračenja i zaštitu životne sredine „Zaštita”, Beograd, Srbija, [djaletic@vinca.rs](mailto:djaletic@vinca.rs)*

## SADRŽAJ

*U radu je predstavljena unapređena verzija softvera uređaja GMC7 za kontinualno merenje jačine doze gama zračenja u životnoj sredini. Izmenjen je izgled glavnog prozora programa. Dodat je grafički prikaz rezultata merenja sa automatskim skaliranjem grafika. Pored prikaza izmerenih vrednosti, na grafiku se prikazuje i usrednjena vrednost prethodnih deset merenja. Uz ručni režim merenja, sada postoji i automatski režim, koji u zavisnosti od jačine doze, podešava vreme merenja. Kalibracija uređaja se sada vrši korišćenjem samo dva kalibraciona faktora. Nova opcija zadavanja vrednosti praga alarma, omogućava da se uređaj koristi i kao alarmni monitor zračenja. Usavršeno je i praćenje parametara rada mernog sistema i detekcija grešaka.*

## 1. Uvod

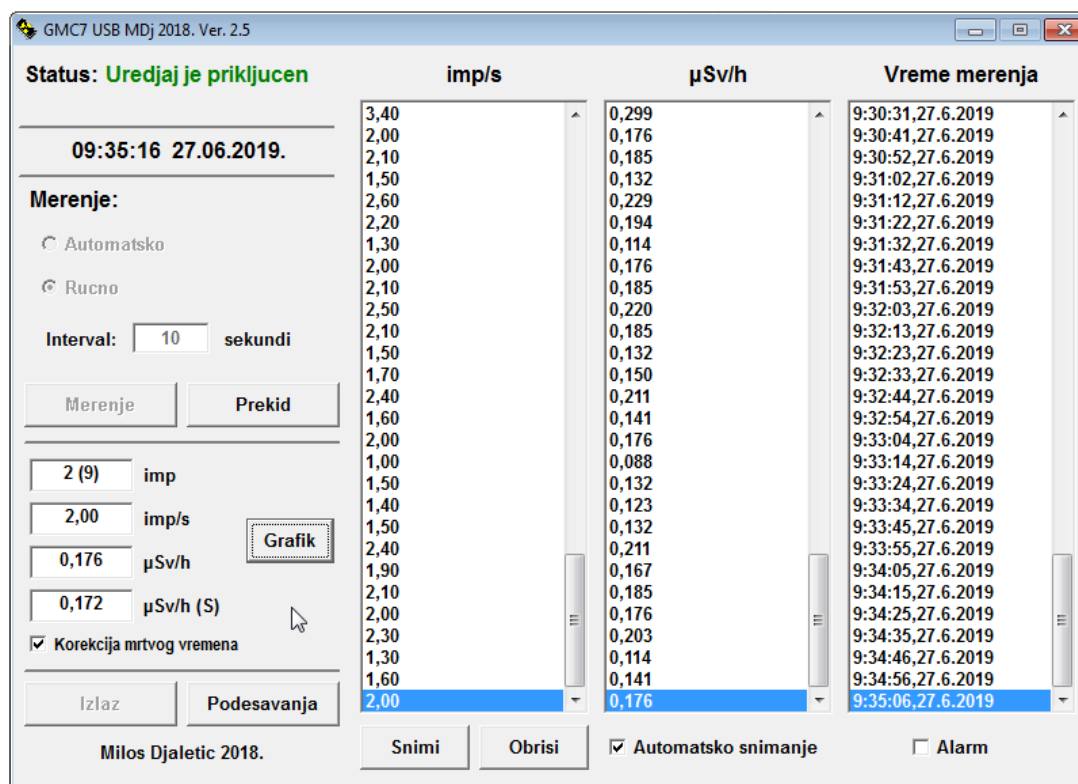
Uređaj za kontinualno merenje jačine doze gama zračenja GMC7 nalazi primenu prevashodno u monitoringu životne sredine, a može se koristiti i kao nastavno sredstvo u školama ili u prevenciji nelegalnog prometa izvorima zračenja. Uređaj čine kontrolna jedinica i merna sonda. Kontrolna jedinica se povezuje na računar putem univerzalne serijske magistrale (USB – Universal Serial Bus). U kontrolnoj jedinici se nalazi DC-DC pretvarač (generiše visoki napona za napajanje detektora), mikrokontroler (broji impulse pristigle od detektora, prati statusne signale za kontrolu rada i komunicira sa računarom putem USB-a), kao i ostali prateći elektronski sklopovi za uobličavanje signala, napajanje i dr. Sonda se sastoji od detektora (Gajger-Milerova cev) i kola za uobličavanje i slanje signala diferencijalnim putem kroz oklopljen kabl do kontrolne jedinice. Obzirom na osnovnu namenu, unapređen je računarski softver GMC7 [1].

## 2. Opis nove verzije softvera GMC7

Prethodna verzija programa GMC7 imala je samo osnovnu funkcionalnost. Postojao je jedan režim rada u kome se zadaje samo vreme merenja. Rezltati merenja su prikazivani samo u obliku tabela bez grafičkog prikaza.

Na slici 1 prikazan je glavni prozor programa GMC7. U gornjem levom uglu je prikazan status uređaja, a ispod je ispisano vreme i datum. U odeljku *Merenje* se bira režim rada uređaja. U režimu *Ručno* korisnik sam zadaje interval jednog merenja. On može biti od 1 s do 999 s. U režimu *Automatsko*, prvo se vrši mernje od 10 s na osnovu koga se postavlja početni interval merenja. Interval pri nivou prirodnog nivoa zračenja iznosi 300 s i smanjuje se pri porastu jačine doze. Uređaj ima odziv od 1 s za nagle

promene jačine doze. Pritiskom na dugme *Merenje* započinje se merenje, dok se pritiskom na dugme *Prekid* zaustavlja. U sledećem odeljku se nalaze tekstualna polja za ispisivanje rezultata merenja. U prvom se ispisuje izmeren broj impulsa u toku jedne sekunde, a u zagradi proteklo vreme u sekundama od početka intervala. U drugom tekstualnom polju se ispisuje broj impulsa u sekundi na osnovu merenja u prethodnom intervalu. U trećem polju se ispisuje izmerena jačina ambijentalnog doznog ekvivalenta  $H^*(10)$ , dok se u četvrtom prikazuje usrednjena vrednost prethodnih deset merenja. Ispod se nalazi i polje za potvrdu opcije koja uključuje korekciju mrtvog vremena detektora. U desnom delu prozora nalaze se tabele u kojima se prikazuju izmerene vrednosti broja impulsa po sekundi, jačine doze i vremena merenja. Ispod tabela se nalaze polja za potvrdu opcije *Automatsko snimanje* i *Alarm*. Tu se nalazi dugme *Snimi* za ručno snimanje vrednosti iz tabela u tektualne fajlove. Za brisanje sadržaja tabela koristi se dugme *Obrisi*. Pritiskom na dugme *Grafik* umesto tabela se prikazuje grafikon na kome su prikazane izmerene vrednosti (slika 2).



**Slika 1. Glavni prozor programa GMC7 – prikaz tabela.**

Crvena linija označava izmerene vrednosti jačine doze, dok su zelenom linijom prikazane usrednjene vrednosti. Ukoliko dođe do značajne razlike između usrednjene i izmerene vrednosti jačine doze, automatski se započinje nova serija usrednjavanja. Levim klikom miša na grafik, prikazuje se plava vertikalana linija tj. marker. Plavim slovima se ispisuju vrednosti izmerene i usrednjene jačine doze i vreme merenja. Desnim klikom miša marker se uklanja. Na grafiku se prikazuje poslednjih sto izmerenih vrednosti. Skaliranje podeoka na vertikalnoj osi vrši se automatski ukoliko je opcija *Automatski opseg* uključena. Ukoliko nije, moguće je ručno skaliranje pomoću

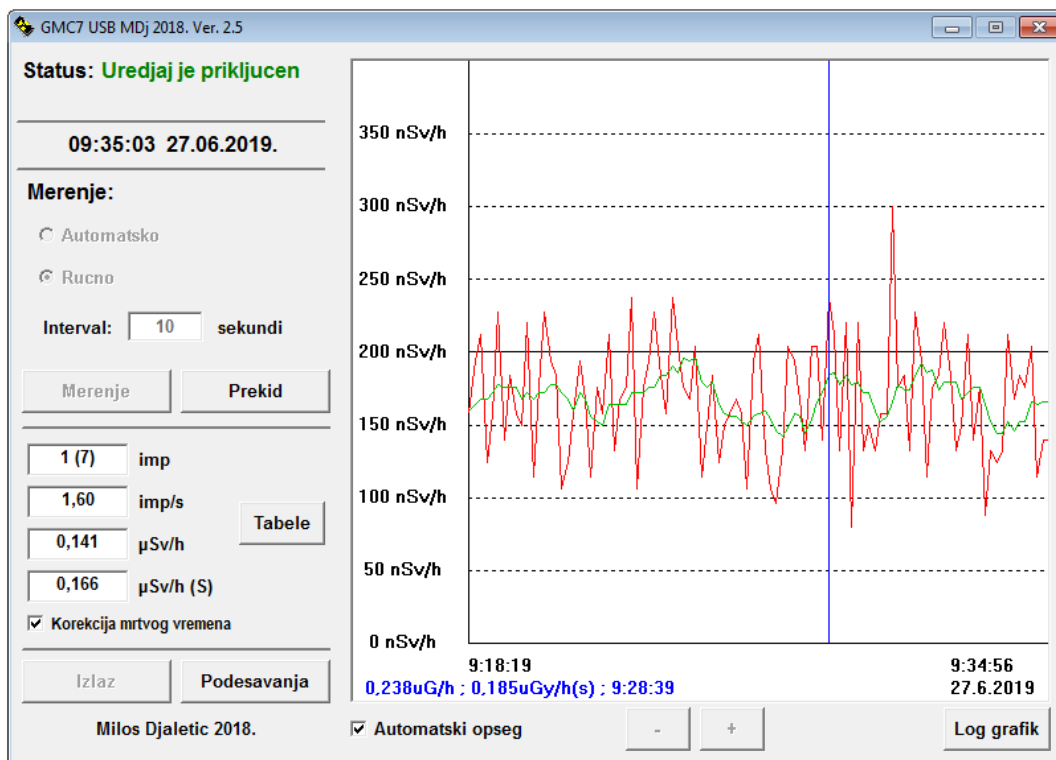
komandi + i -. Dugmetom *Log grafik* otvara se nova forma u kojoj je prikazan grafik sa logaritamskom skalom.

Pritiskom na dugme *Podešavanja* otvara se prozor *Podešavanja*. U njoj se upisuje kalibracioni faktor i mrtvo vreme detektora i zadaje se prag alarma. Takođe, u prozoru se ispisuje i vrednost visokog napona napajanja detektora. Podešavanja se automatski čuvaju u fajlu nakon zatvaranja prozora, a mogu se i ručno snimiti ili učitati korišćenjem dugmadi *Snimi* i *Učitaj*.

U toku rada, program proverava prisustvo i režim rada sonde, stanja izlaza i nivo visokog napona. Ukoliko dođe do nepravilnosti u radu sistema, korisnik se obaveštava porukom.

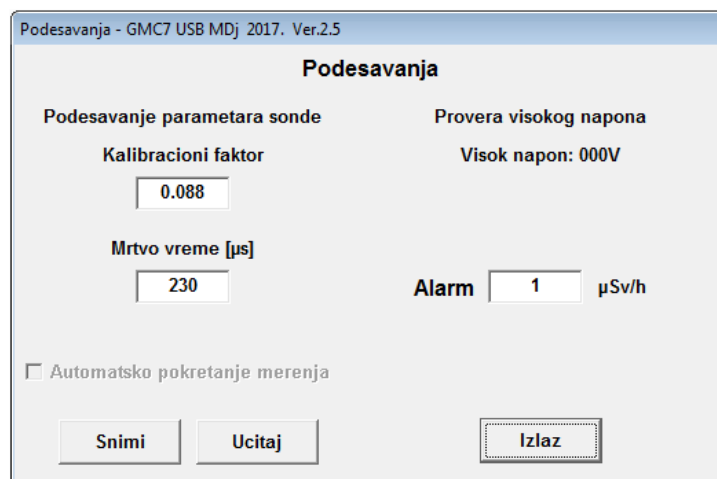
Kada je uključena opcija *Alarm* u slučaju da je izmerena jačina doze veća od postavljenog praga u prozoru *Podešavanja*, prikazuje se upozorenje o alarmu, ispisuje se vrednost izmerene jačine doze i oglašava se zvučni alarm.

Nakon svakog merenja, izmerene vrednosti se pored upisivanja u tabele, upisuju i u tri tekstualna fajla. Naziv fajla ima prefiks A, oznaku i datum merenja. Kada je uključena opcija automatskog snimanja, nakon prvog merenja u novom danu, generišu se tri fajla koja u nazivu imaju oznaku i datum merenja prethodnog dana. Vrednosti u tabelama se automatski brišu.



Slika 2. Glavni prozor programa GMC7 – prikaz grafika.





**Slika 3. Program GMC7 – prozor za podešavanja.**

Unapređen je proračun jačine doze korišćenjem dva kalibraciona faktora. Prvi je osetljivost detektora tj. jačina doze po broju impulsa u sekundi, a drugi je mrtvo vreme detektora. Na osnovu neparalizujućeg modela mrtvog vremena detektora vrši se korekcija izmerenog broja impulsa u sekundi [2] i korigovana vrednost se množi kalibracionim faktorom za osetljivost detektora. U prethodnoj verziji programa, korišćeno je više kalibracionih faktora za osetljivost pri različitim brzinama odbroja tako da je nelinearna karakteristika GM brojača usled mrtvog vremena linearizovana linearnim odseccima.

### 3. Zaključak

Softversko unapređenje merača GMC7 proširilo mu je upotrebljivost dodavanjem novih funkcija i režima rada. Olakšano je vizuelno praćenje izmerenih vrednosti upotrebom grafičkog prikaza. Stari način proračuna jačine doze putem više kalibracionih faktora, zamenjen je novim korišćenjem samo jednog kalibracionog faktora i vrednosti mrtvog vremena detektora. Ovime su poboljšane merne karakteristike merača.

### 4. Literatura

- [1] Miloš Đaletić, Miloš Živanović, Milojko Kovačević, Uređaj za kontinualno merenje jačine doze gama zračenja u životnoj sredini, *Zbornik radova XXVI simpozijuma Društva za zaštitu od zračenja Srbije i Crne Gore*, 2011, 238-242.
- [2] Knoll, Radiation Detection and Measurement, John Wiley and Sons, 2000.

**IMPROVEMENTS OF GMC7 SOFTWARE FOR THE  
INSTRUMENT FOR CONTINUOUS MEASUREMENT OF  
GAMMA RADIATION IN THE ENVIRONMENT**

**Miloš ĐALETIĆ**

*Vinca Institute of Nuclear Sciences, Radiation and Environmental Protection  
Department, Belgrade, Serbia, [djaletic@vinca.rs](mailto:djaletic@vinca.rs)*

**ABSTRACT**

This paper presents an improved version of the GMC7 instrument software for continuous measurement of the intensity of gamma radiation in the environment. The layout of the main program window has been changed. A graphic representation of the results of the measurement with automatic scaling of graphs is added. In addition to displaying the measured values, the graph shows the averaged value of the previous ten measurements. With manual measurement mode, there is now an automatic mode, which, depending on the dose rate level, automatically adjusts the measurement time. The calibration of the device is now performed using two calibration factors. The existence of the alarm threshold option allows the device to be used as an alarm radiation monitor. Monitoring of the operational parameters of the measuring system and detection of errors has been improved.

## INTERFEJS ZA POVEZIVANJE DOZIMETARA NA RAČUNAR I SLANJE PODATAKA NA VEB-SAJT

Miloš Đaletić<sup>1</sup> i Stevan Karimanović<sup>2</sup>

- 1) Institut za nuklearne nauke „Vinča”, Laboratorija za zaštitu od zračenja i zaštitu zaštitu životne sredine „Zaštita”, Beograd, Srbija, [djaletic@vinca.rs](mailto:djaletic@vinca.rs)
- 2) JP „Nuklearni objekti Srbije”, Beograd, Srbija

### SADRŽAJ

Značajan broj merača jonizujućeg zračenja u upotrebi nema mogućnost povezivanja na računar. U ovom radu je predstavljen interfejs koji omogućava povezivanje tih uređaja na računar ukoliko imaju izlaz za slušalice ili signalni impulsni izlaz. Interfejs se povezuje na računar putem univerzalne serijske magistrale i šalje izmerene vrednosti broja impulsa. Program na računaru prikazuje izmerene vrednosti u imp/s, a takođe ukoliko je poznat kalibracioni faktor, izmerene vrednosti se prikazuju i u radiološkim jedinicama – Gy ili Sv. Podaci se prikazuju i grafički, a postoji i mogućnost automatskog memorisanja. Program za računar je modifikacija unapređenog programa za uređaj GMC7. Dodata je i funkcija slanja podataka na veb-server, kao i prikaz izmerenih vrednosti na veb-strani. Uspešno je testirano više različitih merača kojima je proširena funkcionalnost ovim interfejsom.

### 1. Uvod

U upotrebi se još uvek nalazi veliki broj analognih merača kontaminacije i dozimetara. Kako bi se proširila funkcionalnost ovih uređaja, razvijen je jednostavan interfejs koji omogućava povezivanje merača na računar. Ovime se postižu dva cilja – povećanje rezolucije očitavanja izmerenih vrednosti i njihovo automatsko snimanje. Digitalno brojanje impulsa pomoću mikrokontrolera sa kvarcnim oscilatorom je daleko tačnije i stabilnije, posebno pri promeni ambijentalne temperature, od korišćenja RC integratora u analognim instrumentima. Korišćenjem kalibracionih faktora u računarskom programu, omogućena je i korekcija broja impulsa na mrtvo vreme detektora, kao i prikaz izmerenih vrednosti u radiološkim jedinicama – Gy ili Sv. Svi uređaji koji imaju izlaz za slušalice ili impulsni izlaz mogu se povezati na ovaj interfejs, pod uslovom da broj impulsa na izlazu odgovara realnom broju impulsa dobijenih sa detektora. Interfejs je uspešno korišćen sa meračima: KOMO-TN, KOMO-TM, DR-M1, DR-M3, DP-5B i SE International Monitor 4 kit [1-6].

### 2. Opis interfejsa

Interfejs je smešten u plastičnoj kutiji dimenzija prikladnih i za prenosni uređaj (slika 1). Na prednjoj strani se nalaze dve LE diode i prekidač za uključivanje. Crvena LE dioda zasvetli svaki put kada se na ulazu interfejsa detektuje impuls. Zelena LE dioda signalizira da je interfejs uključen. Prilikom uključivanja ona se na kratko upali, ugasi i potom trajno upali dok je interfejs uključen, što znači da je mikrokontroler

ispravan. Na zadnjoj strani kutije se nalaze USB konektor za povezivanje interfejsa na računar i BNC konektor za povezivanje na merač. Interfejs dobija potrebno napajanje sa USB porta računara na koji je povezan. Signal sa merača se dovodi na ulaz uobličivača signala.



**Slika 1. Primer korišćenja interfejsa za povezivanje merača KOMO-TN na računar.**

Ulaz je zaštićen od prenapona. Trimer potencijetrom se podešava nivo signala na potrebnu vrednost. Izlaz uobličivača je povezan na ulaz mikrokontrolera 18F4550. Mikrokontroler ima integrisan USB modul i direktno se povezuje na USB magistralu računara.

### **3. Opis programa**

Program za računar je modifikovana verzija nove verzije programa GMC7. Nova verzija programa GMC7 je već opisana [7], stoga će u ovom radu biti dat samo opis modifikacije. U glavnom prozoru dodato je tekstualno polje u kome se ispisuje status, tj. odgovor servera. Ukoliko se dobije odgovor „OK”, podaci su uspešno poslani. U ostalim slučajevima, došlo je do greške. U prozoru „Settings”, dodato je polje u koje se upisuje adresa servera kome se šalju podaci, kao i polje za ID broj i lozinku. Nakon prvog i svakog sledećeg merenja, pored standardnog ispisivanja rezultata u glavnom prozoru, te vrednosti se zajedno sa kontrolnim podacima (među kojima je i vreme merenja) upisuju na listu za slanje. Jedan po jedan upis sa liste se šalje serveru. Ukoliko dođe do prekida komunikacije sa serverom, podaci se ne gube, već se čuvaju u listi. Po uspostavljanju veze sa serverom, podaci se šalju.

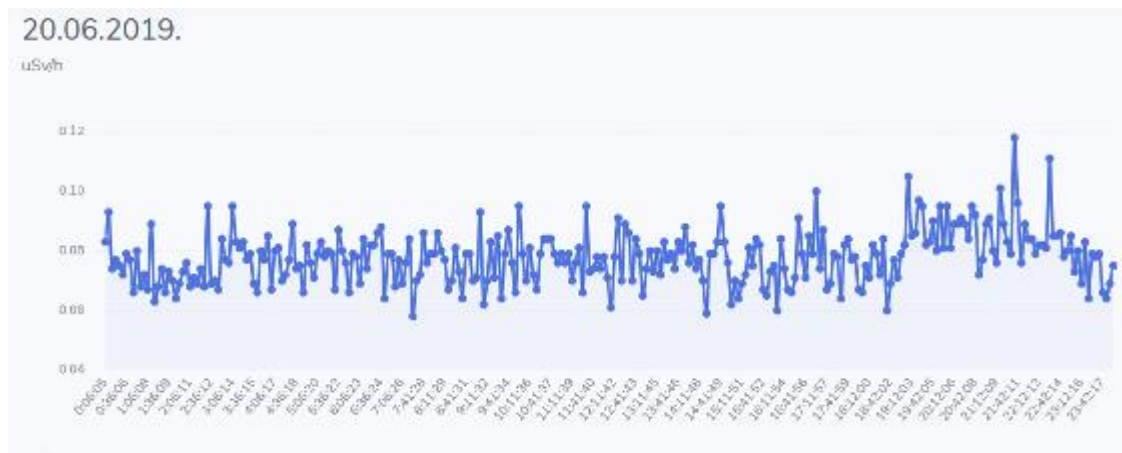
## 4. Opis veb-sajta

Kôd veb-sajta je napisan kombinacijom više veštačkih jezika: *HTML*, *CSS*, *PHP*, *JS* i *MySQL*. *HTML* i *CSS* su iskorišćeni za kreiranje dizajna veb-sajta (slika 2), *PHP* i *MySQL* su iskorišćeni za preuzimanje podataka sa servera, dok je *JS* iskorišćen za izradu samih grafikona. *MySQL* je relaciona baza otvorenog koda, koja se po učestalosti korišćenja u svetu nalazi na drugom mestu. Najviše korišćena je kao klijent-server model otvorenog koda relacionih baza podataka. *MySQL* se najčešće koristi kao baza podataka za veb aplikacije.



Slika 2. Dizajn veb-sajta.

Sa leve strane u padajućem meniju možemo da primetimo da postoji opcija *Connected devices online* u kojoj možemo da vidimo da li veb-sajt ima komunikaciju sa serverom. Ukoliko u bilo kom trenutku dođe do prekida komunikacije sa serverom, podaci se ne gube već čuvaju u samom *JS* fajlu. Takođe možemo da primetimo da postoji opcija za izmenu *datuma*, pregled *grafikona* i *tabele* za izabrani datum (slika 3 i 4).



Slika 3. Pregled grafikona za 20.06.2019. godine.

20.06.2019.

Table

Show 10 entries Search:

Datum	Vreme	Vrednost
20.06.2019.	0:06:05	0,083
20.06.2019.	0:11:05	0,093
20.06.2019.	0:16:05	0,074
20.06.2019.	0:21:05	0,077
20.06.2019.	0:26:06	0,075
20.06.2019.	0:31:06	0,072
20.06.2019.	0:36:06	0,079

Slika 4. Pregled tabele za 20.06.2019. godine.

## 5. Rezultati ispitivanja

Ispitivanja su vršena u Laboratoriji za radijaciona merenja, Laboratorije za zaštitu od zračenja i zaštitu životne sredine „ZAŠTITA” Instituta „Vinča”, u etalonskom polju izvora Co-60. Ispitivana su tri analogna merača sa izlazom za slušalice. Nazivi modela i njihove karakteristike date su u tabeli 1.

Tabela 1. Merne karakteristike testiranih merača.

Naziv i proizvođač	Opseg merenja	Rezolucija	Merena veličina
KOMO-TM, INN Vinča	0 – 10 imp/s 0 – 100 imp/s 0 – 1000 imp/s	1/100 vrednosti opsega	Impulsi u sekundi
DR-M3, Rudi Čajavec	0,5 – 5000 $\mu$ Gy/h	0,5 i 1 puta red veličine na log skali	Jačina doze u tkivu
Monitor 4 kit, SE International	0 – 5 $\mu$ Sv/h 0 – 50 $\mu$ Sv/h 0 – 500 $\mu$ Sv/h	1/25 vrednosti opsega	Ambijentalni dozni ekvivalent

Prilikom testiranja merača KOMO-TM, prvo je izmeren broj impulsa pri određenim jačinama ambijentalnog doznog ekvivalenta. Referentne vrednosti su određene tako da se kazaljka na analognoj skali nalazi u prvoj i poslednjoj trećini opsega. Uporednim merenjem dobijeni su rezultati očitani sa skale instrumenta i rezultati u digitalnom obliku dobijeni pomoću interfajsa i računarskog programa. Izmerene vrednosti su date u tabeli 2. Na osnovu njih je određena i osetljivost tj. kalibracioni faktori, koji su uneti u podešavanja programa. Rezultati merenja su prikazani u tabeli 3.

**Tabela 2. Rezultati uporednog merenja meračem KOMO-TM.**

Referentna vrednost $\dot{H}^*(10)$ ( $\mu\text{Sv/h}$ )	Srednje pokazivanje merača (imp/s)	Srednje pokazivanje programa (imp/s)	Odstupanje srednjeg pokazivanja merača (%)	Osetljivost na osnovu pokazivanja merača ( $\frac{\mu\text{Sv/h}}{\text{imp/s}}$ )	Osetljivost na osnovu pokazivanja programa ( $\frac{\mu\text{Sv/h}}{\text{imp/s}}$ )
Fon	1,58	0,94	68,6	–	–
0,814	4,84	3,19	17,2	0,168	0,255
1,425	8,05	5,42	26,7	0,177	0,263
8,14	34,9	34,8	-2,3	0,233	0,234
14,25	60,4	59,7	-0,4	0,236	0,239
81,40	358,4	346,2	3,2	0,227	0,235
142,5	578,4	578,3	-0,1	0,246	0,246

Analizom rezultata iz tabele 2 vidi se odstupanje između srednjeg pokazivanja merača i srednjeg pokazivanja programa, posebno na prvom opsegu (0 – 10 imp/s). Uzrok tome je loša kalibracija RC integratora koji broj impulsa pretvara u strujni signal kojim se pokreće analogni instrument kojim se prikazuje izmerena vrednost, kao i kratka RC vremenska konstanta integratora. Na višim vrednostima odbroja, dolazi do izražaja i greška koja potiče od ograničene rezolucije analognog indikatora (1 i 10 imp/s). Korišćenjem interfejsa i programa, pokazivanje je digitalno i nema greške očitavanja kao kod analognog indikatora. Korisniku je omogućeno da zada vreme merenja, pa je i statistička greška merenja manja, posebno pri niskim jačinama doze i na nivou fona, kao i pri merenju uzoraka radi utvrđivanja kontaminacije.

**Tabela 3. Rezultati merenja ambijentalnog doznog ekvivalenta meračem KOMO-TM.**

Referentna vrednost $\dot{H}^*(10)$ ( $\mu\text{Sv/h}$ )	Srednje pokazivanje programa ( $\mu\text{Sv/h}$ )	Odstupanje od referentne vrednosti (%)
0,814	0,782	-3,9
1,425	1,327	-6,9
8,14	8,53	4,8
14,25	14,63	2,7
81,40	84,82	4,2
142,5	141,7	-0,57

Rezultati merenja ambijentalnog doznog ekvivalenta korišćenjem interfejsa i programa su zadovoljavajući i odstupanja od referentnih vrednosti su manja od 10%.

Kao i u prethodnom slučaju, testiranje merača DR-M3 i Monitor 4 obavljeno je u dve etape. Prvo su određeni kalibracioni faktori na osnovu izmerenog broja impulsa u sekundi pri referentnim vrednostima jačine doze pomoću interfejsa i računarskog programa, a zatim su uneti u podešavanja programa i merenja su ponovljena. Dobijene su vrednosti date u tabelama 4 i 5.



Табела 4. Резултати упоредног мерења мераčem DR-M3.

Referentna vrednost jačine doze u tkivu ( $\mu\text{Gy/h}$ )	Srednje pokazivanje merača ( $\mu\text{Gy/h}$ )	Srednje pokazivanje programa ( $\mu\text{Gy/h}$ )	Odstupanje srednjeg pokazivanja merača (%)	Odstupanje srednjeg pokazivanja programa (%)
3	3,5	3,29	16,6	9,7
30	27	30,18	-10,0	0,60
300	300	286,2	0,0	-4,6
3000	4000	3068	33,4	2,3

Табела 5. Резултати упоредног мерења мераčem Monitor 4.

Referentna vrednost $\dot{H}^*(10)$ ( $\mu\text{Sv/h}$ )	Srednje pokazivanje merača ( $\mu\text{Sv/h}$ )	Srednje pokazivanje programa ( $\mu\text{Sv/h}$ )	Odstupanje srednjeg pokazivanja merača (%)	Odstupanje srednjeg pokazivanja programa (%)
3	3,6	3,00	20,0	0,06
30	34	32,63	13,3	8,8
300	350	300,0	16,7	0,01

Analizom rezultata iz tabela 4 i 5, vidi se da je korišćenje interfejsa značajno smanjilo odstupanje rezultata merenja u odnosu na rezultate merenja dobijene očitavanjem sa skale instrumenta.

## 6. Zaključak

U radu je opisan interfejs koji omogućava povezivanje analognih merača zračenja na računar i koji im poboljšava i proširuje merne karakteristike. Korišćenjem interfejsa otklanja se greška koja potiče od promene vrednosti elemenata RC integratora ili od njegove loše kalibracije. Takođe, greška očitavanja koja potiče od paralakse više ne postoji, a i rezolucija je poboljšana. Mogućnost zadavanja vremena merenja tj. vremena integracije, dozvoljava smanjivanje statističke greške merenja, posebno pri niskim nivoima jačine doze. Kod većine uređaja se vreme integracije ne može menjati, osim kod merača KOMO-TN (slika 1). Ukoliko uređaj ima više opsega merenja, ako se odabere najveći opseg, više nije potrebno brinuti o promeni opsega sa promenom jačine doze. Grafički prikaz, automatsko snimanje i slanje izmerenih podataka na veb-sajt su dodatne funkcije kojima se značajno proširuje upotrebljivost analognih merača zračenja.

## 7. Literatura

- [1] Uputstvo za korišćenje, KOMO-TN, Prenosni radiološki merač zračenja, Institut za nuklearne nauke „Boris Kidrič”, Vinča.
- [2] Uputstvo za korišćenje, KOMO-TM, Prenosni radiološki merač zračenja, Institut za nuklearne nauke „Boris Kidrič”, Vinča.

- [3] Interno uputstvo za korišćenje, Radiološki detektor DR-M1, Institut Vinča.
- [4] Interno uputstvo za korišćenje, Radiološki detektor DR-M3.
- [5] Interno uputstvo za korišćenje, Radiološki detektor DP-5B.
- [6] Operating manual for the Monitor 4, [https://seintl.com/support/manuals/M4II\\_Family\\_Operation\\_Manual\\_English.pdf](https://seintl.com/support/manuals/M4II_Family_Operation_Manual_English.pdf) (pristupljeno 11.04.2019.).
- [7] Miloš Đaletić, Unapređenja digitalnog merača radioaktivnog zračenja DMRZ-M15, *Zbornik radova XXX simpozijuma Društva za zaštitu od zračenja Srbije i Crne Gore* 2019.

### **INTERFACE FOR CONNECTING DOSIMETERS TO A COMPUTER AND FOR DATA SENDING TO WEB SITE**

**Miloš Đaletić<sup>1</sup> and Stevan Karimanović<sup>2</sup>**

- 1) *Vinca Institute of Nuclear Sciences, Radiation and Environmental Protection Department, Belgrade, Serbia, [djaletic@vinca.rs](mailto:djaletic@vinca.rs)*
- 2) *Public Company „Nuclear facilities of Serbia“, Belgrade, Serbia*

#### **ABSTRACT**

Substantial number of dosimeters in use does not have PC connection capability. Interface presented in this paper allows them to be connected to a PC in case they have earphone or pulse output connector. Interface is connected to a PC via USB cable and it sends measured pulse count. PC program is used to display measured results in counts per second and in case of known meter sensitivity (calibration factor), results can be displayed in radiological units – Gy or Sv, as well. Measured data is also shown in form of a chart and there is an auto record option. PC program is a modified version of the GMC7 program. Capability of data sending to the web server is added, and a web page is made for a data display. Interface was successfully tested with several different dosimeters, broadening their functionality.

## NOVI MATERIJALI ZA SEPARACIJU RADIOAKTIVNOG STRONCIJUMA IZ MORSKE VODE

Ivana COHA<sup>1</sup>, Ivana SMIČIKLAS<sup>2</sup>, Željko GRAHEK<sup>1</sup>,  
Marija ŠLJIVIĆ-IVANOVIĆ<sup>2</sup> i Mihajlo JOVIĆ<sup>2</sup>

1) Institut Ruđer Bošković, Zagreb, Hrvatska, [ivana.coha@irb.hr](mailto:ivana.coha@irb.hr), [zgrahek@irb.hr](mailto:zgrahek@irb.hr)

2) Univerzitet u Beogradu, Institut za nuklearne nauke Vinča, Beograd, Srbija,  
[ivanat@vin.bg.ac.rs](mailto:ivanat@vin.bg.ac.rs), [marijashljivic@vin.bg.ac.rs](mailto:marijashljivic@vin.bg.ac.rs), [mjovic@vin.bg.ac.rs](mailto:mjovic@vin.bg.ac.rs)

### SADRŽAJ

Otpuštanje <sup>90</sup>Sr u mora i okeane kao posledica testiranja nuklearnog naoružanja i akcidenata u nuklearnim objektima podstaklo je razvoj novih, jednostavnijih i brzih metoda i materijala za njegovu separaciju. Monitoring morske vode u slučaju akcidentne situacije, kao i dekontaminacija tečnog otpada koji sadrži morsku vodu, predstavljaju izuzetno zahtevne zadatke usled složenog hemijskog sastava i visokog saliniteta matriksa. U ovom radu dat je pregled najnovijih rezultata u oblasti razvoja materijala sa potencijalom selektivnog vezivanja Sr-jona iz morske vode. Diskutovani su mehanizmi vezivanja i performanse različitih materijala sa aspekta primene u praksi i perspektivnih pravaca budućih istraživanja.

### 1. Uvod

Separacija jona Sr iz morske vode (MV) je izuzetno komplikovana zbog kompleksnog matriksa, u kome je prosečna koncentracija Sr 8,0 mg/L [1], a koncentracije ostalih katjona mnogostruko veće (oko 10000 mg/L Na, 1200 mg/L Mg, 400 mg/L Ca i 400 mg/L K). Otpuštanje <sup>90</sup>Sr u životnu sredinu naročito nakon nuklearnih akcidenata, njegovo kretanje i uticaj na živi svet, ispitivani su u manjoj meri u odnosu na Cs zbog komplikovanih i dugotrajnih analitičkih procedura [2]. Monitoring <sup>90</sup>Sr u okolini neophodan je zbog homologije sa Ca i deponovanja u koštanom tkivu, koje posledično može uzrokovati rak kostiju, rak okolnog mekanog tkiva ili leukemiju. U morskoj vodi, <sup>90</sup>Sr može se koristiti kao traser (obeleživač) u praćenju strujanja MV [3], kao i geohemijskih procesa. Obzirom da je prosečna koncentracija aktivnosti <sup>90</sup>Sr u površinskoj MV 0,9 – 1,5 Bq/m<sup>3</sup>, za analizu je potrebna velika zapremina uzorka MV (do čak 170 L) [4]. Procenjeno je da je nakon nuklearne nesreće u Fukušimi 2011. god, u severni deo Tihog okeana ispušteno od 0,04 do 1 PBq <sup>90</sup>Sr [3, 5], izmerena koncentracija aktivnosti na pojedinim mestima dosezala je i 85 ± 3 Bq/m<sup>3</sup> [5], a istraživanja su zabeležila i dalje curenje radioaktivnog otpada koji sadrži <sup>90</sup>Sr direktno u okean [2]. Svi ovi podaci, ukazuju na potrebu za novim i bržim tehnikama određivanja radioaktivnog stroncijuma u MV.

Takođe, problem upravljanja radioaktivnim tečnim otpadom koji sadrži MV još uvijek nije potpuno rešen. Velika količina ovakvog otpada je do sada akumulirana i predstavlja izvor opasnosti po okolinu zbog moguće nekontrolisane migracije radionuklida. Razvoj postupaka tretmana polazi od tri ključna faktora: saliniteta, sastava radionuklida i njihove specifične aktivnosti. Otpad koji sadrži manje od 10% MV može se tretirati

destilacijom i jonskom izmenom, dok tretman otpada sa više od 50% MV zahteva primenu separacionih medijuma visoke selektivnosti [6].

U ovom radu sumirani su rezultati najnovijih istraživanja u pravcu razvoja materijala za separaciju jona Sr iz MV, u cilju tretmana radioaktivnog otpada koji sadrži morsku vodu, sprečavanja difuzije u životnoj sredini i u analitičke svrhe.

### 2. Savremeni materijali u separaciji radioaktivnih jona Sr iz morske vode

#### *Fosfatni materijali*

Visoki sorpcioni kapacitet kalcijum-hidroksiapatita ( $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_5(\text{OH})_2$ ) prema jonima Sr, kao i inhibirajući efekat kompetitivnih katjona, posebno Ca, odavno su poznati [7]. Međutim, primena fosfatnih matrica ne gubi na značaju, zbog stabilnosti vezanog Sr i dobrih performansi u širokom rasponu pH, posebno u neutralnoj sredini kakva je MV. Novija istraživanja su obuhvatila mogućnosti primene apatita u morskoj vodi, kao i efikasnosti sorpcije Sr na ne-apatitnim fosfatima. Bioapatit (BHAP) koga proizvode bakterije *Serratia sp.* iz rastvora kalcijum hlorida, trinatrijum-citrata i glicerol 2-fosfata, ispitan je kao sorbent Sr-jona u rastvorima koji su dobijeni mešanjem dejonizovane i morske vode (0-90%), i upoređen sa prirodnim zeolitom [8]. U dejonizovanoj vodi, klinoptilolit je bio efikasniji sorbent Sr iz rastvora (10,3 mg/g) u poređenju sa BHAP (7,5 mg/g). Povećanje saliniteta doprinelo je potpunom suzbijanju sorpcije Sr klinoptilolitom već pri udelu morske vode od 70%, dok je bioapatit zadržao kapacitet vezivanja od 2,3 mg/g čak i pri 90% morske vode u uzorku. Sorpcija  $^{85}\text{Sr}$  proučavana je primenom Ca-Mg-fosfatnih sorbenata kompleksnog hemijskog sastava, dobijenih hemijskim tretmanima dolomita [9]. Utvrđeno je da se sorpcija Sr na svim ispitivanim fosfatima smanjuje sa povećanjem saliniteta. Za sorbent koji sadrži tercijarni kalcijum i magnezijum fosfat i magnezijum-amonijum fosfat, dobijene su najveće vrednosti za koeficijent raspodele (Kd) za Sr (od  $2,66 \times 10^3$  do  $0,14 \times 10^3$  mL/g) i efikasnost sorpcije Sr (od 84% u rastvoru bez soli, do 21% u rastvoru sa maksimalnom koncentracijom soli od 50,0 g/L). U rastvoru čiji je sastav sličan sastavu MV (35,0 g/L), ove vrednosti su iznosile  $0,18 \times 10^3$  cm<sup>3</sup>/g i 26%. Navedeni fosfatni sorbent imao je vrednost tačke nultog naelektrisanja (pHpzc) 8,4, koja premašuje pH rastvora sa salinitetom 35,0 g/L i osigurava nezavisnost efikasnosti sorpcije i koeficijenta raspodele od pH vrednosti rastvora u pH opsegu 3,0–8,5.

#### *Oksidni materijali*

Sintetički Ba-titanat, dobijen reakcijom barijum-hlorida i natrijum-titanata, pokazao je visoki kapacitet i selektivnost prema jonima Sr, sa koeficijentom raspodele  $K_d = 863$  mL/g u šaržnom eksperimentu sa MV ( $[\text{Sr}] = 9 \times 10^{-5}$  mol/L; doza sorbenta 1 g/L) [10]. Ovaj material ima šest puta veću vrednost  $K_d$  od Na-titanata, a koji je korišćen kao jedan od sorbenata za uklanjanje više radionuklida u nuklearnoj elektrani Fukušima-Daiči. Nakon kontakta sa sorbentom i sulfatnim jonima iz MV, separacija Sr se odvija jonskom izmenom sa Ba-jonima i koprecipitacijom sa nerastvornim barijum-sulfatom koji se formira na površini zrna titanata.

Sorpcioni materijali na bazi Ba-silikata takođe imaju veliki potencijal za primenu u MV. Amorfni  $\text{BaSiO}_3$  je sintetisan sol-gel tranzicijom, indukovanom uvođenjem jona  $\text{Ba}^{2+}$  u rastvor  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  [6]. Ovim postupkom dobijeni su porozni materijali sa visokim sadržajem zamenljivih Ba-jona. Svojstva dobijenih materijala mogu se dizajnirati variranjem uslova u toku sol-gel tranzicije kao i unošenjem različitih aditiva u sol.

Skup reakcija koje se odvijaju između rastvora MV koji sadrži sulfatne jone i amorfno BaSiO<sub>3</sub> uključuje:

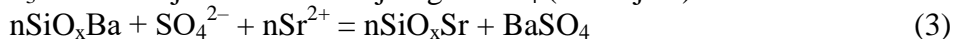
jonsku izmenu Sr<sup>2+</sup> i Ba<sup>2+</sup> (reakcija 1)



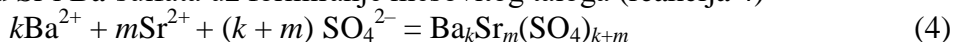
formiranje nerastvornog SrSiO<sub>3</sub> na površini sorbenta (reakcija 2)



hidrolizu BaSiO<sub>3</sub> i formiranje slabo rastvorljivog BaSO<sub>4</sub> (reakcija 3)



koprecipitaciju Sr i Ba-sulfata uz formiranje mešovitog taloga (reakcija 4)



i hidrolizu BaSiO<sub>3</sub> u prisustvu sulfata (reakcija 5)



pri čemu reakcije (3) i (4) povećavaju selektivnost materijala prema Sr.

Efikasnost sorpcije na poroznom BaSiO<sub>3</sub> pripisuje se formiranju i rastu BaSO<sub>4</sub> precipitata u porama BaSiO<sub>3</sub>. Utvrđeno je da se efekat manifestuje samo kada veličina pora sorpcionog materijala odgovara kritičnom radijusu formiranja BaSO<sub>4</sub> taloga. Srednji prečnik pora je 2,0 nm, a kritični prečnik pora za formiranje taloga BaSO<sub>4</sub> je 1,4 nm. Zahvaljujući ovom složenom mehanizmu, u dinamičkim uslovima BaSiO<sub>3</sub> je pokazao visok kapacitet zadržavanja jona Sr iz MV, kao i iz koncentrata MV.

Reakcijom KMnO<sub>4</sub> i H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, tretmanom taloga sa 1 M rastvorom NaOH i žarenjem na 500°C, proizveden je sorbent na bazi mangan-oksida, sa visokom selektivnošću prema jonima <sup>90</sup>Sr [11]. U prisustvu 400 mg/L jona Ca, koeficijent raspodele za Sr iznosio je 1,9×10<sup>3</sup> mL/g. U MV, vrednosti K<sub>d</sub> za Sr je bio u granicama 0,8×10<sup>3</sup> - 1,2×10<sup>3</sup> mL/g, a u simuliranom rastvoru MV iznose 1,6×10<sup>3</sup> - 1,8×10<sup>3</sup> mL/g. Materijal je pokazao mehaničku stabilnost i očuvanu strukturu zrna u uslovima dinamičke sorpcije. Tek pri dugotrajnom radu kolone uočeno je opadanje kapaciteta vezivanja Sr usled rastvaranja sorbenta, što se može prevazići dodavanjem svežeg sorbenta. U uslovima dinamičke sorpcije, prosečna vrednost zapremine MV koja može da se propusti kroz kolonu do njenog proboja (95% zadržavanja) iznosi 150 kolonskih zapremina. Proizvedeni materijal se može primeniti u dekontaminaciji tečnog radioaktivnog otpada koji sadrže morsku vodu sa povišenom aktivnošću <sup>90</sup>Sr.

Novi magnetni sorbent, CuFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, sintetisan je višestepenim hemijskim postupkom iz industrijskog mulja i po prvi put primenjen kao sorbent jona Sr iz MV [12]. Sorpcija Sr je pokazala rapidan porast sa povećanjem pH rastvora od 2,61 do 10,25, a smanjenje sa povećanjem jonske jačine, što ukazuje na mehanizam građenja kompleksa spoljašnje sfere. Iz MV, pri njenom prirodnom pH od 8,3, uklonjeno je 62,3% Sr za 30 minuta, mešanjem 0,05 g sorbenta i 10 mL uzorka.

### **Zeoliti**

Iako je kapacitet zeolita za vezivanje katjona iz rastvora, poznat i u komercijalnoj upotrebi, prirodni zeoliti praktično ne vezuju jone Sr iz MV [8, 13]. Međutim, novija istraživanja pokazuju da sintetički zeolit 4A (4A), kao i zeolit 4A impregniran Ba-jonima (Ba4A), imaju veliki potencijal za ovu primenu [14]. Optimalni sorbent dobijen je uvođenjem 20,2 wt% Ba u strukturu zeolita. Za separaciju 99% Sr-jona iz visoko-radioaktivne otpadne MV sa 0,2 mg/L Sr, bilo je potrebno ≥ 25 g/L uzorka 4A i svega 5 g/L uzorka Ba4A. Pored izražene selektivnosti kristalne rešetke zeolita 4A prema jonima Sr, pokazano je da prisustvo Ba u strukturi sorbenta dovodi do koprecipitacije Sr-jona teško rastvornim BaSO<sub>4</sub>.

### *Organski materijali*

Mikrosfere alginata, sa veoma visokim kapacitetom za vezivanje Sr-jona iz dejonizovane vode (110 mg/g), ispitane su i kao ekonomičan material za separaciju Sr iz MV [15]. Ovaj organski sorbent, vezuje Sr mehanizmom jonske izmene sa Ca-jonima, a osim u jako kiseljoj sredini (pH 1-2), sorpcioni kapacitet prema Sr ne zavisi od pH rastvora. Konkurentni katjoni iz MV inhibiraju vezivanje Sr za mikrosfere alginata, pa se kapacitet sorpcije smanjuje. Alginatne mikrosfere su u šaržnim uslovima (0,02g sorbenta u 0,1 L MV) za 24 h iz rastvora koji sadrži 100 mg/L Sr u dejonizovanoj vodi sorbovale 42 mg/g Sr, dok je pod istim uslovima kapacitet sorpcije iz MV bio 17,8 mg/g. Sorpcioni afinitet prema Sr je potvrđen i koršćenjem MV sa realnom koncentracijom Sr od 6,1 mg/L, pri čemu su mikrosfere imale kapacitet od 4,4 mg/g. Imajući u vidu mogućnost regeneracije sorbenta u rastvoru CaCl<sub>2</sub> alginatne mikrosfere su ekonomičan sorbent. Sa druge strane, bubrenje u MV, biorazgradljivost i loša mehanička svojstva su organičavajući faktori za primenu.

### *Kompoziti*

Mogućnost poboljšanja sorpcionih karakteristika alginatnih mikrosfera prema jonima Sr iz MV, izučavana je sintezom kompozita sa MnO<sub>2</sub> [16]. MnO<sub>2</sub>-alginatne sfere su dobijene mešanjem praha MnO<sub>2</sub> sa rastvorom alginske kiseline. U smešu je ukapavan rastvor 0,5 mol/L rastvor CaCl<sub>2</sub>, pri čemu je formiran sferični hidrogel sa 16,1% MnO<sub>2</sub> i 7,0% alginata. S obzirom da alginatne mikrosfere sadrže samo 3,7% alginata, zaključeno je da imobilizacija MnO<sub>2</sub> alginatom prouzrokovala kompaktniju strukturu kompozita, što je rezultiralo u nižoj količini vlage. U poređenju sa alginatnim mikrosferama, MnO<sub>2</sub>-alginatni kompozit je pokazao značajno poboljšanu sorpcionu efikasnost prema Sr jonima u prisustvu jona Na (10000 mg/L), Mg (1200 mg/L), Ca (400 mg/L) i K (400 mg/L), i četiri puta veću efikasnost sorpcije Sr jona iz realne MV. Od polaznih 7 mg/L Sr, u ravnotežnim uslovima uklonjeno je 13,4% alginatom, a 44,3% kompozitom. Međutim, sorpcija MnO<sub>2</sub>-alginatom je spora i ravnoteža sorpcije iz MV uspostavljena je tek nakon više od 60 h.

U drugoj studiji, mehanička i sorpciona svojstva alginata su unapređena sintezom kompozita sa zeolitom 4A [17]. U rastvor natrijum-alginske kiseline dodat je zeolit 4A i dobijena homogena mešavina je u cilindričnom kalupu zamrznuta na -20°C, a zatim vakuumirana i sušena 7 dana na -50°C do uklanjanja vlage i formiranja porozne strukture. Na taj način je pripremljena zeolit-alginatna pena, koja je naknadno tretirana 0,5 mol/L rastvorom CaCl<sub>2</sub> u cilju unakrsnog vezivanja alginske kiseline. Utvrđeno je da alginat ima slojevituu strukturu, a da su čestice zeolita imobilisane između tih slojeva. Pena koja sadrži 10% zeolita je pokazala 4 puta veći sorpcioni kapacitet prema jonima Sr. Vreme uravnotežavanja je oko 250 h. Iz uzorka MV koja je imala 6,1 mg/L Sr, alginatna pena je sorbovala 28,4% Sr, a kompozitni material 40,1%.

Hidromehanička svojstava BaSiO<sub>3</sub> se takođe mogu poboljšati dizajniranjem kompozitnih materijala u kojima se prah aktivne komponente prevodi u granule dodatkom odgovarajućih veziva. Resorcinol-formaldehidna smola koja je selektivna prema jonima Cs, korišćena je za dobijanje kompozita sa BaSiO<sub>3</sub> u cilju simultanog vezivanja <sup>137</sup>Cs i <sup>90</sup>Sr iz MV [18]. Optimalna količina BaSiO<sub>3</sub> u kompozitu, koja značajno poboljšava performanse materijala u koloni, iznosi 15,4 wt %.



### 3. Zaključak

Razvoj efikasnih sorbenata za separaciju jona Sr iz rastvora sa visokim sadržajem soli i dalje predstavlja izazov. Organski sorbenti i kompoziti potencijalno mogu naći primenu u analitici zbog mogućnosti regeneracije jona Sr izmenom sa Ca-jonima, dok ih biodegradibilnost, sporo uspostavljanje ravnoteže i bubrenje čine slabo primenljivim u tehnologijama prečišćavanja MV. Ba-substituisani silikati, titanati i zeolit 4A pokazuju visoku selektivnost prema Sr jonima iz MV, kao rezultat sinergije mehanizama jonske izmene i hemijske precipitacije. Kompoziti ovih prahova i organskih smola, sa poboljšanim mehaničkim svojstvima, kandidati su za primenu u protočnim sistemima za dekontaminaciju. Uzimajući u obzir ekonomičnost i performanse svih navedenih materijala, sintetički zeolit 4A bi mogao biti osnova za primenu u dekontaminaciji zahvaljujući kapacitetu, selektivnosti prema Sr i brzini reakcije, a rastvorljivost ove kristalne strukture u kiseloj sredini bi mogla biti ključna za razvoj postupka predkoncetriranja Sr iz uzorka MV i dalje primene u analitici.

### 4. Zahvalnica

Rad je podržan od strane MPNTR RS (Projekat III43009), i bilateralnog projekta Srbija-Hrvatska (2016-2017) "Ispitivanje sorpcije radionuklida na sintetičkim i prirodnim sorbentima sa akcentom na potencijalnu primenu u analitici i/ili sigurnom odlaganju".

### 5. Literatura

- [1] U.S. Department of Health and Human Services. Toxicological Profile for Strontium; Public Health Service, Agency for Toxic Substances and Disease Registry: Washington, DC, USA, 2004.
- [2] M. Castrillejo, N. Casacuberta, C.F. Breier, S.M. Pike, P. Masqué, K.O. Buessler. Reassessment of  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ , and  $^{134}\text{Cs}$  in the coast off Japan derived from the Fukushima Dai-Ichi nuclear accident. *Environ. Sci. Technol.* 50, 2016, 173–180.
- [3] P.P. Povinec, K. Hirose, M. Aoyama. Radiostrontium in the Western North Pacific: Characteristics, behavior, and the Fukushima impact. *Environ. Sci. Technol.* 46, 2012, 10356-10363.
- [4] Y. Shao, G. Yang, H. Tazoe, L. Ma, M. Yamada, D. Xu. A review of measurement methodologies and their applications to environmental  $^{90}\text{Sr}$ . *J. Environ. Radioact.* 192, 2018, 321-333.
- [5] N. Casacuberta, P. Masqué, J. Garcia-Orellana, R. Garcia-Tenorio, K.O. Buessler.  $^{90}\text{Sr}$  and  $^{89}\text{Sr}$  in seawater off Japan as a consequence of the Fukushima Dai-Ichi nuclear accident. *Biogeosciences* 10, 2013, 3649–3659.
- [6] V.A. Avramenko, A.M. Egorin, E.K. Papynov, T.A. Sokolnitskaya, I.G. Tananaev, V.I. Sergienko. Processes for treatment of liquid radioactive waste containing seawater. *Radiochemistry* 59, 2017, 407–413.
- [7] I. Smičiklas, A. Onjia, S. Raičević, Đ. Janacković, M. Mitrić M. Factors influencing the removal of divalent cations by hydroxyapatite. *J. Hazard. Mater.*



- 152, 2008, 876–884.
- [8] S. Handley-Sidhu, T.K. Mullan, Q. Grail, M. Albadarneh, T. Ohnuki, L.E. Ma. Influence of pH, competing ions, and salinity on the sorption of strontium and cobalt onto biogenic hydroxyapatite. *Sci. Rep.* 6, 2016, 23361.
- [9] N.V. Kitikova, A.I. Ivanets, I.L. Shashkova, A.V. Radkevich, L.V. Shemet, L.V. Kul'bitskaya, M. Sillanpa. Batch study of  $^{85}\text{Sr}$  adsorption from synthetic seawater solutions using phosphate sorbents. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 314, 2017, 2437-2447.
- [10] C. Guévar, A. Hertz, E. Brackx, Y. Barré, A. Grandjean. Mechanisms of strontium removal by a Ba-titanate material for the wastewater treatment. *J. Environ. Chem. Eng.* 5, 2017, 4948-4957.
- [11] E.K. Papynov, A.M. Egorin, T.A. Sokolnitskaya, D.V. Marinin, Y.A. Azarova, A.S. Portnyagin, M.I. Balanov, D.S. Misko, E.A. Shelestiuk, A.M. Kalashnikova, E.A. Tokar, I.G. Tananaev, V.A. Avramenko. Manganese oxide-based sorbent for Sr-90 radionuclide removal from seawater. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 307, 2018, 012030.
- [12] Y. Tu, C. You, Z. Zhang, Y. Duan, J. Fu, D. Xu. Strontium removal in seawater by means of composite magnetic nanoparticles derived from industrial sludge. *Water*, 8:357, 2016, 1-12.
- [13] T. Kubota, S. Fukutani, T. Ohta, Y. Mahara. Removal of radioactive cesium, strontium, and iodine from natural waters using bentonite, zeolite, and activated carbon. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 296, 2013, 981–984.
- [14] E.H. Lee, K.Y. Lee, K.W. Kim, I. Soo, D.Y. Chung, J.K. Moon, J.W. Choi. Adsorption removal of Sr by barium impregnated 4A zeolite (BaA) from high radioactive seawater waste. *J. Nucl. Fuel Cycle Waste Technol.* 14, 2016, 101-112.
- [15] H.J. Hong, J. Ryu, I.S. Park, T. Ryu, K.S. Chung, B.G. Kim. Investigation of the strontium Sr(II) adsorption of an alginate microsphere as a low-cost adsorbent for removal and recovery from seawater. *J. Environ. Manage.* 165, 2016, 263-270.
- [16] H.J. Hong, B.G. Kim, J. Hong, J. Ryu, T. Ryu, K.S. Chung, H. Kim, I.S. Park. Enhanced Sr adsorption performance of  $\text{MnO}_2$ -alginate beads in seawater and evaluation of its mechanism. *Chem. Eng. J.* 319, 2017, 163-169.
- [17] H.J. Hong, B.G. Kim, J. Ryu, I.S. Park, K.S. Chung, S.M. Lee, J.B. Lee, H.S. Jeong, H. Kim, T. Ryu. Preparation of highly stable zeolite-alginate foam composite for strontium ( $^{90}\text{Sr}$ ) removal from seawater and evaluation of Sr adsorption performance. *J. Environ. Manage.* 205, 2018, 192-200.
- [18] A.M. Egorin, T.A. Sokolnitskaya, M.V. Tutov, E.A. Tokar, M.Yu. Matveikin, V.A. Avramenko. Composite selective sorbents for sea water decontamination from cesium and strontium radionuclides. *Dokl. Phys. Chem.* 460, 2015, 10–14.

## NEW MATERIALS FOR SEPARATION OF RADIOACTIVE STRONTIUM FROM THE SEA WATER

Ivana COHA<sup>1</sup>, Ivana SMIČIKLAS<sup>2</sup>, Željko GRAHEK<sup>1</sup>,  
Marija ŠLJIVIĆ-IVANOVIĆ<sup>2</sup> and Mihajlo JOVIĆ<sup>2</sup>

1) Ruđer Bošković Institute, Zagreb, Croatia, [ivana.coha@irb.hr](mailto:ivana.coha@irb.hr), [zgrahek@irb.hr](mailto:zgrahek@irb.hr)

2) University of Belgrade, Vinča Institute of Nuclear Sciences, Belgrade, Serbia,  
[ivanat@vi.bg.ac.rs](mailto:ivanat@vi.bg.ac.rs), [marijasljivic@vin.bg.ac.rs](mailto:marijasljivic@vin.bg.ac.rs), [mjovic@vin.bg.ac.rs](mailto:mjovic@vin.bg.ac.rs)

### ABSTRACT

The release of <sup>90</sup>Sr into the sea and oceans as a result of testing nuclear weapons and accidents in nuclear facilities has prompted the development of new, simpler and faster methods and materials for its separation. The monitoring of seawater in the event of an accident, as well as decontamination of liquid waste containing sea water, represent extremely demanding tasks due to the complex chemical composition and high salinity of the matrix. This paper presents an overview of the latest results in the field of material development with the potential for selective binding of Sr-ions from seawater. Mechanisms of binding and performance of different materials are discussed from the aspect of an application in practice and directions of future research.

## ČERENKOVLJEV EFEKT U ODREĐIVANJU <sup>89,90</sup>Sr

Ivana COHA, Gorana KARANOVIĆ i Željko GRAHEK

Laboratorij za radioekologiju, Zavod za istraživanje mora i okoliša, Institut Ruđer Bošković, Zagreb, Hrvatska, [ivana.coha@irb.hr](mailto:ivana.coha@irb.hr), [gorana.karanovic@irb.hr](mailto:gorana.karanovic@irb.hr), [zgrahek@irb.hr](mailto:zgrahek@irb.hr)

### SADRŽAJ

Ovde je ukratko prikazan najnoviji metod za izolaciju i određivanje radioaktivnog stroncijuma razvijen u našoj laboratoriji, koji podrazumeva izolaciju i separaciju stroncijuma na visoko selektivnim ekstrakcionim hromatografskim smolama, te merenje direktno na hromatografskoj koloni. Postupak uključuje odvajanje stroncijuma od matrice na koloni SuperLig 620, nakon čega sledi detekcija izotopa stroncijuma putem Čerenkovljevog brojanja na komercijalno dostupnom instrumentu. Generalno, prednost Čerenkovljeve tehnike brojanja je jednostavnost pripreme uzorka. Uzorak se ne razređuje bilo kojim scintilacionim koktelom i stoga ostaje nepromenjen i može se vratiti za dalju analizu. Postupak omogućava kvantitativnu izolaciju stroncijuma (100% iskorišćenje) iz velike količine acidifikovanog uzorka vode (0,5 M HNO<sub>3</sub>) u kratkom vremenu. Čerenkovljeva efikasnost brojanja <sup>89</sup>Sr i <sup>90</sup>Y je dovoljno visoka za određivanje aktivnosti niskog nivoa, a kolona se ponaša kao senzor.

### 1. Uvod

Određivanje <sup>89,90</sup>Sr je komplikovano i dugotrajno zbog njihovih radiohemijskih svojstava [1]. Oba izotopa su čisti beta-emiteri i njihovo kvantitativno određivanje zahteva hemijsku izolaciju čistog stroncijuma iz uzorka i izolacije <sup>90</sup>Y nakon postizanja radiohemijske ravnoteže tako da čitava procedura traje najmanje 16 dana. Iz tog razloga, razvoj novih metoda određivanja se fokusira na smanjenje vremena određivanja, što je posebno važno u vanrednim situacijama (nuklearne nesreće) kada su brzi i tačni rezultati od posebnog značaja za odlučivanje o merama zaštite. Razvoj brzih metoda fokusira se na razvoj novih visoko selektivnih hromatografskih izolacionih postupaka, koji omogućavaju brzu i jednostavnu hemijsku izolaciju čistog stroncijuma i metode detekcije koje omogućavaju njihovo istovremeno određivanje. Jedan od najjednostavnijih metoda istovremenog određivanja <sup>89</sup>Sr i <sup>90</sup>Sr je Čerenkovljev metod brojanja na scintilacionom brojaču. Metod se zasniva na činjenici da je srednja energija emitovanog elektrona <sup>90</sup>Sr niža od praga potrebnog da bi se postiglo Čerenkovljevo zračenje i činjenica da energija emitovanih elektrona <sup>90</sup>Y i <sup>89</sup>Sr proizvodi Čerenkovljevo zračenje. Naime, budući da su vremena poluraspada <sup>89</sup>Sr i <sup>90</sup>Y dovoljno različita, moguće je njihovo istovremeno kvantitativno određivanje [2,3]. Stoga je svrha ovog rada da se pokaže kako se kombinovanjem separacije stroncijuma sa stroncijum specifičnim smolom Superlig620 na hromatografskoj koloni, te Čerenkovljevom brojanjem vezanog stroncijuma na koloni može kreirati metod za brzo određivanja <sup>89,90</sup>Sr.

## 2. Eksperimentalni deo

Konstruisan je sistem za  $^{89,90}\text{Sr}$  predkoncentraciju i separaciju stroncijuma iz matrice, a sastoji se od peristaltičke pumpe spojene na elektromagnetne ventile na ulazu i kolone (unutrašnji prečnik ID = 0,9 cm, ispunjen sa 0,5 g sorbenta SuperLig 620) na izlazu glave pumpe. Za određivanje krive prodora, rastvor uzorka stroncijuma (praćen sa poznatom aktivnošću  $^{89}\text{Sr}$ ) je isporučen u kolonu SuperLig 620 do zasićenja. Frakcije od 20 mL su sakupljene tokom sorpcije stroncijuma i izbrojane na tečnom scintilacionom brojaču (LSC). Pre isporuke rastvora izvršena je kalibracija protoka. Kolona zasićena sa  $^{89}\text{Sr}$  je prebačena u 20 mL PE bočice i izbrojana u prisustvu 5 M  $\text{HNO}_3$  na LSC Čerenkovljevim brojanjem. Za određivanje krivulje probijanja stroncijuma u prisustvu kalijuma korišćen je stabilan stroncijum. Proces je praćen atomskim apsorpcionim spektrometrom (AAS). Efikasnost detekcije je određena dodavanjem poznate aktivnosti standardnih rastvora  $^{89}\text{Sr}$  i  $^{90}\text{Y}$ - $^{90}\text{Sr}$  (u ravnoteži) u PE kolone napunjene SuperLig 620 smolom, prebačene u 20 mL PE bočice i brojanjem na scintilacionom brojaču TriCrab 3180 TR/SL. Efikasnost je određena kada su vazduh, voda ili 5 M  $\text{HNO}_3$  korišćeni kao okruženje kao i u prisustvu mastila i boja.

### *Izolacija i određivanje $^{89,90}\text{Sr}$ u CrossCheck (CC) i uzorcima vode za piće*

Uzorci vode iz zagrebačkog javnog vodovoda obogaćeni su poznatim aktivnostima  $^{89}\text{Sr}$  i/ili  $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$  uz dodatak 0,5 – 1 mg  $\text{L}^{-1}$  stabilnog stroncijuma. CrossCheck uzorci su razblaženi deionizovanom vodom i pitkom vodom uz dodatak 0,5 – 1 mg  $\text{L}^{-1}$  stabilnog stroncijuma. Određena zapremina uzorka se isporučuje kroz kolonu SuperLig 620 uz konstantnu brzinu protoka ( $5,00 \pm 0,07 \text{ ml min}^{-1}$ ) do probijanja kolone. Nakon toga, sledi ispiranje sa 10 mL 0,5 M  $\text{HNO}_3$  pri čemu se odeljuje  $^{90}\text{Y}$ . Kolona se izdvoji, prenese u 20 mL PE bočicu, doda se 15 mL 5 M  $\text{HNO}_3$  te sledi Čerenkovljevo brojanje. Kvantitativno određivanje  $^{89,90}\text{Sr}$  zasniva se na određivanju porasta aktivnosti  $^{90}\text{Y}$  i smanjenju aktivnosti  $^{89}\text{Sr}$  uzastopnim brojanjem u različitim vremenskim intervalima (vreme koje je proteklo posle razdvajanja  $^{90}\text{Y}$ ) kao što je opisano u radu [3].

## 3. Rezultati i diskusija

Osnovna ideja ovog istraživanja bila je da se stroncij može kvantitativno vezati na SuperLig 620 (sa 100% -tnim iskorišćenjem) iz velike količine vode u kratkom vremenu, te da se  $^{89}\text{Sr}$  i  $^{90}\text{Sr}$ , uhvaćeni u koloni, mogu istovremeno odrediti i Čerenkovljevim brojanjem. Procedura treba da omogući njihovo određivanje u znatno kraćem vremenskom roku. Zbog toga je bilo neophodno pronaći optimalne uslove za predkoncentraciju i separaciju kao i detekciju. Za kvantitativno određivanje  $^{89,90}\text{Sr}$  bilo je neophodno odrediti efikasnost detekcije  $^{89}\text{Sr}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  i  $^{90}\text{Y}$  na koloni. Merenja (tabela 1) pokazuju da je efikasnost  $^{90}\text{Y}$  na koloni veća od efikasnosti u rastvoru. Efikasnost detekcije  $^{89}\text{Sr}$  je nešto viša u koloni nego u rastvoru, dok je efikasnost detekcije  $^{90}\text{Sr}$  zanemariva. Treba napomenuti da upotreba vode ili kiseline kao okolnih medija, u poređenju sa praznom bočicom, uveliko povećava efikasnost detekcije.

Povećanje efikasnosti  $^{90}\text{Y}$  i  $^{89}\text{Sr}$  može se objasniti rasipanjem Čerenkovljevih fotona u okolini. Glavni uticaji koji mogu biti razlog za ovaj efekat su promene u geometriji te prodiranje visokoenergetskih beta čestica u okolnu vodu uz rasipanje Čerenkovljevih fotona [4]. U navedenim eksperimentima, geometrija uzorka nije se menjala između merenja, tako da je jedina promena u efikasnosti detekcije mogla biti posledica rasipanja svetlosti. Dodavanje vode oko kolone na neki način homogenizuje emitovano

zračenje, tj. zračenje je više izotropno, što omogućuje da se na obe PMT u datom vremenu koincidencije detektuje više fotona. Da bi potvrdili ovu hipotezu, pripremljen je set eksperimenata gde su standardi pripremljeni u rastvoru boje i mastila. U slučaju da su standardi pripremljeni u 1 mL mastila umesto vode, kod Tri-Carb 3180 TR / SL efikasnost detekcije  $^{90}\text{Y}$  je 14% u normalnom modu brojanja i 5% u niskošumnom (low-level, LL) modu. Ako se uzme u obzir da je svetlost apsorbirana u rastvoru, detektovani fotoni su generisani interakcijom beta čestice sa stenkama kolone i malim delom staklene bočice. U slučaju kada su kolone okružene mastilom, u svim uzorcima se registruju samo osnovni pulsevi zračenja, pošto su svi Čerenkovljevi fotoni apsorbirani. S druge strane, ako kolone u kojima su standardi u rastvoru mastila, okruženi vodom, efikasnost detekcije se povećava.

**Tabela 1. Efikasnost detekcije u rastvoru ( $\epsilon_1$ ) i na koloni okruženoj medijem ( $\epsilon_2$ ).**

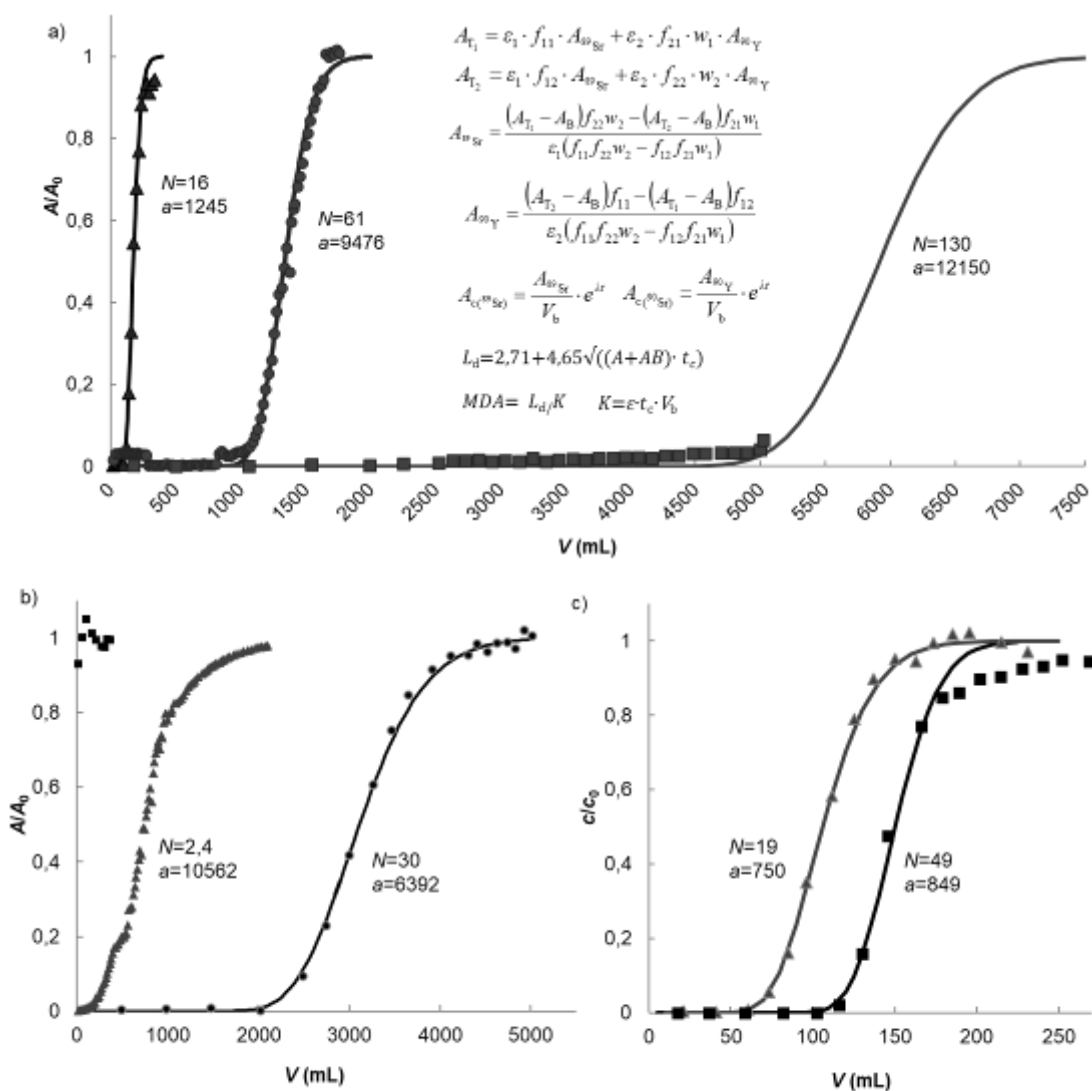
Medij	$\epsilon_1^{89}\text{Sr}$	$\epsilon_2^{89}\text{Sr}$	$\epsilon_1^{90}\text{Y}$	$\epsilon_2^{90}\text{Y}$
voda	0,3041	0,3155	0,4428	0,5537
5M HNO <sub>3</sub>	0,3344	0,3401	0,5588	0,6191
*prazna boca	/	0,2685	/	0,3543

**Tabela 2. Efikasnosti detekcije u kolonama okruženim vodom u prisutnosti mastila.**

Izotop	Tri-Carb 3180 TR/SL			
	LL mod		Normal mod	
	$\epsilon(\%)$	$\epsilon$ okružena vodom (%)	$\epsilon(\%)$	$\epsilon$ okružena vodom (%)
<b>1 ml vode</b>				
$^{36}\text{Cl}$	7,74 ± 1,71	8,29 ± 1,90	8,74 ± 2,12	9,16 ± 1,89
$^{89}\text{Sr}$	30,13 ± 1,60	32,47 ± 1,70	41,97 ± 1,66	43,27 ± 1,53
$^{32}\text{P}$	-	-	-	-
$^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$	39,13 ± 1,47	50,21 ± 1,51	63,70 ± 1,53	69,45 ± 1,28
<b>1 ml mastila</b>				
$^{36}\text{Cl}$	0,32 ± 3,55	0,56 ± 3,35	0,49 ± 3,05	0,58 ± 3,45
$^{89}\text{Sr}$	1,94 ± 3,14	3,69 ± 2,87	4,77 ± 2,42	4,86 ± 2,42
$^{32}\text{P}$	-	-	-	-
$^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$	4,80 ± 2,15	12,63 ± 2,38	13,75 ± 2,01	19,47 ± 1,58

Za određivanje optimalnih uslova predkoncentracije i separacije stroncijuma ispitan je uticaj dimenzije kolone i sastojka matrice u dinamičkim uslovima. Pošto se stroncijum jako vezuje za SuperLig 620 ( $K_d > 1000 \text{ mL g}^{-1}$ ) [5], očekuje se da se kvantitativno veže na koloni. Dobijeni rezultati pokazuju da se zapreminski faktor proboja i faktor kapaciteta smanjuju sa povećanjem koncentracije stroncijuma (slika 1a) i sa povećanjem koncentracije sastojaka matrice ( $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ) (slika 1b). Iz dobijenih rezultata vidljivo je da je volumen proboja više od dva puta manji za uzorak vode za piće u odnosu na uzorke modela. To je verovatno uzrokovano visokim sadržajem alkalnih i zemnoalkalnih elemenata u uzorcima vode. Ovo je potvrđeno rezultatima prikazanim na slici 1c gde se uočava opadanje volumena probijanja stroncijuma u prisustvu  $50 \text{ mg L}^{-1}$

kalijuma. Treba napomenuti da se kalijum nije vezao za SuperLig 620. Zapremina prodora je povećana sa dodatkom sorbenta i nije se značajno promenila sa protokom čak i u prisustvu značajnih količina sastojaka matriksa. Ovi rezultati omogućili su ubrzani proces predkoncentracije i separacije u kojem se stroncijum može kvantitativno vezati za kolonu Superlig 620 iz realnih i modelnih uzoraka[6].



**Slika 1.** Teorijski i eksperimentalno dobivene krive proboja stroncija na SuperLig 620 koloni iz a) modelnih rastvora (trokutići – 10 mg L<sup>-1</sup> Sr, 0,2 g smole, kružići – 1 mg L<sup>-1</sup> Sr, 0,2 g smole, kvadratići – 0,5 mg L<sup>-1</sup> Sr, 0,5 g smole) uz relacije za izračun [A (<sup>89,90</sup>Sr): A<sub>T1</sub> – aktivnost određena na brojaču u vremenu t<sub>1</sub>, A<sub>T2</sub> – aktivnost određena na brojaču u vremenu t<sub>2</sub>, A<sub>S</sub> – aktivnost <sup>89</sup>Sr, A<sub>Y</sub> – aktivnost <sup>90</sup>Sr/<sup>90</sup>Y, AB – fon, ε<sub>1</sub> – efikasnost brojača za <sup>89</sup>Sr, ε<sub>2</sub> – efikasnost brojača za <sup>90</sup>Sr/<sup>90</sup>Y, f<sub>11</sub> – faktor korekcije zbog raspada <sup>89</sup>Sr u vremenu t<sub>1</sub>, f<sub>12</sub> – faktor korekcije zbog raspada <sup>89</sup>Sr u vremenu t<sub>2</sub>, f<sub>21</sub> – faktor korekcije zbog raspada <sup>90</sup>Sr u vremenu t<sub>1</sub>, f<sub>22</sub> – faktor korekcije zbog raspada <sup>90</sup>Sr u vremenu t<sub>2</sub>, λ – konstanta radioaktivnog raspada pojedinog izotopa, w<sub>1</sub>, w<sub>2</sub> – udio ravnoteže <sup>90</sup>Sr/<sup>90</sup>Y u vremenu t<sub>1</sub>, t<sub>2</sub>, W=1 - e<sup>-λ<sub>Y</sub>t</sup>, t<sub>c</sub> – vrijeme brojenja, R – hemijsko iskorišćenje, Q – količina uzorka (kg ili L). L<sub>d</sub> – granica detekcije, MDA – minimalna detektabilna aktivnost.] b) u realnim uzorcima (kvadratići – morska voda, trokuti i tačkice – voda za piće), c) uz prisutnost i bez prisutnosti kalijuma.



**Tabela 3. Rezultati određivanja aktivnosti  $^{89}\text{Sr}$ : izračunata aktivnost  $A_{\text{rač}}$  (Bq) određena je iz razlike početne aktivnosti i u frakcijama na izlazu s kolone (c0-c) i eksperimentalno određena aktivnost na koloni  $A_{\text{exp}}$  (Bq). Rezultati su povezani s određivanjem kriva proboja prikazanih na slici 1.**

	V (mL)	Sr nosač (mg)	$A_{\text{rač}}$ (Bq)	$A_{\text{exp}}$ (Bq)
Modelni uzorak	350	3,5	1886	1672
	2000	2	12825	12187
	5000	2,5	7564	7499
Pitka voda	1020	1	7218	6916
	5000	2,5	510	513

Kao što je vidljivo iz rezultata prikazanih u tabeli 3. odlično slaganje aktivnosti  $^{89}\text{Sr}$  koje bi trebalo vezati za kolonu i utvrđene aktivnosti  $^{89}\text{Sr}$  potvrdilo je da je stroncijum kvantitativno (iskorišćenje 100%) vezan. Stroncijum je izolovan iz uzoraka kao što je gore opisano.  $^{89}\text{Sr}$  i  $^{90}\text{Sr}$  su istovremeno određeni uzastopnim Čerenkovljevim brojanjem u rasponu od 48 sati nakon razdvajanja u CC uzorcima i uzorcima vode za piće sa dodatnim poznatim aktivnostima  $^{89}\text{Sr}$  i  $^{90}\text{Sr}$  (tabela 4). CC uzorak pomešan sa prirodnom vodom (1L) je korišćen za ispitivanje uticaja gama emitera i matrice. Rezultati određivanja u CC uzorcima pokazali su da se samo  $^{133}\text{Ba}$  čvrsto veže na kolonu.  $^{133}\text{Ba}$  je gama-emiter i može proizvesti Čerenkovljev signal, ali brojanje čistog  $^{133}\text{Ba}$  na koloni pokazuje zanemarljiv uticaj na detekciju (efikasnost detekcije oko 0,36%). Treba još jednom napomenuti da je kolona „senzor“ koji proizvodi Čerenkovljev signal. U suštini,  $^{89}\text{Sr}$ , kada je prisutan u uzorku, može se smatrati radio-smetnjom u određivanju  $^{90}\text{Sr}$ . Zbog toga je u uzorcima vode za piće određen  $^{90}\text{Sr}$  sa i bez prisustva  $^{89}\text{Sr}$  da bi se proverila fleksibilnost metode u pogledu njene upotrebljivosti u normalnim i vanrednim situacijama.

**Tabela 4. Rezultati simultanog određivanja  $^{89,90}\text{Sr}$  u interkomparacijskom uzorku Analytics CC razrijeđenom s 1 L deionizirane vode i vode za piće.**

Analytics CC	$A(^{89}\text{Sr})$ (Bq L <sup>-1</sup> )	MDA (Bq L <sup>-1</sup> )	Bias (%)	$A(^{90}\text{Sr})$ (Bq L <sup>-1</sup> )	MDA (Bq L <sup>-1</sup> )	Bias (%)	t(h) posle separacije
DI voda	<b>293</b>	0,514	-0,5	<b>33</b>	1,12	-0,6	20
Voda zapiće	<b>311</b>	0,503	5,6	<b>31,6</b>	1,13	-4,8	31
Tačna vrednost	<b>294,52</b>			<b>33,19</b>			

Dobijeni rezultati pokazuju da je moguće odrediti širok spektar aktivnosti sa zadovoljavajućom tačnošću i pouzdanošću, jer metoda omogućava obradu velikih količina uzoraka s jedne strane, i različitog vremena brojanja na drugoj strani. Koristeći ovaj pristup, moguće je postići ciljnu granicu detekcije bez značajnog gubitka vremena. Rezultati pokazuju (tabela 5) da je moguće odrediti aktivnost  $^{90}\text{Sr}$  niže od 30 mBq L<sup>-1</sup> [5] u roku od 36 sati kada  $^{89}\text{Sr}$  nije prisutan, tj. u normalnim okolnostima. Međutim, granica detekcije određenog izotopa, ako su oba prisutna, zavisi od odnosa



izotopnih aktivnosti. U vanrednoj situaciji kada se oćekuje prisustvo  $^{89}\text{Sr}$  u uzorku, mora se uzeti u obzir kao Ńto je opisano na drugom mestu [2,3].

**Tabela 5. Određivanje niskih aktivnosti  $^{90}\text{Sr}$  u vodi za piće u ovisnosti o vremenu proteklom od separacije itrijuma.**

$t$ (h)	Udio $^{90}\text{Y}$ u ravnoteži	$A(^{90}\text{Sr})$ (Bq L $^{-1}$ )	MDA (Bq L $^{-1}$ )	Odstupanje (%)
8,5	0,0879	0,3516	0,1090	15,7
16	0,1590	0,2960	0,0602	-2,6
24	0,2288	0,3168	0,0419	4,2
35	0,3153	0,2975	0,0304	-2,1
47	0,3987	0,3017	0,0240	-0,8
66	0,5105	0,3116	0,0188	2,5

#### 4. Zaključak

Temelj metodologije je mogućnost kontrole kvantitativno uhvaćenog stroncijuma na koloni Superlig 620 kroz proboj kolone i brojanje Čerenkova. Postupak omogućava kvantitativnu izolaciju stroncijuma (100% iskorišćenje) iz velike kolićine acidifikovanog uzorka vode (0,5M HNO $_3$ ) u kratkom vremenu sa brzinom protoka do 10 mL min $^{-1}$  bez znaćajnih promena u probijanju kolone za datu dimenziju, iako obim prodora obrnuto zavisi od koncentracije stroncijuma i matriksa. Optimalna koncentracija stabilnog stroncijuma je ispod 1 mg L $^{-1}$ . Čerenokovljeva efikasnost brojanja  $^{89}\text{Sr}$  i  $^{90}\text{Y}$  je dovoljno visoka za određivanje aktivnosti niskog nivoa, a kolona se ponaša kao senzor.

#### 5. Literatura

- [1] N. Vajda N, C. K Kim. Determination of radiostrontium isotopes: A review of analytical methodology. *Appl. Radiat. Isot.* 68, 2010, 2306–2326.
- [2] K. Gunther, S. Lange, M. Veit. A rapid method for determining  $^{89}\text{Sr}$  and  $^{90}\text{Sr}$  by Čerenkov counting. *Appl. Radiat. Isot.* 67, 2009, 781-786.
- [3] Ź. Grahek, G. Karanović, M. Nodilo. Rapid determination of  $^{89,90}\text{Sr}$  in wide range of activity concentration by combination of yttrium, strontium separation and Čerenkov counting. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 292, 2012, 555-569.
- [4] I. Coħa, S. Neufuss, Ź. Grahek, M. Nĕmec, M. Nodilo, J. John. The effect of counting conditions on pure beta emitter determination by Čerenkov counting. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 310 (2), 2016.
- [5] O.B. Egorov, M.J. O’Hara, J.W. Grate. Equilibration-Based Preconcentrating Minicolumn Sensors for Trace Level Monitoring of Radionuclides and Metal Ions in Water without Consumable Reagents. *Anal. Chem.* 78, 2006, 5480-5490.
- [6] I. Milanović, Ź. Grahek. Semi-automated procedure for the determination of  $^{89,90}\text{Sr}$  in environmental samples by Čerenkov counting. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 303 (2), 2015, 1453-1457.

## CHERENKOV EFFECT IN DETERMINATION OF $^{89,90}\text{Sr}$

Ivana COHA, Gorana KARANOVIC and Željko GRAHEK

*Division for marine and environmental research, Ruđer Bošković Institute, Zagreb, Croatia, [ivana.coha@irb.hr](mailto:ivana.coha@irb.hr), [gorana.karanovic@irb.hr](mailto:gorana.karanovic@irb.hr), [zgrahek@irb.hr](mailto:zgrahek@irb.hr)*

### ABSTRACT

Strontium radioisotopes, especially  $^{90}\text{Sr}$ , attract attention for many decades by radiochemical laboratories worldwide. Since they are pure beta emitters, their separation from matrix is desirable but most of the time complex and time consuming. The most recent method developed in our laboratory is its isolation from large sample volumes on highly selective extraction chromatographic resins, and measurement directly on column. The procedure includes separation of strontium from matrix on SuperLig 620 column followed by *off line* on column detection via Cherenkov counting on commercially available instrument. Generally, the advantage of Cherenkov counting technique is simplicity of sample preparation. The sample is not diluted with any scintillation cocktail and therefore it remains unchanged and it can be recovered for further analysis. The corner stone of the presented methodology is a possibility to control quantitatively captured strontium on SuperLig 620 column through column breakthrough and on-column Cherenkov counting. The procedure enables quantitative strontium isolation (100% recovery) from large volume of acidified water sample (0.5M  $\text{HNO}_3$ ) in short time with flow rate up to  $10 \text{ mL min}^{-1}$  without significant changes of column breakthrough for a given dimension, although breakthrough volume inversely depends on strontium and matrix constituents' concentration. The optimal strontium concentration is below  $1 \text{ mg mL}^{-1}$ . The Cherenkov counting efficiency of  $^{89}\text{Sr}$  and  $^{90}\text{Y}$  captured on the column is high enough for determination of low level activity where column behaves as a sensor column.

## COMBINATION OF AN AUTOMATED ISOLATION METHOD AND GAMMA SPECTROMETRY FOR DETERMINATION OF $^{55}\text{Fe}$ IN COMPLEX SAMPLES

Katja MAGDIĆ KOŠIČEK<sup>1</sup>, Ivana TUCAKOVIĆ<sup>1</sup>, Benjamin ZORKO<sup>2</sup>,  
Branko VODENIK<sup>2</sup>, Marijan NEČEMAR<sup>2</sup> and Ljudmila BENEDIK<sup>2</sup>

1) Ruđer Bošković Institute, Zagreb, Croatia,  
[ivana.tucakovic@irb.hr](mailto:ivana.tucakovic@irb.hr), [kmagdic@irb.hr](mailto:kmagdic@irb.hr)

2) Jožef Stefan Institute, Ljubljana, Slovenia, [benjamin.zorko@ijs.si](mailto:benjamin.zorko@ijs.si),  
[branko.vodenik@ijs.si](mailto:branko.vodenik@ijs.si), [marijan.necemar@ijs.si](mailto:marijan.necemar@ijs.si), [ljudmila.benedik@ijs.si](mailto:ljudmila.benedik@ijs.si)

### ABSTRACT

$^{55}\text{Fe}$  is generated by neutron activation of stable  $^{54}\text{Fe}$  and is present in materials exposed to neutrons. Therefore it can be found in all decommissioning materials from nuclear power plants. It decays by electron capture, emitting x-ray of 5.9 keV (24.5% probability). When determining the  $^{55}\text{Fe}$ , the attenuation problem is far more pronounced in the view of low energy x-rays. Therefore, for the determination of  $^{55}\text{Fe}$ , a chemical isolation from the sample is desirable, as well as due to the presence of  $^{58}\text{Co}$  and  $^{54}\text{Mn}$  isotopes which emit x-rays in that range (5.4 keV  $^{54}\text{Mn}$  and 6.4 keV  $^{58}\text{Co}$ ), so they can interfere with the line of  $^{55}\text{Fe}$ . In determining the  $^{55}\text{Fe}$  due to attenuation, the problem also comes from a higher amount of stable iron which the sample may contain as well as due to sample color that cannot be removed when determined on the liquid scintillation counter. As modern high purity germanium (HPGe) detectors allow the determination of gamma emitters in a wide range of energies (3keV – 3 MeV) the main aim of this work was to develop the rapid and simple method for the determination of  $^{55}\text{Fe}$  in different kind of materials. In this context it will be shown how  $^{55}\text{Fe}$  can be determined on the HPGe detector, with chemical isolation of  $^{55}\text{Fe}$  from the sample. The optimization of the sample preparation by the precipitation and by the electrodeposition procedures for the HPGe counting will be discussed, in sense of achieving precise results of  $^{55}\text{Fe}$  activities as well as low detection limits.

### 1. Introduction

$^{55}\text{Fe}$  is present in the materials from nuclear power plants since it is generated by neutron activation of stable Fe. If ingested (weather by inhalation, ingestion or skin contact), even 80% of  $^{55}\text{Fe}$  goes into the liver, 1.3% into the spleen and the rest distributes in other organs and tissues, having a hazardous influence on human health. Therefore, it is important to monitor the  $^{55}\text{Fe}$  quantity and to have easy and quick but, above all, accurate and precise method for its determination.  $^{55}\text{Fe}$  (half life,  $t_{1/2} = 2.7$  y) is produced in nuclear power plants by neutron ( $n, \gamma$ ) activation of  $^{54}\text{Fe}$  and ( $n, 2n$ ) activation of  $^{56}\text{Fe}$ .  $^{55}\text{Fe}$  emits x-rays (5.9 keV) during the decay by electron capture (EC). From the analytical point of view,  $^{55}\text{Fe}$  belongs to radionuclides which are difficult to measure [1]. A couple of measuring methods for analytical determination of  $^{55}\text{Fe}$  have already been reported and compared in the literature, such as liquid

scintillation counting (LSC) and  $\gamma$ -ray spectrometry [2,3]. Due to low energy, EC decay and only trace amounts of  $^{55}\text{Fe}$  present in the samples, analytical procedure for preparation of source samples in both cases is complex. The procedure usually consists from several steps including decomposition of sample material, separation of iron from matrix elements and other radionuclides, and final preparation of  $^{55}\text{Fe}$  sample in either liquid or solid form, convenient for LSC and  $\gamma$ -ray spectrometry using high purity germanium (HPGe) detectors, respectively [4,5]. In the case of LSC, prior determination, isolation of pure iron from the sample is essential. Most of the samples may contain higher amounts of iron, so chemical and color quenching effects are important since they can significantly decrease detection efficiency. Therefore, within this study, especially for samples with higher amounts of iron, the methods for  $^{55}\text{Fe}$  determination by  $\gamma$ -ray spectrometry are investigated. In this case, chemical isolation from the sample is also desirable to decrease attenuation effect and if present, to remove  $^{58}\text{Co}$  and  $^{54}\text{Mn}$  which emit x-rays in the same range (5.4 keV for  $^{54}\text{Mn}$  and 6.4 keV for  $^{58}\text{Co}$ ). Reports on determination of  $^{55}\text{Fe}$  in real samples by  $\gamma$ -ray spectrometry are quite rare, probably due to a very demanding step of sample preparation in the form of thin and homogeneous film. Such types of films have to be formed in order to lower down the self-attenuation effect and to have well defined geometry for the efficiency determination. It is really a challenging task to obtain thin and homogeneous films from real samples, especially considering the fact that besides  $^{55}\text{Fe}$ , significant amount of iron and other interfering elements could be present in the studied samples. Therefore, the objective of this work is oriented towards adaptation and optimization of source sample preparation method for measurement of  $^{55}\text{Fe}$  in real solid materials, such as concrete, using  $\gamma$ -ray spectrometry. Next steps in the study will include the development of the automated method for the Fe separation, in similar way as it is done for the  $^{89,90}\text{Sr}$  determination [6] in order to make the total procedure faster and less laborious.

Additionally to the already proposed method of solid source sample preparation in the form of iron precipitate on cellulose filters [7], this work investigates the possibility of the sample preparation by electrodeposition of thin iron films on different supports and compares these two methods. It is generally expected that both of here described methods for preparation of thin film sources can be applied for accurate and fast detection of potential contamination of environment with  $^{55}\text{Fe}$ . This will be most important for scientists dealing with monitoring around the area of nuclear power plants (NPP), as well as around the repository of radioactive waste. Besides, these methods could also be used for activity determination of  $^{55}\text{Fe}$  in the samples of waste waters from NPPs.

## 2. Materials and methods

The two methods for  $^{55}\text{Fe}$  sample preparation in the form of thin films for the  $\gamma$ -ray spectrometry measurements are used and compared. The first method is based on precipitation and preconcentration with ammonium pyrrolidinedithiocarbamate (APDC) [7] where, after chemical pre-treatment process, obtained complex compounds with APDC are filtered and, after drying, the filter is mounted on a support to be measured. The other method is electrodeposition, in which the metals contained in dissolved sample are deposited on the cathode (support) by passing an electric current [8] and the source is measured on the support.

Prior to either precipitation or the electrodeposition process, the real solid sample has to be degraded. To speed up the process of sample degradation, the use of lithium borates fusion is introduced, which significantly reduces the total time of analysis. The sample degradation process was performed and tested as follows. Concrete (home-made concrete) was first grained by wolfram carbide agitator. This way obtained concrete powder was then decomposed by lithium borate fusion. Concrete sample (from 0.2 g to 0.5 g), lithium borate (up to 2 g) and tracer ( $^{55}\text{Fe}$ ,  $A \cong 100 \text{ Bq}$ ) were weighted in a platinum crucible. For thermal fusion a Claise LeNEO furnace in combination with a platinum crucible and a Teflon baker was used. Before the crucible with sample was transferred into the Claise LeNeo furnace, it was dried for a few minutes. After the fusion, sample was melted in nitric acid ( $\text{HNO}_3:\text{H}_2\text{O} = 1:1$ ), then centrifuged and filtered to remove precipitated silicates.

To verify both methods for the thin sample preparation (preconcentration with APDC and electrodeposition) the test samples were prepared using the  $^{55}\text{Fe}$  standard solution and measured by means of  $\gamma$ -ray spectrometry.

### ***Preconcentration with APDC***

Into the weighted desired amount of  $^{55}\text{Fe}$  standard solution ( $A = 812 \text{ Bq g}^{-1}$ ), 200 ml of distilled water was added. pH was then adjusted to 4 by adding HCl (1:1) or  $\text{NH}_4\text{OH}$  (1:1). Afterwards, 0.01 g of APDC, dissolved in approximately 2 ml of distilled water, was added to the sample. For the complexation of APDC with Fe to occur, a certain amount of carrier,  $\text{Fe}^{3+}$ , had to be added (its quantity depended on the quantity of iron already present in the sample). The solution was then stirred for 30 minutes and then filtered through Sartorius cellulose nitrate filter (13 mm,  $0.45 \mu\text{m}$ ) using the Millipore filtration system. The filter was then dried, covered with foil and put to the HPGe detector for counting and  $\gamma$ -ray spectrometric analysis.

### ***Electrodeposition***

Stainless steel discs of 19.1 mm radius were used as cathodes. Prior to electrodeposition, electrodes were washed with acetone and ethanol to remove the impurities. Afterwards, they were placed in homemade electrochemical cell. Platinum wire was used as anode and 5.7% solution of ammonium oxalate was used as electrolyte.

The desired amount of standard solution of  $^{55}\text{Fe}$  ( $A = 812 \text{ Bq g}^{-1}$ ) was weighted and added into the electrochemical cell already containing 10 ml of electrolyte solution and approximately 0.5 ml HCl ( $c = 6 \text{ mol dm}^{-3}$ ). Time of electrodeposition was 1 hour ( $t_{\text{dep}} = 1 \text{ h}$ ) and the applied current was 0.6 A. In the end of electrodeposition, a few drops of ammonium hydroxide were added into the electrolyte solution thus providing the fixation of deposited  $^{55}\text{Fe}$ . When electrodeposition was done, stainless steel electrode was washed with distilled water and ethanol already containing a few drops of ammonium hydroxide and then shortly dried. The deposited  $^{55}\text{Fe}$  was covered with foil and placed to the HPGe detector for  $\gamma$ -ray spectrometric analysis.

### ***Gamma-spectrometric analysis***

The samples prepared in the form of thin films were placed into the plastic foil in order to avoid contamination. P-type coaxial detector with 70% relative efficiency, beryllium window and energy range of 4 – 2800 keV placed in the lead shielding is used for the measurements. The spectra collection time for the prepared samples was 60 000 seconds

or more, while the measurement of the point-like standard sample of  $^{55}\text{Fe}$  was counted for about 4000 s. All the measurements were performed at the same distance from the sample to the detector. Since all the samples were measured at a constant distance, it is assumed that the counting efficiency was independent of the sample radio. Also, the attenuation was not taken into account. Therefore, sample activities are calculated by comparing the sample count rate with the counting speed of the point-like standard.

### 3. Results and discussion

The preliminary results of the gamma spectrometric measurements of the test samples prepared by both methods using the  $^{55}\text{Fe}$  standard solution are satisfactory. The samples prepared with preconcentration using APDC showed somewhat lower values in respect to the reference one (about 10%, mostly up to 20%). On the other hand, the results obtained for the samples prepared by electrodeposition are in even better accordance with the reference values (differences up to 10%). These results point out that both methods can be used for the  $^{55}\text{Fe}$  determination by  $\gamma$ -ray spectrometry. However, since the real samples contain lower  $^{55}\text{Fe}$  activities and higher amounts of iron and other interfering elements, further tests should be conducted on a real samples to explore the accuracy and detection limits of the methods. The differences in respect to the reference values obtained for the test samples are most likely coming from the difficulties in very specific thin sample preparation procedure, which might introduce the loss of the fraction of material during the procedure (preparation yield), as well as from the efficiency determination assumptions. Namely, since in the case of  $^{55}\text{Fe}$  we are dealing with the very low energy, even the slight differences in the geometry of the sample of the resulting geometries could affect the efficiency and thus the calculated activities.

### 4. Conclusions

The tests of the two methods for the thin sample preparation for the  $^{55}\text{Fe}$  determination by using  $\gamma$ -ray spectrometry measurements are presented. Both preconcentration method with APDC and electrodeposition showed very good accordance with the reference values (up to 20% lower values for APDC and up to 10% differences for electrodeposition). These results show that with preparation of thin homogeneous films, especially by electrodeposition,  $\gamma$ -ray spectrometry can be used in more precise way for  $^{55}\text{Fe}$  determination in respect to the more spread LSC method where the problems in determination occur since color quenching plays a significant role. Further investigation of the method procedure for the real samples and with the real activity values will be performed in the future studies as well. The development of the automated method for the Fe separation will also be studied, in order to make the total procedure faster and less laborious. The special attention will be paid to more precise efficiency determination for the  $\gamma$ -ray spectrometric measurements. This issue might play an important role in  $^{55}\text{Fe}$  determination because of the low energy of the emitted ray. The results of this work point out that the differences in sample geometries such as film layer thickness, radius and distance from the detector might have an important influence on detection efficiencies and, consequently, in  $^{55}\text{Fe}$  activity determination.



### 5. References

- [1] X.L. Hou. Radiochemical analysis of radionuclides difficult to measure for waste characterization in decommissioning of nuclear facilities. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 273, 2007, 43-48.
- [2] L. Mikelić, V. Oreščanin, S. Lulić. Determination of  $^{55}\text{Fe}$  in waste waters of the Krsko nuclear power plant measured simultaneously by liquid scintillation spectrometer (LSC) and X-ray spectrometer (XRS). *Nucl. Instr. Methods Phys. Res. B.* 263, 2007, 95-98.8
- [3] M.H.T. Taddei, J.F. Macacini, R. Vicente, J.T. Marumo, S.K. Sakata, L.A.A. Terremoto. A comparative study using liquid scintillation counting and X-ray spectrometry to determine sup( $^{55}\text{Fe}$ ) in radioactive wastes. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 295, 2013, 2267-2272.
- [4] Ž. Grahek, M. Rožmarić-Mačefat. Isolation of iron and strontium from liquid samples and determination of  $^{55}\text{Fe}$  and  $^{89,90}\text{Sr}$  in liquid radioactive waste. *Anal. Chim. Acta*, 511, 2004, 339-348.
- [5] P.E. Warwick, I.W. Croudace. Isolation and quantification of  $^{55}\text{Fe}$  and  $^{63}\text{Ni}$  in reactor effluents using extraction chromatography and liquid scintillation analysis. *Anal. Chim. Acta*, 567, 2006, 277-285.
- [6] I. Milanović, Ž. Grahek. Semi-automated procedure for the determination of  $^{89,90}\text{Sr}$  in environmental samples by Cherenkov counting. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 303, 2015, 1453-1457.
- [7] M. Nemečer, P. Kump. Application of ammonium pyrrolidinedithiocarbamate precipitation and X-ray spectrometry in the analysis of  $^{55}\text{Fe}$  in nuclear liquid wastes. *Spectrochim. Acta Part B* 54, 1999, 621-625.
- [8] M. Deelo, K. Weil, K. Ossero-Asare. Electrodeposition of iron in aqueous ferrous sulfate solution. *ECS Transactions* 2, 2006, 293-392.



## KOMBINACIJA METODE AUTOMATSKE IZOLACIJE I GAMA SPEKTROMETRIJE ZA ODREĐIVANJE $^{55}\text{Fe}$ U KOMPLEKSNIM UZORCIMA

**Katja MAGDIĆ KOŠIČEK<sup>1</sup>, Ivana TUCAKOVIĆ<sup>1</sup>, Benjamin ZORKO<sup>2</sup>, Branko VODENIK<sup>2</sup>, Marijan NEČEMAR<sup>2</sup> i Ljudmila BENEDIK<sup>2</sup>**

1) *Institut Ruđer Bošković, Zagreb, Hrvatska, [ivana.tucakovic@irb.hr](mailto:ivana.tucakovic@irb.hr), [kmagdic@irb.hr](mailto:kmagdic@irb.hr)*

2) *Institut Jožef Stefan, Ljubljana, Slovenija, [benjamin.zorko@ijs.si](mailto:benjamin.zorko@ijs.si),*

*[branko.vodenik@ijs.si](mailto:branko.vodenik@ijs.si), [marijan.necemar@ijs.si](mailto:marijan.necemar@ijs.si), [ljudmila.benedik@ijs.si](mailto:ljudmila.benedik@ijs.si)*

### APSTRAKT

$^{55}\text{Fe}$  se generira neutronsom aktivacijom stabilnog  $^{54}\text{Fe}$  i prisutan je u materijalima izloženim neutronima. Zbog toga se može naći u dekomisijskim materijalima iz nuklearnih elektrana. Raspada se elektronskim uхватom, te emitira x-zraku od 5,9 keV (verovatnoća 24,5%). Pri određivanju  $^{55}\text{Fe}$ , zbog emitirane niskoenergetske x-zrake izražen je problem atenuacije. Zbog toga je za određivanje  $^{55}\text{Fe}$  poželjna njegova hemijska izolacija iz uzorka, kao i zbog prisustva izotopa  $^{58}\text{Co}$  i  $^{54}\text{Mn}$  koji također emituju x-zrake u tom rasponu energija (5,4 keV  $^{54}\text{Mn}$  i 6,4 keV  $^{58}\text{Co}$ ), tako da mogu da interferiraju sa linijom  $^{55}\text{Fe}$ . Pri određivanju  $^{55}\text{Fe}$  na tečnom scintilacionom detektoru, javlja se također i problem zbog veće količine stabilnog gvožđa koje uzorak može da sadrži kao i zbog boje uzorka koja ne može da se ukloni. Kako savremeni HPGe detektori omogućavaju određivanje gama emitera u širokom rasponu energija (3keV – 3 MeV), glavni cilj ovog rada bio je razviti brzu i jednostavnu metodu za određivanje  $^{55}\text{Fe}$  u različitim vrstama materijala. U ovom kontekstu biće prikazano kako se  $^{55}\text{Fe}$  može odrediti na HPGe detektoru, uz prethodnu hemijsku izolaciju  $^{55}\text{Fe}$  iz uzorka. Biće diskutovana optimizacija pripreme uzoraka taloženjem i elektrodepozicijom za brojanje na HPGe detektoru, u smislu postizanja preciznih rezultata aktivnosti  $^{55}\text{Fe}$  kao i niskih granica detekcije.

## EFIKASNOST DETEKCIJE DVOSTRUKIH KOINCIDENCIJA INTENZIVNIH GAMA ZRAKA IZ RASPADA Ba-133 SISTEMOM SA DVA I TRI NaI(Tl) DETEKTORA

**Nikola SVRKOTA<sup>1</sup>, Sergej K. ANDRUHOVIČ<sup>2</sup> i Nevenka M. ANTOVIĆ<sup>3</sup>**

1) Centar za ekotoksikološka ispitivanja, Podgorica, Crna Gora,  
[nikola.svrkota@ceti.co.me](mailto:nikola.svrkota@ceti.co.me)

2) Akademija nauka Bjelorusije, Institut za fiziku, Minsk, Bjelorusija,  
[andru@ifanbel.bas-net.by](mailto:andru@ifanbel.bas-net.by)

3) Univerzitet Crne Gore, Prirodno-matematički fakultet, Podgorica, Crna Gora,  
[antovicn@yahoo.com](mailto:antovicn@yahoo.com)

### SADRŽAJ

*Najintenzivniji gama zrak koji se javlja nakon dezintegracije <sup>133</sup>Ba putem elektronskog zahvata ima energiju 356 keV. Ovdje razmatramo efikasnost njegove registracije u fotopiku u spektrima dvostrukih koincidencija, kao i zavisnost te efikasnosti od broja detektora koji su uključeni u koincidentnu šemu. Korišćeni su NaI(Tl) detektori iz višedetektorskog spektrometra PRIPJAT-2M (kristali dimenzija 15 cm x 10 cm), a spektri dvostrukih koincidencija dobijeni su tokom 1800 s realnog vremena pomoću dva detektora pod uglom ~90°, i pomoću tri detektora od kojih su dva pod uglom ~180°. Povećanje broja parova detektora koji registruju dvostruke koincidencije sa jedan na tri povećalo je fotoefikasnost individualnih detektora do 16 puta.*

### 1. Uvod

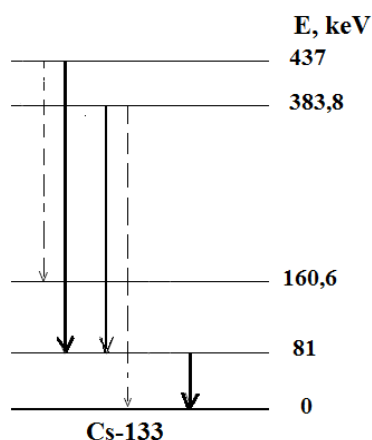
Vještački radionuklid <sup>133</sup>Ba, čiji je period poluraspada oko 10,5 godina [1], proizvodi se neutronskom aktivacijom <sup>132</sup>Ba ili u nuklearnim reakcijama protona i <sup>133</sup>Cs. Elektronskim zahvatom se transformiše u <sup>133</sup>Cs, pri čijoj deekscitaciji dolazi do emisije gama zraka različitih energija (tabela 1).

**Tabela 1. Intenzivni gama zraci (>5%) koji se emituju pri deekscitaciji <sup>133</sup>Cs [1].**

<b>E<sub>γ</sub>, keV</b>	<b>I<sub>γ</sub>, %</b>
81	33,31
276,4	7,13
302,8	18,31
356	62,05
383,8	8,94

Iz šeme raspada (slika 1, na osnovu podataka iz literature [1]) slijedi da je najintenzivnija dvostruka kaskada ona koju čine zrak energije 356 keV (prelaz sa pobuđenog nivoa

energije oko 437 keV do pobuđenog nivoa energije 81 keV) i zrak energije 81 keV (prelaz sa pobuđenog nivoa energije oko 81 keV do osnovnog stanja  $^{133}\text{Cs}$ ).



Slika 1. Deekscitacija  $^{133}\text{Cs}$ .

Mjerenja  $\gamma$ - $\gamma$  koincidencija iz raspada  $^{133}\text{Ba}$  nijesu novina. Decenijama unazad takva mjerenja su korišćena za definisanje šeme raspada  $^{133}\text{Ba}$ , kao i energija zraka koji se emituju pri raspadu [2, 3]. U ovom radu se razmatra efikasnost registracije u fotopiku zraka energije 356 keV, kao najintenzivnijeg, i to u spektrima dvostrukih koincidencija dobijenim pomoću NaI(Tl) detektora iz višedetektorskog sistema PRIPJAT-2M. Početna istraživanja [4] između ostalog su uključivala i efikasnost registracije zraka 356 keV pomoću dva detektora pod uglom  $\sim 180^\circ$ , a ovdje se data efikasnost u spektrima dvostrukih koincidencija razmatra i u trodetektorskom sistemu.

## 2. Eksperiment

Tri scintilaciona detektora NaI(Tl) iz višedetektorskog spektrometra PRIPJAT-2M [5] (kristali dimenzija 15 cm x 10 cm), u šemi prikazanoj na slici 2, korišćeni su za mjerenje kalibracionog izvora/rastvora  $^{133}\text{Ba}$  (Eckert&Ziegler, br. 1422-38-3; aktivnost 01. 03. 2010. godine: 55,54 kBq) čiji je izgled prikazan na slici 3. Komora je u obliku kocke stranice 17,5 cm, a izvor se postavlja na detektor  $D_3$ .

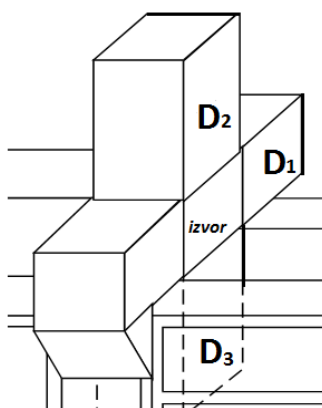
Elektronika tipa CAMAC i softver PRIP, korišćeni su za analizu dvostrukih koincidencija gama zraka iz raspada  $^{133}\text{Ba}$ . Prvo su u koincidentnu šemu uključeni detektori  $D_1$  i  $D_2$  (centralne ose pod uglom  $\sim 90^\circ$ ), a zatim i tri na slici 1 prikazana detektora ( $D_1$ ,  $D_2$  i  $D_3$ ), čime je povećan broj kombinacija detektora koji mogu registrovati dvostruku koincidenciju. Dostupni režimi rada dvodetektorskog sistema jesu: integralni (kada oba detektora registruju sve gama zrake – i koincidentne i nekoincidentne), nekoincidentni i režim dvostrukih koincidencija (istovremena registracija gama zraka, u granicama vremena rezolucije sistema – 40 ns). U slučaju tri detektora, uz navedene režime rada, moguće je snimiti i spektre trostrukih koincidencija. U ovom radu razmatraju se spektri dvostrukih koincidencija – sa detektora  $D_1$  i  $D_2$ , i sa detektora  $D_1$ ,  $D_2$  i  $D_3$ .

Spektri su snimani 1800 s realnog vremena (živo vrijeme: 803,6 s – u slučaju  $D_1$  i  $D_2$ , i 375,6 s – u slučaju  $D_1$ ,  $D_2$  i  $D_3$ ). Spektri fona, snimljeni tokom jednakog vremena, oduzeti su od spektara izvora  $^{133}\text{Ba}$  prije analize. Efikasnost registracije u fotopiku

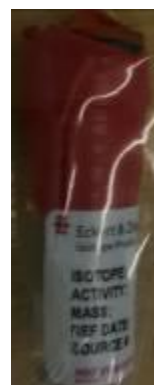
najintenzivnijeg (62,05%) gama zraka energije 356 keV određena je korišćenjem standardnog izraza:

$$\varepsilon = \frac{N}{IA}, \quad (1)$$

gdje je  $N$  – neto brzina brojanja,  $I$  – relativni intenzitet  $\gamma$ -zraka, a  $A$  – aktivnost  $^{133}\text{Ba}$  na dan mjerenja.



Slika 2. Šematski prikaz pozicije NaI(Tl) detektora.



Slika 3. Izgled kalibracionog izvora  $^{133}\text{Ba}$ .

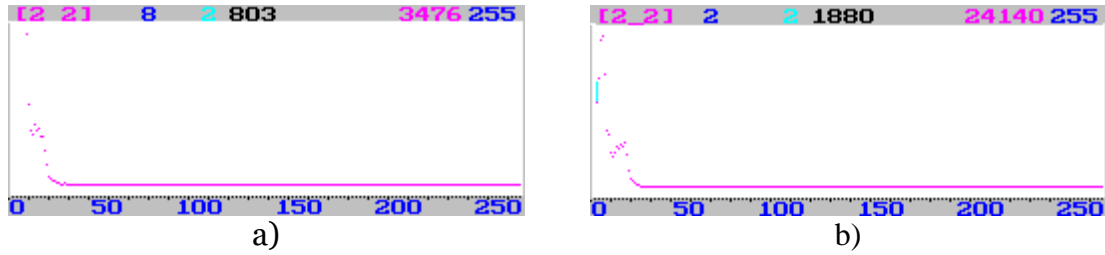
### 3. Rezultati i diskusija

Spektri dvostrukih koincidencija snimani su u energetsom opsegu od 200 keV do 3500 keV (od 2. do 255. kanala). Individualni spektar detektora  $D_2$  (u šemi sa  $D_1$  i u šemi sa  $D_1$  i  $D_3$ ) nakon oduzimanja fona prikazan je na slici 4. Nekoincidentni spektar sa istog detektora (slika 5) pokazuje znatno izraženiji pik u odnosu sa spektar dvostrukih koincidencija.

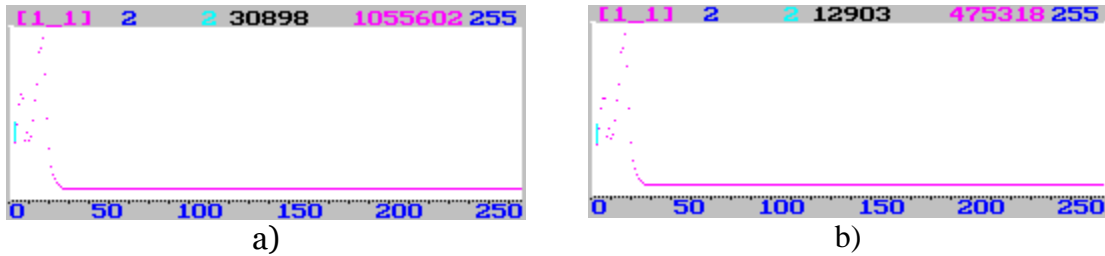
Efikasnost registracije gama zraka energije 356 keV u piku totalne apsorpcije (tabela 2) znatno je veća kada tri detektora ( $D_1$ ,  $D_2$  i  $D_3$ ) registruju dvostruke koincidencije, u odnosu na slučaj kada dvostruke koincidencije registruju dva detektora pod uglom  $90^\circ$  ( $D_1$  i  $D_2$ ). Tri različite kombinacije detektora ( $D_1$  i  $D_2$ ,  $D_1$  i  $D_3$ ,  $D_2$  i  $D_3$ ) povećavaju efikasnost registracije – oko 16 puta za  $D_1$  i oko 6,5 puta za  $D_2$ .

Prethodno istraživanje je pokazalo da detektori  $D_2$  i  $D_3$ , koji su jedan naspram drugom, za isto realno vrijeme mjerenja u integralnom i nekoincidentnom režimu (živo vrijeme – 449,4 s u integralnom i 454,6 s u nekoincidentnom režimu) zrak energije 356 keV registruju u fotopiku sa efikasnošću 0,0528 i 0,2198 (integralni režim), i 0,0512 i 0,2174 (nekoincidentni režim), uz znatno veću fotoefikasnost i u sumarnom spektru u energetsom opsegu od 200 keV do 2000 keV (0,265 – u integralnom i 0,261 – u nekoincidentnom režimu mjerenja) [4].

I odnosi brzina brojanja u spektrima izvora nakon oduzimanja odgovarajućeg fonskog spektra i u samim spektrima fona, kako pokazuju podaci dati u tabelama 3 i 4, ukazuju na prednosti korišćenja većeg broja detektora za registrovanje dvostrukih koincidencija.



Slika 4. Spektri dvostrukih koincidencija detektora  $D_2$ : u šemi sa  $D_1$  (a), u šemi sa  $D_1$  i  $D_3$  (b).



Slika 5. Nekoincidentni spektri detektora  $D_2$ : u šemi sa  $D_1$  (a), u šemi sa  $D_1$  i  $D_3$  (b).

Tabela 2. Efikasnost detekcije 356 keV u fotopiku u spektrima dvostrukih koincidencija.

Fotoefikasnost	Detektor $D_1$	Detektor $D_2$	Detektor $D_3$
$\varepsilon(D_1 \text{ i } D_2)$	0,00013	0,00017	/
$\varepsilon(D_1, D_2 \text{ i } D_3)$	0,0021	0,0011	0,0032

Tabela 3. Odnosi brzina brojanja u spektrima izvora i fona – dvostruke koincidencije.

Detektor	Odnos brzina brojanja u cijelom spektru: izvor/fon	Odnos brzina brojanja u fotopiku 356 keV: izvor/fon
$D_1$ u šemi sa $D_2$	14,9	14,6
$D_1$ u šemi sa $D_2$ i $D_3$	84,5	138
$D_2$ u šemi sa $D_1$	23,6	18,3
$D_2$ u šemi sa $D_1$ i $D_3$	65,9	79,2
$D_3$ u šemi sa $D_1$ i $D_2$	130	231

Treba napomenuti da je izvor (prečnik: 1,7 cm, visina posude: oko 6,2 cm, visina rastvora: oko 3 cm) postavljen u centar detekcione komore, na  $D_3$ . Navedene promjene u odnosima broja odbroja i naročito u efikasnostima registracije treba da budu predmet daljih istraživanja. Posebno, predmet daljih istraživanja treba da budu doprinosi drugih gama zraka fotopiku na energiji 356 keV, a konkretno gama zraka energija 302,8 keV i 383,8 keV, u različitim režimima rada, uzimajući u obzir energetska rezoluciju detektora i višedetektorskog sistema. U ovom radu podrazumijevano je da dati fotopik „pune” isključivo zraci energije 356 keV. Nadalje, znatno duže vrijeme mjerenja neophodno je ne samo zbog potrebe da fotopik u spektrima dvostrukih koincidencija

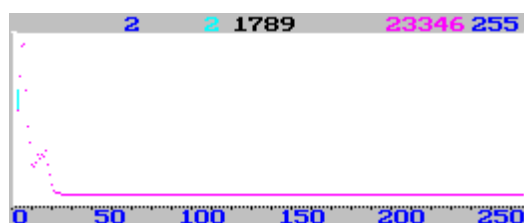
bude izraženiji, već i zbog testiranja mogućnosti razdvajanja fotopikova korišćenjem različitih režima rada višedetektorskog sistema.

Iz razmatranja deekscitacije  $^{133}\text{Cs}$  nakon raspada  $^{133}\text{Ba}$  [1] slijedi da se zrak energije 302,8 keV javlja u trostrukoj kaskadi: 53,2 keV (2,14%) + 302,8 keV (18,31%) + 81 keV (33,31%); dok je druga trostruka kaskada gama zraka intenziteta iznad 1%: 276,4 keV (7,13%) + 79,6 keV (2,63%) + 81 keV (33,31%). Preostalu trostruku kaskadu čine zrak 53,2 keV (2,14%) i dva zraka intenziteta ispod 1% (223,2 keV – 0,45% i 160,6 keV – 0,638%). Zrak energije 383,8 keV (8,94%) u dvostrukoj je kaskadi sa gama zrakom 53,2 keV (2,14%). Preostalu dvostruku kaskadu gama zraka do osnovnog stanja  $^{133}\text{Cs}$  čine zruci energija 276,4 keV (7,13%) i 160,6 keV (0,638%).

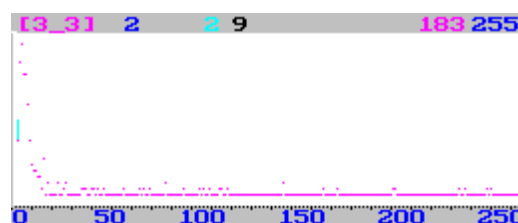
S ciljem razmatranja da li se pri promjeni režima mjerenja mijenjaju efikasnosti registracije 356 keV u fotopiku u spektrima dvostrukih koincidencija, dodatno su snimljeni spektri  $D_1$ ,  $D_2$  i  $D_3$  – istovremeno u režimu dvostrukih (2-2) i trostrukih koincidencija (3-3). Trostruke koincidencije za dato vrijeme mjerenja (1800 s realno i 375,1 s – živo vrijeme mjerenja) nijesu registrovane (tj. spektri su bez fotopikova), a rezultati analiza spektara dati su u tabeli 4. Spektri dvostrukih i trostrukih koincidencija sa detektora  $D_2$  prikazani su na slici 6.

Tabela 4. Režim dvostrukih i trostrukih koincidencija –  $D_1$ ,  $D_2$  i  $D_3$ .

	Detektor $D_1$	Detektor $D_2$	Detektor $D_3$
Fotoefikasnost, 356 keV, dvostruke koincidencije: (2-2)	0,0017	0,001	0,0032
Odnos brzina brojanja u cijelom spektru: izvor/fon, (2-2)	99,5	81,9	159
Odnos brzina brojanja u fotopiku: izvor/fon, (2-2)	180	89,5	265
Odnos brzina brojanja u cijelom spektru: izvor/fon, (3-3)	1,63	2,41	2,81



a)



b)

Slika 6. Spektri detektora  $D_2$ : dvostruke koincidencije (a), trostruke koincidencije (b).

Poređenje sa rezultatima iz tabele 2 pokazuje da je nešto veća fotoefikasnost detektora  $D_1$ , dok kod detektora  $D_2$  i  $D_3$  nema promjene. Na osnovu poređenja podataka iz tabela 3 i 4, uočavaju se i izvjesne promjene u odnosu brzina brojanja u spektru izvora nakon

oduzimanja fona i u samom spektru fona, što takođe treba da bude predmet daljih istraživanja.

#### 4. Zaključci

Početa razmatranja fotoefikasnosti registracije gama energije 356 keV iz raspada  $^{133}\text{Ba}$  u spektrima dvostrukih koincidencija dobijenih tokom 1800 s realnog vremena pomoću dva i tri NaI(Tl) detektora, pokazala su da povećanje broja kombinacija detektora sa jedan na tri – povećava fotoefikasnost individualnih detektora između 6 i 16 puta. Rezultati su pokazali i da detaljnije analize dvostrukih koincidencija zahtijevaju duže vrijeme snimanja spektara.

#### 5. Literatura

- [1] [http://www.nucleide.org/DDEP\\_WG/DDEPdata.htm](http://www.nucleide.org/DDEP_WG/DDEPdata.htm) (pristup: 05. 12. 2018).
- [2] B. Crasemann, J. G. Pengra, I. E. Lindstrom. Radiations from  $\text{Be}^{133}$ . *Phys. Rev.* 108/6, 1957, 1500-1505.
- [3] M. K. Ramaswamy, W. L. Skeel, P. S. Jastram. Decay of  $\text{Be}^{133}$ . *Nucl. Phys.* 16/4, 1960, 619-624.
- [4] N. M. Antović, N. Svrkota, Sergey K. Andrukhovich. Registration of gamma-gamma coincidences from Ba-133 decay. *Rad prezentovan na konferenciji RAD2019*, Herceg Novi, 10-14. jun 2019.
- [5] С. К. Андрухович, А. В. Берестов, В. И. Гутко, А. М. Хильманович. Высокочувствительные многодетекторные гамма спектрометры ПРИПЯТЬ. *Препринт Института физики АН БССР*, Минск, 1995.



**DETECTION EFFICIENCY OF DOUBLE COINCIDENCES OF  
THE INTENSE GAMMA RAYS FROM THE Ba-133 DECAY USING  
THE SYSTEM WITH TWO OR THREE NaI(Tl) DETECTORS**

**Nikola SVRKOTA<sup>1</sup>, Sergej K. ANDRUHOVIČ<sup>2</sup> and Nevenka M. ANTOVIĆ<sup>3</sup>**

1) *Centre for Ecotoxicological Research, Podgorica, Montenegro,*  
[nikola.svrkota@ceti.co.me](mailto:nikola.svrkota@ceti.co.me)

2) *Academy of Sciences of Belarus, Institute of Physics, Minsk, Belarus,*  
[andru@ifanbel.bas-net.by](mailto:andru@ifanbel.bas-net.by)

3) *University of Montenegro, Faculty of Natural Sciences and Mathematics,*  
*Podgorica, Montenegro, [antovicn@yahoo.com](mailto:antovicn@yahoo.com)*

**ABSTRACT**

The most intense gamma ray appearing after disintegration of <sup>133</sup>Ba by electron capture has an energy of 356 keV. Here we consider efficiency of its registration in the photopeak in spectra of double coincidences, as well as a dependence of the efficiency on number of detectors in coincidence scheme. The NaI(Tl) detectors from the multidetector spectrometer PRIPYAT-2M (crystals: 15 cm x 10 cm) were used, and the spectra of double coincidences were obtained over 1800 s real measurement time using two detectors at an angle of ~90°, but also using three detectors with two of them at an angle of ~180°. Increase in the number of detector pairs registering double coincidences from one to three, increased photoefficiency of individual detectors up to 16 times.

## PROCENA NESIGURNOSTI REZULTATA MERENJA USLED POSTUPKA UZORKOVANJA

**Ivana VUKANAC, Jelena KRNETA NIKOLIĆ, Gordana PANTELIC,  
Milica RAJAČIĆ, Marija JANKOVIĆ, Nataša SARAP,  
Dragana TODOROVIĆ i Mirjana RADENKOVIĆ**

*Univerzitet u Beogradu, Institut za nuklearne nauke "Vinča", Laboratorija za zaštitu od zračenja i zaštitu životne sredine, POB 522 11001 Beograd, Srbija, [vukanac@vinca.rs](mailto:vukanac@vinca.rs), [jnikolic@vinca.rs](mailto:jnikolic@vinca.rs), [pantelic@vinca.rs](mailto:pantelic@vinca.rs), [milica100@vinca.rs](mailto:milica100@vinca.rs), [marijam@vinca.rs](mailto:marijam@vinca.rs), [natasas@vinca.rs](mailto:natasas@vinca.rs), [beba@vinca.rs](mailto:beba@vinca.rs), [mirar@vinca.rs](mailto:mirar@vinca.rs)*

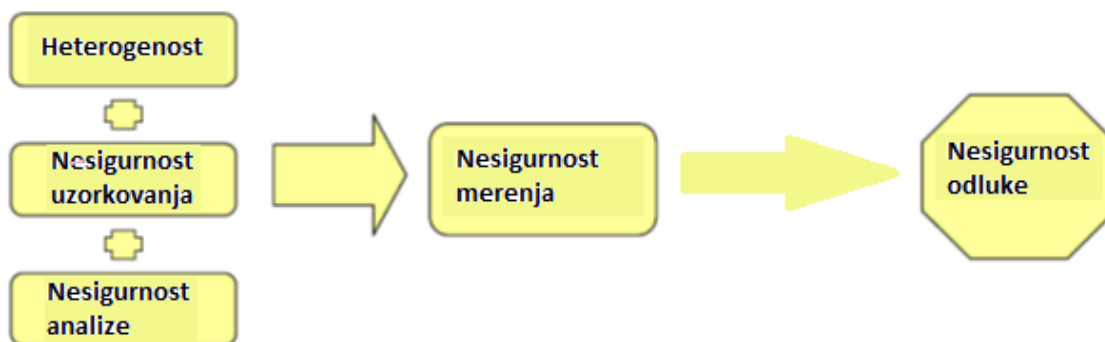
### SADRŽAJ

*Merna nesigurnost rezultata merenja predstavlja pokazatelj kvaliteta izvršenog merenja. U laboratorijama za ispitivanje najčešće se prikazuje kombinovana merna nesigurnost na nivou poverenja 95% ( $k=2$ ). U slučaju kada laboratorijskoj analizi prethodi postupak uzorkovanja, budžet nesigurnosti rezultata merenja treba (prema ISO17025:2017), da obuhvata i nesigurnost koja potiče usled postupka uzorkovanja. U ovom radu je opisan postupak procene nesigurnosti rezultata merenja usled uzorkovanja.*

### 1. Uvod

Rezultati merenja uvek se prikazuju sa pridruženom mernom nesigurnošću koja potiče od primenjene merne procedure. Međutim, zbog nemogućnosti merenja kompletne količine ispitivanog materijala, merenju u većini slučajeva prethodi postupak uzimanja uzorka. Uzorkovanje predstavlja deo analitičkog procesa kojim se izdvaja jedna ili više porcija iz materijala koji se ispituje. Nesigurnost usled postupka uzorkovanja mora biti uzeta u obzir pri obračunu ukupne nesigurnosti rezultata merenja dobijenih tokom ispitivanja usaglašenosti ispitivanog materijala sa važećom legislativom, kao i prilikom sprovođenja programa monitoringa ili kontrole životne sredine. U slučaju kada se karakterizacija uzorka odnosi na određivanje sadržaja radionuklida u ispitivanom materijalu, tipični koraci u procesu ispitivanja obuhvataju uzorkovanje – jednog ili više uzoraka/kompozitni uzorak, pripremu uzorka koja može da obuhvata sitnjenje, mlevenje, prosejavanje, sušenje, kao i hemijsku pripremu, i samo merenje sa analizom. Svaki od koraka doprinosi na neki način nesigurnosti krajnjeg rezultata merenja.

Uzorak koji stigne u laboratoriju dalje se tretira u skladu sa odabranom metodom koja će kao rezultat dati željenu karakteristiku ispitivanog materijala – npr. specifičnu aktivnost određenog radionuklida. Za ovu fazu mernog procesa u akreditovanim laboratorijama definisan je način proračuna merne nesigurnosti, i taj postupak treba da obuhvata doprinos od svake od faza merenja, uključujući i postupke pripreme uzoraka za merenje i samo merenje.



Slika 1. Izvori nesigurnost i lanac odlučivanja [1, 2].

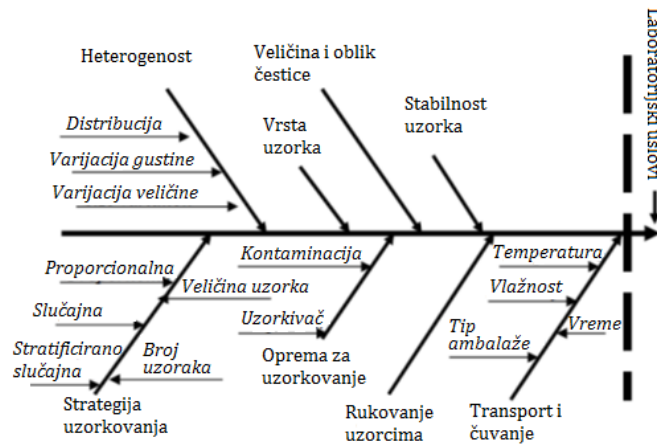
Po zahtevima standarda ISO 17025:2017 nesigurnost rezultata merenja treba na neki način da obuhvati i nesigurnosti koje potiču od postupka uzorkovanja kao i od heterogenosti ispitivanog materijala, a u cilju pouzdane odluke o usaglašenosti, kao što je prikazano na slici 1. Posredno, nesigurnost usled heterogenosti i postupka uzorkovanja govori o tome koliko je uzeti (i mereni) uzorak reprezentativan za celu količinu ispitivanog materijala. [3] Da bi se ovo postiglo potrebno je imati jasno definisane postupke uzorkovanja vodeći računa o cilju koji je merenjem potrebno postići. Takođe, u skladu sa svrhom merenja, unapred bi trebalo imati određene zahteve u vezi sa nesigurnošću rezultata merenja, odnosno definisati sa kojom sigurnošću odluka o usaglašenosti treba da bude donešena.

## 2. Merna nesigurnost / nesigurnost rezultata merenja

Merna nesigurnost je definisana kao parametar, pridružen rezultatu merenja, koji karakteriše disperziju/rasipanje vrednosti koje se razumno mogu pripisati merenoj veličini  $x$ . U slučaju merenja radioaktivnosti, ovaj parametar je najčešće polu interval koji se prikazuje uz rezultat kao  $\pm u$ , gde je  $u$  izračunata/procenjena nesigurnost rezultata merenja. To znači da se, sa određenom verovatnoćom, prava vrednost merene veličine nalazi u intervalu od  $x-u$  do  $x+u$ . U laboratorijskoj praksi se koriste i termini greške (odnosi na razliku između rezultata merenja i prave vrednosti merene veličine) i preciznost merenja (obuhvata slučajne efekte i odnosi se na ponovljivost dobijenih rezultata merenja).

Kao što se sa slike 1. vidi, heterogenost je među najznačajnijim faktorima koji utiču na nesigurnost usled uzorkovanja. Kako se u praksi ne zna prostorna raspodela sastava ispitivanog materijala, ne može se na bilo koji način uvesti korekcija na heterogenost, već se uticaj heterogenosti na nesigurnost mora uzeti u obzir pri svakom merenju, a greška usled heterogenosti karakteriše se kao fundamentalna. Heterogenost spada u sistematske efekte koje je u principu teško kvantifikovati, ali ih je moguće redukovati i to izborom adekvatne metode uzorkovanja i pripreme, uvećavanjem veličine/količine uzorka, mlevenjem čvrstih materijala, mešanjem, adekvatnim tretmanom uzetog uzorka pri transportu u laboratoriju.

Slučajni efekti mogu nastati usled varijacija u primeni metoda, ljudskog faktora, varijacijama u korišćenoj opremi za uzorkovanje. Lakše ih je kvantifikovati i svesti na minimum i to uvećavanjem broja uzetih uzoraka ili uvećavanjem broja uzoraka koji čine kompozitni ili zbirni uzorak. Na slici 2. dat je grafički prikaz mogućih izvora nesigurnosti u postupku uzorkovanja.



Slika 2. Dijagram mogućih izvora doprinosa nesigurnosti [1, 2].

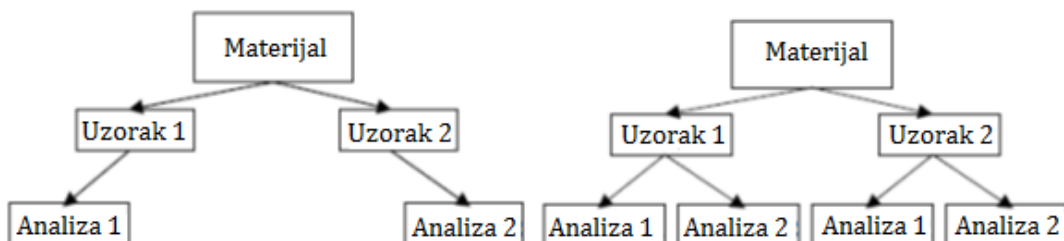
### 3. Procena merne nesigurnosti usled uzorkovanja

Uopšteno govoreći, postoje dva pristupa proceni nesigurnosti. Prvi je tzv. empirijski koji se u najvećoj meri zasniva na ponavljanju celokupne procedure i direktne procene nesigurnosti konačnog rezultata merenja. U drugom pristupu, tzv. teoretskom, kvantifikuju se svi izvori nesigurnosti ponaosob i primenom statističkog modelovanja vrši se procena ukupne merne nesigurnosti rezultata merenja. [1, 2]

U ovom radu fokusiraćemo se na empirijski pristup. Osnovni princip empirijske procene nesigurnosti usled uzorkovanja je da se postupak uzorkovanja ponovi dva ili više puta, što je najčešće (leva strana slike 3). Moguće je uzorke deliti i raditi više analiza (desna strana slike 3), kao i korišćenje više protokola uzorkovanja sa jednim ili sa više uzorkivača.

Procena nesigurnosti usled uzorkovanja radi se na osnovu toga da se ukupna nesigurnost rezultata merenja -  $s_m$  sastoji od nesigurnosti (standardne devijacije) usled uzorkovanja -  $s_{uz}$  i usled same analize -  $s_a$ , pri čemu je doprinos nesigurnosti usled pripreme uzorka, transporta, skladištenja i sl., obračunat u jednoj od njih.

$$s_m^2 = s_{uz}^2 + s_a^2 \quad (1)$$



Slika 3. Grafički prikaz principa empirijske procene nesigurnosti usled uzorkovanja

Potrebno je najmanje osam različitih ponavljanja da bi se dobila pouzdana procena (slučajne) nesigurnosti merenja [1, 2], a u principu što ih je više procena standardne devijacije je bolja. Za proračun standardne devijacije,  $s$ , ili relativne standardne

devijacije, *RSD*, uz pretpostavljenu normalnu distribuciju podataka, koristi se statistika opsega (*range statistics*).

U slučaju kada se uzorkuje dva uzorka ispitivanog materijala dobijaju se dva rezultata merenja,  $x_{i1}$  i  $x_{i2}$ . Odstupanje rezultata,  $D_i$ , relativno odstupanje,  $d_i$ , i srednja vrednost rezultata računaju se kao:

$$D_i = |x_{i1} - x_{i2}|, d_i = \frac{D_i}{\bar{x}_i}, \quad \bar{x}_i = \frac{x_{i1} + x_{i2}}{2}. \quad (2)$$

Srednje relativno odstupanje,  $\bar{d}$ , seta od  $n$  duplikata je tada  $\bar{d} = \frac{\sum d_i}{n}$ . U slučaju duplikata *RSD* merenja se računa pomoću statističke konstante 1,128 [1] kao:

$$RSD = \frac{\bar{d} \cdot 100}{1,128} \% , \quad (3)$$

dok se standardna devijacija rezultata merenja  $s_{x_0}$  za koncentraciju  $x_0$  procenjuje kao:

$$s_{x_0} = \frac{RSD \cdot x_0}{100}. \quad (4)$$

**Tabela 1. Primer upotrebe statistike relativnog opsega za proračun *RSD* za slučaj dva merenja za uzorak uzet sa deset tačaka.**

$x_{i1}$	$x_{i2}$	$D_i$	$\bar{x}_i$	$d_i$	
20	2	18	11	1,64	$\bar{d}=0,930$
223	157	66	190	0,35	$RSD=82,408$
312	150	162	231	0,70	$x_0=200$
816	432	384	624	0,62	$s_{x_0}=164,817$
55	125	70	90	0,78	
54	224	170	139	1,22	
442	325	117	383,5	0,31	
765	755	10	760	0,01	
32	516	484	274	1,77	
650	15	635	332,5	1,91	

Prethodna procena standardne devijacije može biti poboljšana daljom podelom uzoraka na više sub-uzoraka, ponavljanjem analiza, uvođenjem drugog izvršioca analize ili uzorkivača.

Tabela 2. Primer upotrebe statistike relativnog opsega za proračun RSD za slučaj dva merenja za uzorak uzet sa deset tačaka.

Uzorak 1				Uzorak 2							
$x_{i11}$	$x_{i12}$	$D_{i1}$	$\bar{x}_{i1}$	$x_{i21}$	$x_{i22}$	$D_{i2}$	$\bar{x}_{i2}$	$D_i =  \bar{x}_{i1} - \bar{x}_{i2} $			
402	325	77	363,5	361	351	10	356	7,5	Srednji opseg analize	$\bar{D}_a = \frac{\bar{D}_{i1} + \bar{D}_{i2}}{2}$	33,60
382	319	63	350,5	349	362	13	355,5	5,0	St, dev, analize	$s_a = \frac{\bar{D}_a}{1,128}$	29,79
332	291	41	311,5	397	348	49	372,5	61,0	Srednji opseg merenja	$\bar{D}$	32,10
280	278	2	279	358	321	37	339,5	60,5	St, dev, merenja	$s_m = \frac{\bar{D}}{1,128}$	28,46
370	409	39	389,5	378	460	82	419	29,5			
344	318	26	331	381	392	11	386,5	55,5			
297	333	36	315	341	315	26	328	13,0	St, dev, uzorkovanja	%	19,10
336	320	16	328	292	306	14	299	29,0			
372	353	19	362,5	332	337	5	334,5	28,0			
407	361	46	384	322	382	60	352	32,0			
402	325	77	363,5	361	351	10	356	7,5			

Kada se na ovaj način odredi nesigurnost rezultata merenja, na osnovu jednačine (1) nesigurnost usled uzorkovanja se računa kao:

$$s_{uz}^2 = s_m^2 - \left(\frac{s_a}{\sqrt{2}}\right)^2 \quad (5)$$

gde je nesigurnost analize podeljena sa korenom iz dva zbog toga što se kao rezultat uzima srednja vrednost dva merenja.

### **Analiza varijansi – ANOVA**

U prethodnom slučaju, dobijena vrednost nesigurnosti uzorkovanja je relativno velika. Dalja poboljšanja mogu se postići primenom metode analiza varijansi – ANOVA. Varijansa,  $V$ , definisana je kao kvadrat standardne devijacije:  $V = s^2$ . Vrednosti standardnih devijacija za uzorkovanje i analizu određuju se iz odgovarajućih varijansi,  $V_a$  i  $V_{uz}$ . U proračunima pretpostavka je da je jedna varijabla nezavisna a druga zavisna veličina. Takodje je pretpostavka da svaka grupa podataka ima normalnu distribuciju.  $V_a$  se određuje na osnovu odstupanja od srednje vrednosti. Ako se posmatra slučaj kao na desnoj strani slike 3, prvo se računa srednja vrednost rezultata dve analize svakog od uzoraka.

$$\bar{x}_{i1} = \frac{x_{i11} + x_{i12}}{2} \quad (6)$$

Ostupanje od srednje vrednosti za prvi uzorak je onda  $|x_{i11} - \bar{x}_{i1}| = |x_{i12} - \bar{x}_{i1}| = D_{i1(\bar{x})}$ . Kvadratna suma za oba uzorka je  $2 D_{i1(\bar{x})}^2$ . Suma kvadrata odstupanja unutar grupe rezultata,  $SS_{E-a}$  je tada  $SS_{E-a} = 2 \sum_{i=1}^{10} [D_{i1(\bar{x})}^2 + D_{i2(\bar{x})}^2]$ . Broj stepeni slobode  $df_a$ , se računa kao  $df_a = i j k - i j$ , gde su  $i$  broj ispitivanih materijala,  $j$  broj uzoraka uzet od svakog i  $k$  broj analiza.

Varijansa analize se tada računa kao  $V_a = \frac{SS_{E-a}}{df_a}$ , i konačno su standardna devijacija i RSD analize:

$$S_a = \sqrt{V_a} \quad (7)$$

i

$$RSD_a = \frac{S_a}{\bar{X}} 100 \% \quad (8)$$

gde je  $\bar{X}$  srednja vrednost svih rezultata.

Dalje, srednja vrednost merenja svakog uzorka se računa kao  $\bar{X}_i = \frac{\bar{x}_{i1} + \bar{x}_{i2}}{2}$ . Kvadrat odstupanja srednje vrednosti svih rezultata od srednjih vrednosti svakog uzorka:  $(D_{i(\bar{x})})^2 = (\bar{X}_i - \bar{x}_{i1})^2 = (\bar{X}_i - \bar{x}_{i2})^2$ , dok se suma kvadrata  $SS_{uz}$  računa kao:

$$SS_{uz} = \sum_{i=1}^{10} \left[ \left(\frac{x_{i11} + x_{i12}}{2} - \bar{X}_i\right)^2 + \left(\frac{x_{i11} + x_{i12}}{2} - \bar{X}_i\right)^2 + \left(\frac{x_{i21} + x_{i22}}{2} - \bar{X}_i\right)^2 + \left(\frac{x_{i21} + x_{i22}}{2} - \bar{X}_i\right)^2 \right] = \sum_{i=1}^{10} (2 D_{i(\bar{x})}^2 + 2 D_{i(\bar{x})}^2) = 4 \sum_{i=1}^{10} D_{i(\bar{x})}^2 \quad (9)$$

Broj stepeni slobode je  $df_{uz} = i j - i$ .



**Tabela 3. Primer ANOVA proračuna RSD analize za slučaj dva uzorka (S1 i S2) i dva merenja (A1 i A2).**

S1A1	S1A2	S2A1	S2A2	S1	S2	S1	S2				$\bar{X}_i =$	$(D_{i((\bar{x}))})^2$		
xi11	xi12	xi21	xi22	$\bar{x}_{i1}$	$\bar{x}_{i2}$	$2 D_{i1(\bar{x})}^2$	$2 D_{i2(\bar{x})}^2$				$\frac{\bar{x}_{i1} + \bar{x}_{i2}}{2}$	$= (\bar{X}_i - \bar{x}_{i1})^2$ $= (\bar{X}_i - \bar{x}_{i2})^2$		
402	325	361	351	363,5	356	2964,5	50,0	Sr. vred. svih rezultata	$\bar{X}$	347,85	359,75	14,0625	$\bar{X}$	347,85
382	319	349	362	350,5	355,5	1984,5	84,5		$SS_{E-a}$	16595	353	6,25	$SS_{uz}$	14231
332	291	397	348	311,5	372,5	840,5	1200,5		$df_a$	20	342	930,25	$Df_{uz}$	10
280	278	358	321	279	339,5	2	684,5	Var analize	$V_a$	829,75	309,25	915,0625	$V_{uz}$	296,68
370	409	378	460	389,5	419	760,5	3362,0	St. dev. analize	$S_a$	28,81	404,25	217,5625	$S_{uz}$	17,244
344	318	381	392	331	386,5	338	60,5		$RSD_a$	8,28 %	358,75	770,0625	<b><math>RSD_{uz}</math></b>	<b>4,95 %</b>
297	333	341	315	315	328	648	338,0				321,5	42,25		
336	320	292	306	328	299	128	98,0				313,5	210,25		
372	353	332	337	362,5	334,5	180,5	12,5				348,5	196		
407	361	322	382	384	352	1058	1800,0				368	256		

Varijansa uzorkovanja, odnosno standardna devijacija i relativna standardna devijacija uzorkovanja se računaju kao:

$$V_{uz} = \left( \frac{SS_{uz}}{df_{uz}} - \frac{SS_a}{df_a} \right) / 2 \quad (10)$$

$$S_{uz} = \sqrt{V_{uz}} \quad (11)$$

$$RSD_{uz} = \left( \frac{s_{uz}}{\bar{x}} \right) 100 \% \quad (12)$$

Ako je  $V_{uz} < 0$  za  $S_{uz}$  se uzima da je jednaka nuli.

#### 4. Zaključak

U prethodnom delu su opisani načini statističke obrade seta rezultata merenja u cilju procene nesigurnosti usled uzorkovanja, a prema preporukama datim u literaturi [1, 2]. ANOVA pristupom dobijaju se najniže vrednosti nesigurnosti. Međutim, nedostatak ovog pristupa je to što se pri obračunu ne uzimaju u obzir merne nesigurnosti svakog pojedinačnog merenja. U laboratorijama za ispitivanje mogu se razviti i drugi postupci procene nesigurnosti usled uzorkovanja, a u skladu sa raspoloživim resursima (mogućnost ciljanog uzorkovanja, dostupnosti podataka o ranijim merenjima na lokaciji uzorkovanja, raspoloživih softverskih paketa za statističku obradu podataka i sl.).

#### 5. Zahvalnica

Ovaj rad je realizovan u okviru projekta III43009 i OI171018 finansiranih od strane Ministarstva za prosvetu, nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije

#### 6. Reference

- [1] M. H. Ramsey, S. L. R. Ellison (eds.) Eurachem/EUROLAB/CITAC/Nordtest/AMC Guide: Measurement uncertainty arising from sampling: a guide to methods and approaches Eurachem, 2007. ISBN 978 0 948926 26 6. Available from the Eurachem secretariat.
- [2] C. Grøn, J.B. Hansen, B. Magnusson, A. Nordbotten, M. Krysell, K. Jebjerg Andersen, U. Lund. Uncertainty from sampling – a nordtest handbook for sampling planners on sampling quality assurance and uncertainty estimation. NT Technical Report TR 604 Approved 2007-06.
- [3] M. Thompson (ed.) What is uncertainty from sampling, and why is it important?, AMC Technical Briefs, ISSN 1757-5958. Background paper AMCTB 16A June 2004.

**ASSESSMENT OF MEASUREMENT UNCERTAINTY DUE TO SAMPLING**

**Ivana VUKANAC, Jelena KRNETA NIKOLIĆ, Gordana PANTELIC, Milica RAJAČIĆ, Marija JANKOVIĆ, Nataša SARAP, Dragana TODOROVIĆ and Mirjana RADENKOVIĆ**

*Belgrade University, Institute of Nuclear Sciences "Vinča", Department for Radiation and Environmental Protection, POB 522 11001 Belgrade, Serbia, [vukanac@vinca.rs](mailto:vukanac@vinca.rs), [jnikolic@vinca.rs](mailto:jnikolic@vinca.rs), [pantelic@vinca.rs](mailto:pantelic@vinca.rs), [milica100@vinca.rs](mailto:milica100@vinca.rs), [marijam@vinca.rs](mailto:marijam@vinca.rs), [natasas@vinca.rs](mailto:natasas@vinca.rs), [beba@vinca.rs](mailto:beba@vinca.rs), [mirar@vinca.rs](mailto:mirar@vinca.rs)*

**ABSTRACT**

The uncertainty of the measurement results is an indicator of the quality of the performed measurement. In the testing laboratories, the combined measurement uncertainty is usually given at the level of confidence of 95% ( $k = 2$ ). If the laboratory analysis is preceded by a sampling procedure, the uncertainty budget of the measurement results should (according to ISO17025: 2017) include the uncertainty arising from the sampling procedure. This paper describes the procedure for estimating the uncertainty of the results of measurement due to sampling.

## PROCENA MERNE NESIGURNOSTI PRI MERENJU AKTIVNOSTI RADIOFARMACEUTIKA U DOZE KALIBRATORU

**Drina JANKOVIĆ, Marija MIRKOVIĆ, Magdalena RADOVIĆ,  
Zorana MILANOVIĆ, Marko PERIĆ,  
Aleksandar VUKADINOVIĆ i Sanja VRANJEŠ-ĐURIĆ**

*Univerzitet u Beogradu, Institut za nuklearne nauke «Vinča», Laboratorija za  
radioizotope, Beograd, Srbija, [drinaj@vinca.rs](mailto:drinaj@vinca.rs), [mmarija@vin.bg.ac.rs](mailto:mmarija@vin.bg.ac.rs),  
[magdalena.lazarevic@gmail.com](mailto:magdalena.lazarevic@gmail.com), [zoranamilanovic89@gmail.com](mailto:zoranamilanovic89@gmail.com),  
[markoperic1983@gmail.com](mailto:markoperic1983@gmail.com), [vukadinovic@vinca.rs](mailto:vukadinovic@vinca.rs), [sanjav@vinca.rs](mailto:sanjav@vinca.rs)*

### SADRŽAJ

*Doze kalibrator je jedan od osnovnih uređaja u nuklearnoj medicini, koji se koristi za merenje aktivnosti (doza) radiofarmaceutika koji se daju pacijentima bilo u dijagnostičke ili u terapijske svrhe. Aktivnosti gama i beta emitera različitih energija moraju da budu izmerene što tačnije da bi izlaganja ljudi (pacijenata) jonizujućem zračenju bila svedena na najmanji mogući nivo, a da se dobiju klinički značajni rezultati. Početna tačnost kalibratora (nesigurnost 5% ili manje) može se vremenom menjati kao rezultat promene pritiska u jonizacionoj komori ili električnog drifta. Zbog toga kontrola kvaliteta doze kalibratora treba da se sprovodi rutinski kako bi se osigurala tačnost i sledljivost merenja.*

*U radu su prikazani rezultati procene nesigurnosti pri merenjima aktivnosti radiofarmaceutika u doze kalibratoru u Laboratoriji za radioizotope. Komponente nesigurnosti, koje su važne za ova merenja, identifikuju se i uzimaju u obzir prilikom procene merne nesigurnosti. Razumevanje izvora nesigurnosti i korišćenje odgovarajućih korekcionih faktora mogu minimizirati netačna merenja.*

### 1. Uvod

Radiofarmaceutici su radionuklidi i supstance obeležene radionuklidima koji se u medicini upotrebljavaju za različita funkcionalna i morfološka ispitivanja, kao i za lečenje. U zavisnosti od toga koje se informacije žele dobiti određenom dijagnostičkom studijom ili koji se terapijski efekat želi postići, bira se vrsta radiofarmaceutika kao i način njegove aplikacije. Nakon unošenja u organizam radiofarmaceutik se u njemu raspoređuje i metaboliše određenim putevima, sve dok se potpuno ne eliminiše iz organizma. Pošto pri nuklearnomedicinskim ispitivanjima ili lečenju ozračivanje pacijenata nije moguće izbeći, bira se najpogodniji radionuklid, njegova aktivnost (doza) i procedura da bi se efektivna doza svela na najmanju moguću meru.

Aktivnost radiofarmaceutika koja se aplikuje pacijentima mora biti tačno poznata kako bi se ispunili zahtevi za zaštitu od zračenja, a i da se obezbedi uspešna terapija ili da se dobije kvalitetna dijagnostička informacija. Zbog toga se svaka aktivnost (doza) pre aplikacije pacijentu meri u doze kalibratoru.

Doze kalibrator je jedan od osnovnih instrumenata u nuklearnoj medicini. Sastoji se od jonizacione komore u koju se stavljaju bočice ili špricevi sa radiofarmaceuticima, kao i elektronskog uređaja koji omogućuje podešavanje koji je radionuklid koji se meri, da li se aktivnost izražava u Bq ili Ci, kalibracioni broj radionuklida, kao i displeja na kome se očitava merena aktivnost.

Kako aktivnost radiofarmaceutika mora tačno da se izmeri pre aplikacije pacijentu, interna provera doze kalibratora (kalibrator aktivnosti) u cilju provere da li je obezbeđen zadovoljavajući nivo propisanog kvaliteta, se sprovodi prema Pravilniku o primeni izvora jonizujućih zračenja u medicini ("Sl. glasnik RS", br. 1/2012).

Za kontrolu kvaliteta (QC) merne metode, važnu ulogu imaju referentni materijali. Referentni materijal je materijal ili supstancija čije su jedna ili više vrednosti osobina dovoljno homogeni i dobro ustanovljeni da mogu da se koriste za etaloniranje aparata, procenu mernih metoda, ili za pripisivanje vrednosti materijalima. Referentni materijali se mogu svrstati u dve grupe: sertifikovani (overeni) referentni materijali (CRM) i laboratorijski (radni) referentni materijali (RM) [1]. Sertifikovani referentni materijal je referentni materijal, praćen uverenjem, čija su jedna ili više vrednosti osobina overene postupkom kojim se uspostavlja sledivost sa tačnim ostvarenjem jedinice u kojoj se izražavaju vrednosti osobina i za koga je svaka overena vrednost praćena nesigurnošću na naznačenom nivou poverenja.

Merna nesigurnost se definiše kao "parametar pridružen rezultatu merenja, koji karakteriše rasturanje vrednosti oko izmerenog podatka". Ovaj parametar može biti standardna devijacija ili drugačije opisan deo intervala koji obuhvata izvestan nivo poverenja. Kod procene merne nesigurnosti u obzir se uzima ukupan postupak sa svim pojedinačnim stepenima merenja (uzorkovanje, skladištenje uzorka, odmeravanje, rastvaranje, instrumentalno merenje, proračun, itd.). Pojedinačne vrednosti merne nesigurnosti (za pojedinačne stepene) se statistički dobijaju iz serije merenja. U nekim slučajevima je teško kvantifikovati mernu nesigurnost, tako da se mogu koristiti alternativni pristupi (literaturni podaci, i sl.). Koncept merne nesigurnosti je detaljno opisan u literaturi [2-6].

### *Izračunavanje merne nesigurnosti*

Postoje različiti pristupi oceni nesigurnosti [7]. Prema GUM principu postoje tri glavna pristupa: pristup modelovanjem, pristup preko validacije unutar laboratorije i pristup preko međulaboratorijske validacije. Kod pristupa sa modelovanjem može biti dobijena nesigurnost pojedinačnog rezultata merenja. Kod pristupa preko međulaboratorijske validacije koriste se podaci iz više laboratorija koje su koristile istu proceduru jer se vrednosti za međulaboratorijsku reproduktivnost ( $s_R$ ) mogu naći u izveštajima međulaboratorijske validacije.

Kod pristupa preko validacije unutar laboratorije dve grupe (slučajne i sistematske) doprinosa nesigurnosti se odvojeno kvantifikuju i zatim kombinuju. U ovom pristupu najvažnije je: pokriti ceo spektar efekata koji se sreću tokom tipičnog sprovođenja postupka merenja i proceniti pomeranost tj. istinitost (bias) korišćenjem sertifikovanih referentnih materijala (CRM) ili poređenje sa referentnim procedurama.

Merna nesigurnost je karakteristika svakog procesa merenja unutar laboratorije i pripisuje se mernoj opremi koja se koristi, obučenosti osoblja koje izvodi merenje i uslovima okoline u kojoj se izvodi merenje.

Višestruko ponavljanje procedure merenja, zbog merne nesigurnosti, se izvodi sa ciljem određivanja neke merene veličine nekim mernim instrumentom tako da se dobiju pouzdani rezultati.

U ovom pristupu za pokrivanje celog spektra efekata koji se sreću tokom sprovođenja postupka merenja i celog opsega očekivanih vrednosti u domenu procedure koriste se podaci iz kontrole kvaliteta tj. ponovljivost,  $s_r$ , i unutarlaboratorijska reproduktivnost,  $s_{RW}$ .  $u(R_w)$  je komponenta nesigurnosti koja uzima u obzir varijacije rezultata u dugom vremenskom periodu tj. unutarlaboratorijsku reproduktivnost ( $s_{RW}$ ).

$$u(R_w) = s_{RW} \quad (1)$$

Reproduktivnost rezultata merenja podrazumeva slaganje rezultata merenja iste fizičke veličine pod uslovima merenja. Uslovi merenja mogu biti: ista laboratorija, različito osoblje, različiti dani (po mogućstvu u toku jedne godine), ista procedura, različite partije reagenasa, uzorak sličan ispitnim uzorcima, itd.)

Vrednosti za  $u(R_w)$  dobijaju se iz X-kontrolne karte i izračunava se:

$$u(R_w) = SD * 100 / X_{sr} (\%) \quad (2)$$

gde je:  $SD$ -standardna devijacija;  
 $X_{sr}$ -srednja vrednost merenja.

U svrhu ocene komponente nesigurnosti povezane sa istinitošću tj.  $u(bias)$  koriste se sertifikovani referentni materijali (CRM).

Za svaku procenu nesigurnosti na osnovu metode i laboratorijskog biasa, kako bi se dobio  $u(bias)$  neophodno je proceniti dve komponente:

- 1) bias - razlika između srednje vrednosti izračunate iz velike serije rezultata testiranja i prihvaćene referentne vrednosti (% razlike od sertifikovane ili nominalne vrednosti).
- 2) nesigurnost nominalne/sertifikovane vrednosti,  $u(Cref)$  ili  $u(Crecovery)$ .

Nesigurnost biasa,  $u(bias)$  se može proceniti kao:

$$u(bias) = \sqrt{RMS_{bias}^2 + u(Cref)^2} \quad (3)$$

gde je:

$$RMS_{bias} = \sqrt{\frac{\sum (bias_i)^2}{n}} \quad (4)$$

$$u(Cref) = \sqrt{\frac{\sum u(Cref_i)^2}{n}} \quad (5)$$

Kombinovana standardna nesigurnost se može izračunati primenom jednačine:

$$u_c = \sqrt{u(R_w)^2 + u(bias)^2} \quad (6)$$

U izveštaju sa rezultatima upisuje se vrednost "proširene merne nesigurnosti" (expanded uncertainty) ( $U$ ) :

$$U = k u_c \quad (7)$$

Faktor obuhvata,  $k$ , bira se na osnovu željenog nivoa poverenja, a izvodi iz efektivnog broja stepena slobode. Kod normalne raspodele:  $U = 2 u_c$  ( $k = 2$ ) definiše interval sa nivoom poverenja od 95%, a  $U = 3 u_c$  ( $k = 3$ ) definiše interval sa nivoom poverenja od 99%. U praksi se obično vrši aproksimacija  $k \approx 2$ . U izveštaju se uz vrednosti  $\pm U$  daje i napomena da je vrednost dobijena za nivo poverenja “confidence interval” 95%.

### 2. Materijal i metode

Za merenje aktivnosti radiofarmaceutika koristi se doze kalibrator Capintec CRC-15 Beta: prag detekcije:  $>10$  kBq (1 kBq), maksimalna merena aktivnost: 370 GBq za gama emitere, energetski opseg: 35 keV – 3 MeV, rezolucija: 1 kBq.

Interna provera doze kalibratora, je izvršena merenjem radioaktivnosti 2 sertifikovana referentna materijala (CRM): Cs-137 (plastična bočica zapremine 20 ml, vreme poluraspada  $T_{1/2} = 30,17$  godina, aktivnosti  $A = 3674$  kBq na datum 1.7.2009.,  $U = \pm 3\%$  na nivou pouzdanosti od 99%) i Co-60 (plastična bočica zapremine 20 ml, vreme poluraspada  $T_{1/2} = 5,27$  godina, aktivnosti  $A = 3571$  kBq na datum 1.7.2009.,  $U = \pm 3\%$  na nivou pouzdanosti od 99%) i izradom X-kontrolnih karata tokom jednogodišnjeg perioda (najmanje 60 rezultata merenja).

#### *Provera tačnosti metode*

Tačnost je parametar koji pokazuje koliko rezultat (ili srednja vrednost rezultata) odstupa od prave vrednosti. Da bi procenila tačnost rezultata svojih ispitivanja laboratorija vrši analizu sertifikovanih referentnih materijala. Tačnost se proverava dnevno, tj. pre početka merenja.

### 3. Rezultati i diskusija

U Laboratoriji za radioizotope se primenjuju priznate i validirane metode ispitivanja u kojima je specificiran način prikazivanja izračunatih rezultata. Za sva ispitivanja-merenja koristi se ispravna, etalonirana ili interno proverena merna oprema, a uslovi okoline se redovno kontrolišu. Ispitivanja obavlja visoko kvalifikovano osoblje, koje je upoznato sa izvorima merne nesigurnosti.

U Laboratoriji za radioizotope u osnovi svih kvantitativnih ispitivanja je merenje radioaktivnosti, te se procena merne nesigurnosti vrši za ovu vrstu merenja.

Merenje radioaktivnosti se vrši doze kalibratorom. Instrument se interno proverava, prema Pravilniku o primeni izvora jonizujućih zračenja u medicini i iz rezultata tačnosti se procenjuje merna nesigurnost. Na osnovu ovih rezultata merenja, izračunate su srednje vrednosti i standardne devijacije i nacrtane su X-kontrolne karte merenjem radioaktivnosti sertifikovanih referentnih materijala Cs-137 i Co-60. Na slici 1 prikazana je X - kontrolna karta uspostavljena na osnovu pojedinačnih rezultata merenja radioaktivnosti sertifikovanog referentnog materijala Cs-137 u periodu od juna 2017. do juna 2018. (60 merenja).

Na osnovu rezultata prikazanih na kontrolnoj karti možemo zaključiti da su sve izmerene vrednosti su u okviru granica upozorenja, tj da doze kalibrator CRC-15 beta može da se koristi za predviđena merenja radioaktivnosti.

Određene su tačnost i konstantnost merenja. Odstupanje izmerenih aktivnosti od datih aktivnosti za referentne etalone Co-60 i Cs-137 su u propisanom opsegu od  $\pm 5\%$ .

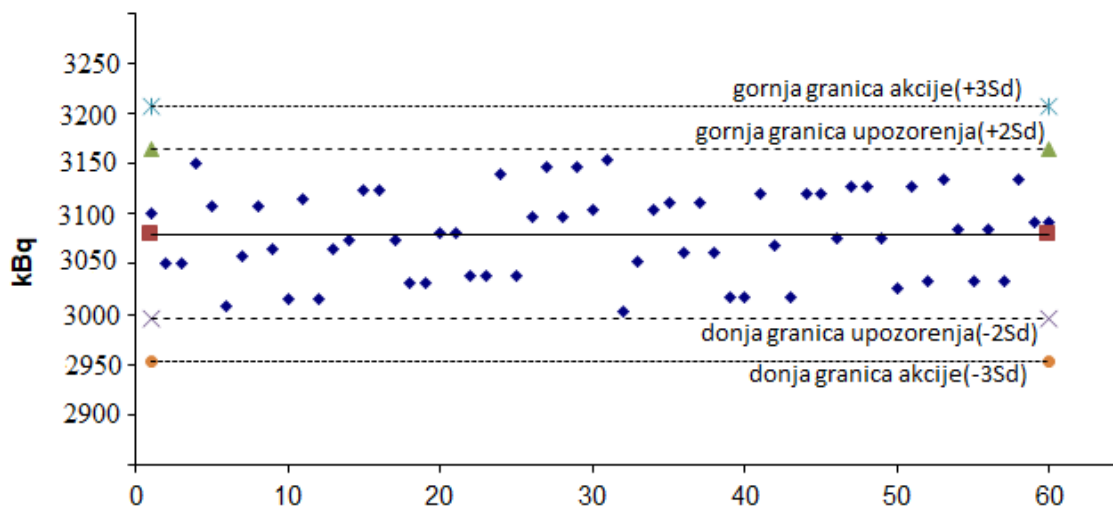
Potencijalna pomeranost (bias) je procenjena iz analiza sertifikovanih referentnih



materijala Cs-137 i Co-60.

Na osnovu rezultata iz kontrole kvaliteta, reproduktivnost unutar laboratorije ( $s_{RW}$ ) za Cs-137 je kvantifikovana i iznosi 33,3 kBq, dok je  $u(R_w)_{rel}$  1,08%.

U tabeli 1 prikazani su rezultati nesigurnosti procene biasa.



Slika 1. X - kontrolna karta Capintec CRC-15 Beta doze kalibratora u periodu jun 2017 - jun 2018, referentni etalon Cs-137.

Tabela 1. Nesigurnost procene biasa.

Nuklid	Ref vred (kBq)	$U (k=3)$ (kBq)	$u_c$ (kBq)	Lab rezultat (kBq)	$u_{c\_rel}$ %	$bias_i$ (kBq)	$bias\_rel$ %
Co-60	1191,4*	35,74	13,85	1203,6	1,16	12,20	1,02
Cs-137	3063,6*	91,91	35,62	3073,2	1,16	9,60	0,31

\*- primenjeni su korekcionni faktori za radioaktivni raspad

Na osnovu podataka, prikazanih u tabeli 1, je kvantifikovana komponenta nesigurnosti vezana za procenu istinitosti ( $u(bias)_{rel}$ ) i iznosi:

$$u(C_{ref})_{rel} = 1,16\%$$

$$RMS_{bias\_rel} = 0,76\%$$

$$u(bias)_{rel} = 1,39\%$$

Kombinovana standardna nesigurnost ( $u_{c\_rel}$ ) iznosi 1,76%, a proširena merna nesigurnost  $U = 3,52\%$  je izračunata korišćenjem faktora obuhvata  $k = 2$ , koji daje nivo poverenja od približno 95%.

#### 4. Zaključak

Merna nesigurnost je važan podatak sadržan u rezultatu ispitivanja. Njeno određivanje zavisi od celokupnog znanja o prirodi merenja, o predmetu merenja i mogućnosti

procene faktora koji utiču na tačnost merenja. Podaci iz kontrole kvaliteta dobijeni tokom dugog vremenskog perioda pružaju kombinovanu procenu nesigurnosti koja se javlja iz mnogo mogućih izvora. Na osnovu prikazanih rezultata vidi se da je u slučaju merenja radioaktivnosti doze kalibratorom dobijena vrednost proširene merne nesigurnosti 3,52% ( $k=2$ ). Merna nesigurnost ovog reda veličine je zadovoljavajuća za ovu vrstu merenja i doze kalibrator CRC-15 beta može da se koristi za predviđena merenja radioaktivnosti.

### 5. Zahvalnica

Ovaj rad je realizovan u okviru nacionalnog projekta III43009 koji finansira Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

### 6. Literatura

- [1] B.M. Simonet. Quality control in qualitative analysis. *Trends Anal. Chem.* 24, 2005, 525–531.
- [2] SRPS ISO/IEC 17025:2006 Opšti zahtevi za kompetentnost laboratorija za ispitivanje i laboratorija za etaloniranje, 2006.
- [3] ATS-PA06 Procena merne nesigurnosti, 2017.
- [4] EA 4/02 Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration, 2013.
- [5] EA 4/16 EA Guidelines on the Expression of Uncertainty in Quantitative testing, 2003.
- [6] ILAC-G17:2002 Introducing the Concept of Uncertainty of Measurement in Testing in Association with the Application of the Standard ISO/IEC 17025, 2002.
- [7] NORDTEST Technical Report 537: Handbook for calculation of measurement uncertainty in environmental laboratories NORDTEST 2005 ([www.nordtest.org](http://www.nordtest.org)), 2017.

**ESTIMATION OF MEASUREMENT UNCERTAINTY IN  
MEASURING RADIOPHARMACEUTICAL ACTIVITY IN DOSE  
CALIBRATOR**

**Drina JANKOVIĆ, Marija MIRKOVIĆ, Magdalena RADOVIĆ,  
Zorana MILANOVIĆ, Marko PERIĆ,**

**Aleksandar VUKADINOVIĆ and Sanja VRANJEŠ-ĐURIĆ**

*University of Belgrade, Institute for Nuclear Sciences "Vinča", Laboratory for  
Radioisotope, Belgrade, Serbia, [drinaj@vinca.rs](mailto:drinaj@vinca.rs), [mmarija@vin.bg.ac.rs](mailto:mmarija@vin.bg.ac.rs),  
[magdalena.lazarevic@gmail.com](mailto:magdalenalazarevic@gmail.com), [zoranamilanovic89@gmail.com](mailto:zoranamilanovic89@gmail.com),  
[markoperic1983@gmail.com](mailto:markoperic1983@gmail.com), [vukadinovic@vinca.rs](mailto:vukadinovic@vinca.rs), [sanjav@vinca.rs](mailto:sanjav@vinca.rs)*

**ABSTRACT**

A dose calibrator is an essential device in a nuclear medicine, utilized for measurement the activity of radiopharmaceuticals administered to patients both for diagnostic and therapeutic purposes. It has to measure the radioactivity of gamma and beta with different energies precisely for high quality imaging and for applying the right amount of radiation to treat disease. Initial accuracy (uncertainty 5% or less) may change with time as a result of changing pressure of the chamber gas and slow electrical drift. The quality controls should be undertaken on a routine basis to ensure the accuracy and traceability of measurements of the activities of radiopharmaceuticals.

The paper presents the results of estimation of uncertainty in the measurement of the activity in the dose calibrator in the Laboratory for radioisotopes. The uncertainty components, that are important for these measurements, are identified and taken into account while estimating the uncertainty of measurement. Understanding the source of uncertainty and using appropriate techniques can minimize inaccurate measurements.

## **ЗАШТИТА ОД ЗРАЧЕЊА У МЕДИЦИНИ**



### ZAŠTITA OD ZRAČENJA U MEDICINI: PRVIH 55 GODINA

**Olivera CIRAJ BJELAC**

*Univerzitet u Beogradu, Institut za nuklearne nauke Vinča, Laboratorija za zaštitu od zračenja i zaštitu životne sredine, Beograd, Srbija, [ociraj@vinca.rs](mailto:ociraj@vinca.rs)*

#### SADRŽAJ

*Zaštita od zračenja u medicine bila je tema profesionalne zaštite od zračenja od početka uspostavljanja ove oblasti kao nezavisne naučne i stručne discipline. Tokom 55 godina duge istorije Društva za zaštitu od zračenja, zaštita od zračenja u medicine bila je zastupljena na svim do sada održanim simpozijumima na način koji reflektuje aktuelne teme u ovoj oblasti. U radu je dat pregled tema iz oblasti zaštite od zračenja u medicine na do sada održanim Simpozijumima društva za zaštitu od zračenja.*

#### 1. Uvod

Proteklo je pedeset i šest godina od formiranja Jugoslovenskog društva za zaštitu od zračenja. Ovaj jubilarni trideseti simpozijum prilika za osvrt na aktuelne teme u oblasti zaštite od zračenja, uključujući i one koje se odnose na zaštitu od zračenja u medicini, koje su kroz istoriju društva ostale zapisane u zbornicima radova do sada održanih simpozijuma (<http://dzz.org.rs/simpozijumi/>).

Od 1963. do 2017. godine, održano je 30 simpozijuma i niz tematskih skupova. Na svakom od njih, zaštita od zračenja u medicini bila je prisutna kao tema, prvobitno u okviru sekcija posvećenim opštim temama u zaštiti od zračenja i dozimetriji a od 1981. godine, kada je održan XI Simpozijum Jugoslovenskog društva za zaštitu od zračenja u Portorožu, i u okviru posebne tematske sekcije posvećene zaštiti od zračenja u medicini. Zaštita od zračenja, kao multidisciplinarna naučna disciplina i kao stav, je u velikoj meri doprinela zaštiti ljudi i životne sredine od štetnog dejstva jonizujućih zračenja i omogućila njihovu bezbednu upotrebu. Primena izvora zračenja u medicini neosporno predstavlja jednu od najzanimljivijih vidova primene jonizujućih zračenja. Medicinska primena izvora zračenja je do naše svakodnevice, prisutna je u svim zdravstvenim sistemima, od velikih gradova u razvijenom svetu do udaljenih ruralnih sredina. Procenjeno je da je broj medicinskih postupaka koji koriste zračenje porastao sa oko 1,7 milijardi u 1980. godini na skoro 4 milijarde u 2007. godini. Medicinska primena izvora zračenja doprinosi sa više od od 99,9% ukupnoj efektivnoj dozi od svih veštačkih izvora zračenja. Stoga nije neobično da zaštita od zračenja u medicini ima jedinstvenu poziciju, svoje specifičnosti i predstavlja bitan element svakodnevne medicinske prakse [1].

Imajući u vidu društveni kontekst, entuzijazam i stručni osnov na kome je formirano Jugoslovensko društvo za zaštitu od zračenja 1963. godine, nije neobično da je zaštita od zračenja u medicini bila tema već na samom početku postojanja i rada ovog profesionalnog udruženja. Pored toga, neophodno je istaći da se zaštita od zračenja u medicini, kao tema kroz istoriju društva, odlikuje izuzetnom aktuelnošću i raznovrsnošću. Pitanja

pokrenuta decenijama ranije, ostalu su u velikoj meri značajna i danas, uprkos činjenici da primena izvora jonizujućih zračenja u medicini mesto za transfer viskohn tehnologija u svakodnevnu kliničku praksu.

### 2. Zашtita od zračenja u medicini kao tema na 30 simpozijuma

Najstariji propis iz oblasti zaštite od zračenja, potiče još iz 1947. godine i odnosi se na zaštitne mere pri radu sa rendgenskim uređajima i radioaktivnim materijama [2]. Ovaj dokument potvrđuje da je zaštita od zračenja u medicini bila tema i pre osnivanje Jugoslovenskog društva za zaštitu od zračenja. Aktivnosti na polju zaštite od zračenja u Jugoslaviji uveliko su se razvijale početkom šezdesetih godina. Samo četiri godine nakon usvajanja politike zaštite ostvareni su prvi profesionalni uslovi za organizaciju stručnog sastanka - simpozijuma. Simpozijum je održan u Portorožu od 8. do 12. Oktobra 1963. godine. Program simpozijuma obuhvatio je plenarne sesije sa opštim temama i tri paralelne sesije o zaštiti od zračenja u medicini i biologiji, tehničkoj zaštiti od zračenja i zračenju u životnoj sredini. Zbornik radova nije objavljen, ali je objavljena Knjiga sažetaka. Iako prvi u nizu, to je bio najposjećeniji sastanak, sa 315 učesnika [3]. Pored toga, simpozijum je bio i značajna potvrda da je u to vreme postojala uspešna profesionalna zajednica u zaštiti od zračenja. Od 1963. do 2017. održano je trideset simpozijuma, navedenih u tabeli 1. U istoj tabeli, naveden je i broj radova čije je tema bila zaštita od zračenja u medicini.

**Tabela 1. Simpozijumu održani u periodu 1963. – 2017.**

Broj	Godina	Mesto	Broj učesnika	Ukupna broj radova	Broj radova na temu zaštite od zračenja u medicini
I	1963	Portorož	310	162	4
II	1965	Mostar	250	48	0
III	1967	Banja Luka	210	88	2
IV	1969	Baško Polje	250	151	16
V	1970	Bled	200	110	13
VI	1972	Ohrid	160	96	11
VII	1973	Kaštel Stari	150	92	8
VIII	1975	Herceg Novi	150	83	6
IX	1977	Jajce	150	109	17
X	1979	Arandelovac	120	88	4
XI	1981	Porotrož	150	116	7
XII	1983	Ohrid	200	139	7
XIII	1985	Pula	250	182	8
XIV	1987	Novi Sad	250	117	9
XV	1989	Priština	150	119	10
XVI	1991	Neum	130	108	4
XVII	1993	Beograd	120	74	7
XVIII	1995	Bečići	106	86	13
XIX	1997	Golubac	95	75	13
XX	1999	Tara	105	90	11
XXI	2001	Kladovo	94	82	13
XXII	2003	Petrovac	100	80	6



**Tabela 1. Nastavak.**

Broj	Godina	Mesto	Broj učesnika	Ukupna broj radova	Broj radova na temu zaštite od zračenja u medicini
XXIII	2005	Donji Milanovac	80	69	5
XXIV	2007	Zlatibor	95	75	8
XXV	2009	Kopaonik	74	64	4
XXVI	2011	Tara	82	78	6
XXVII	2013	Vrnjačka Banja	80	97	12
XXVIII	2015	Vršac	84	95	6
XXIX	2017	Serbrno jezero	80	88	6

Ukupan broj radova na temu zaštite od zračenja u medicini na do sada održanim simpozijumima je 236, dok je njihov udeo u ukupnom broju radova bio između 5% i 15%. Uprkos relativno maloj zastupljenosti u odnosu na neke druge oblasti zaštite od zračenja, razmatrana problematika na do sada održanim simpozijumima bila je raznovrsna i aktuelna. Pregled tema kroz istoriju do sada održanih simpozijuma dat je u tabeli 2.

**Tabela 2. Zaštita od zračenja u medicine na simpozijumima u periodu 1963. – 2017. god.**

Tema	Godina	Komentar
Opšti problemi u zaštiti od zračenja u medicini	1969, 1981, 1991, 1995, 1999.	
Zaštita profesionalno izloženih lica u medicini	1963, 1969, 1972, 1977, 1987, 1989, 1991, 1993, 1995, 1997, 1999, 2007, 2013, 2015.	
Tehnološke osobine, broj i struktura rendgen-aparata	1970, 1972, 1977, 1985, 1987, 1989, 1995, 1997, 1999, 2001, 2013.	
Dizajn rendgen-kabineta i strukturalna zaštita	1963, 1975, 1977, 1979, 1981, 1987, 2013.	
Karakterizacija snopa dijagnostičkih rendgen-aparata	1967, 1970, 1973, 1979, 1987, 1993, 1997.	
Spektrometrija snopa x –zračenja	1969, 1973, 2005, 2013.	
Karakterizacija polja rasejanog zračenja	1970, 1972, 1993.	
Dozimetrijske metode za pacijente, procena doze	1967, 1970, 1972, 1977, 1983, 1995, 1999, 2001, 2007, 2013, 2017.	Eksperimentalna i računaska dozimetrija
Doza za organe (gonade, očna sočiva), radijacioni rizik	1963, 1969, 1973, 1975, 1981, 1983.	GSD-Genetically Significant Dose
Zaštita od zračenja u stomatološkoj radiologiji	1969, 1972, 1973, 1975, 1989, 2015.	
Zaštita od zračenja u planarnoj radiologiji	1969, 1972.	Dominira radiografija pluća
Zaštita od zračenja u mamografiji	1983, 1985, 1989.	
Zaštita od zračenja u fluoroskopiji	1969, 1970, 1972, 2003.	
Zaštita od zračenja u pedijatrijskoj radiologiji	1963, 1970, 1977, 1989, 1991, 1995, 1999, 2009, 2011.	
Zaštita od zračenja u granama van radiologije	1973, 1977, 1989, 2005, 2009, 2011, 2013.	Urologija, angiografija, pajsmejker centar, kardiologija, ginekologija

Табела 2. Наставак.

Тема	Година	Коментар
Заштита од зрачења у радиотерапији	1970, 1977, 1981, 1989, 1993, 1995, 1999, 2001, 2003, 2009, 2011, 2013, 2015, 2017.	
Заштита од зрачења у нукlearној медицини	1977, 1979, 1981, 1983, 1985, 1989, 1993, 1995, 1997, 2001, 2003, 2003, 2005, 2007, 2013.	Производња радиофармацевтика и клиничка примена
Едукација и компетентност особља	1969, 1970, 1977, 1997.	
Акциденти и инциденти	1970, 2001, 2007.	
Доза за популацију као последица примене извора зрачења у медицини	1970, 1977, 1983, 1985, 1997, 2011, 2013.	
Питање оправданости прегледа, поновљени прегледи на истом пацијенту и здравствени скрининг	1972, 1973, 1981, 1983, 1985.	
Трудноћа и јонизујуће зрачење	1977, 1981, 1989, 1999, 2005, 2013.	
Оптимизација праксе у дијагностичкој радиологији	1993, 1999, 2001, 2007, 2013.	КТ, транзиција са аналогне на дигиталну радиологију
Осигурање и контрола квалитета	1991, 1993, 1995, 1997, 1999, 2009, 2011, 2013, 2017.	Дијагностичка радиологија, радиотерапија
Ефекти јонизујућих зрачења (оčno сочиво, кожа)	1985, 2001, 2015, 2017.	

У наставку текста дат је преглед одабраних тема кроз историју одржаних симпозијума. Одбир тема базира се на њиховој актуелности, имајући у виду да су многе од тема наведених у табели 2 отворена питања и данас [1, 4, 5].

### 3. Општи проблеми у заштити од зрачења у медицини, едукација и компетентност особља

Прегледни радови на тему општих проблема у заштити од зрачења у медицини, приказани у у неколико наврата у периоду од 1969. до данас. У раду *Magarašević i saradnici* (1969) [6], аутори дају преглед броја лекара који користе јонизујуће зрачења у својој пракси, а да за то нису претходно обучени, дају предлоге за упоређење овакве праксе, пре свега истајући потребу за допунским обуцавањем ових лекара. У раду *Čerkez i sardnici* (1969) [7], приказана је методологија испитивање извора зрачења у медицини, фокусирана искључиво на карактеристике рендген-апарата, простора и стање личних заштитних средстава. Ипак, у раду *Jokić i saradnici* (1969) [8], медицинско излагање препознато је као најзначајнији чинилац у укупној дози за популацију, са доприносом од 70 до 90%. Принципи оправданости и оптимизације праксе идентификовани су као механизми за контролу дозе од медицинског излагања.

Заштита од зрачења у медицини, као посебна тематска сесија поминаје се први пут 1981. године. У прегледном раду *Kalendarova* (1981) анализирани су актуелне теме у заштити од зрачења у медицини, укључујући изворе зрачења и методе за процену дозе за пацијенте [9]. Интересанто је да су на веома компетентан начин дискутоване неправилности у приказивању резултата пацијенте дозиметрије, као што су недостатак калибрације, приказивање искључиво средње вредности дозе и недостатак оцене грешке мерења. Констатовано је и да се методе за смањење доза своде на варијацију неколико

jednostvnih paramtera rendgen-aparata. Predlozi za poboljšanje situacije dati su ukupno 13 tačaka i mogu se primeniti i danas. U radu *Prlic i saradnici* (1991) [10] dat je pregled stanja u zaštiti od zračenja u medicini u R. Hrvatskoj. Konstatovano je da se zaštititi pacijenata ne posvećuje dovoljna pažnja. U radu je istaknuta i neophodnost implementacije programa osiguranje i kontrole kvaliteta (QA/QC) u medicini, dok je u radu *Vukčević i saradnici* (1999) dat pregled grešaka u procesu QA u dijagnostičkoj radiologiji, pre svega greške merenja napona rendgenske cevi i filtracije snopa koje mogu imati reperkusije na interpretaciju rezultata i njihovo poređenje sa referentnim vrednostima [11].

#### 4. Doza za populaciju kao posledica primene izvora zračenja u medicini

Doza za populaciju kao posledica primene izvora zračenja u medicini prepoznata je kao tema još na simpozijumu održanom 1970. godine [12], kada je dat pregled obima korišćenja rendgen-aparata u SFRJ, kako je prikazano u tabeli 3. U radu *Ninković i saradnici* (1977) [13], pored procenjene doze za pacijente (tabela 4), konstatuje se da primena kriterijuma za upućivanje pacijenata na radiološke preglede nije adekvatan a da je primena mera za kontrolu doze nedovoljna.

**Tabela 3. Frekvencija pregleda u dijagnostičkoj radiologiji 1967. godine [12].**

Broj rentgenskih pregleda po glavi stanovnika po spolu i republikama u 1967. (rezultati ankete vršene od 9-15.10.1967) u hiljadama									
Republika	Muškarci			Žene			Svega		
	Broj pregleda	Broj stanovnika	Pregledi po glavi stanovnika	Broj pregleda	Broj stanovnika	Pregledi po glavi stanovnika	Broj pregleda	Broj stanovnika	Pregledi po glavi stanovnika
SRB1H	1104,5	1799	0,61	755,9	1868	0,41	1860,4	3667	0,51
SRB1G	108,5	258	0,42	87,1	262	0,33	195,6	520	0,38
SRH	1695,6	2063	0,82	1494,8	2251	0,66	3190,4	4314	0,75
SRM	426,8	776	0,55	372,2	754	0,49	799,0	1530	0,52
SRS1	802,7	800	1,00	661,0	862	0,76	1463,7	1662	0,95
SRS	2727,7	3979	0,69	2698,1	4069	0,66	5425,8	8048	0,68
SFRJ:	6865,8	9675	0,71	6069,1	10066	0,61	12934,9	19741	0,65

U radu *Križanović* (1983) konstatuje se da je na području grada Kragujevca najfrekventniji pregled prosvetljavanje pluća, da oko 50% stanovništva tokom jedne godine bude povrgnuto nekoj dijagnostičkoj proceduri a da genetski značajna doza iznosi 337  $\mu$ Sv [14]. Primećen je i porast genetski značajne doze usled veće učestalosti radiografije kukova kod dece. Na simpozijumima održanim 2011. i 2013. godine, prikazani su rezultati procene doza za populaciju u Republici Srbiji [14]. Prema ovim rezultatima, ukupan broj pregleda u nuklearnoj medicini iznosi 35000, a kolektivna doza 125  $\mu$ Sv. Procenjena doza per caput iznosi 17  $\mu$ Sv. Ukupan broj radioloških pregleda procenjen je na 5 miliona, kolektivna doza na 4500  $\mu$ Sv a srednja per caput doza na 0.6 mSv.

Табела 4. Доје за популацију у конвенционалној радиологији [13].

Бр.	апарат	орган	место мерења	kV	mAs	FFcm	mR
1.	Selenoq	želudac	između pacijenta i ekrana	80	80	80	500
2.	"	pluća	над десним раменом	120	16	200	10
3.	"	"	над десним раменом	75	30	150	22
4.	Philips	"	над десним раменом	70	30	150	23
5.	Lo-rava	"	над десним раменом	70	30	150	25

### 5. Питање оправданости pregleda, ponovljeni pregledi na istom pacijentu i zdravstveni skrining

Još 1969. godine, *Jokić i saradnici* (1969), postavljaju pitanje adekvatne indikacije za bilo koje izlaganje izvorima zračenja u medicini, posebno u dijagnostičkoj radiologiji [8]. Samo nekoliko godina kasnije, 1972. godine, na Simpozijumu održanom na Ohridu, razmatrana je i danas veoma značajna tema vezana za ponovljene procedure na istom pacijentu, posebno tokom procesa lečenja hroničnih bolesti [16]. Utvrđeno je da je tek trećina pacijenta obuhvaćenih istaživanjem posedovala infomaciju o prethodno obavljenim pregledima (tabela 5).

Табела 5. Infomacija o izlaganju pacijenta tokom lečenja hroničnih bolesti i udeo upotrebe već dostupne infomacije [16].

Redni broj	Grupa obojenja	Broj sekvestriranih bolesnika	Ukupan broj rtg. pregleda u bolnici	Prosečan broj redovnog pregleda po je-dnom bolesniku	Ukupan broj pregleda pri-je dolaska u bolnicu	Prosečan broj rtg. pregleda prije dola-ska u bolnicu	Broj bolesnika koji su do-nijeli svadgen anamke pri dolasku u bolnicu			
							da		ne	
							Broj	%	Broj	%
1.	Bolesti disajnih organa izuzev tbc. pluća	8	29	3,6	42	5,2	2	25	6	75
2.	Bolesti urinarnog sistema	25	96	3,8	198	7,9	8	32	17	68
3.	Bolesti srca i krvnih sudova	12	33	2,7	34	2,8	1	8,3	11	91,7
4.	Bolesti jetre i žučnih puteva	5	23	4,6	26	5,2	2	40	3	60
5.	Hronična obojenja kostiju i zglobova	3	13	4,3	15	5,0	2	66	1	34
6.	Bolesti endokrinog sistema	2	9	4,5	5	2,5	-	-	2	100,0
7.	Bolesti želuca i duodenama	9	37	4,1	69	7,7	3	33	6	67
8.	Bolesti krvi i krvotvornih organa	1	3	3,0	4	4,0	-	-	1	100,0
9.	Povrede ekstremiteta	9	30	3,3	6	0,6	6	67	3	33
	Ukupno:	74	273	3,7	401	5,4	24	32,3	50	67,7

Ista grupa autora je postavila i pitanje opravdanosti zdravstvenog skrininga, u radu koji nosi naslov *Izloženost stanovništva jonizujućem zračenju kao posledica administrativnih zahteva* [16]. Razlozi i kriterijumi za upućivanje pacijenta na radiografiju pluća, analizirani u radu *Jokić i sardnici* (1973) [17]. Uvrđeno je da je trećina pacijenata upućena na radiološki pregled bez prethodnog kliničkog pregleda, što je imalo i reperkusije na broj negativnih nalaza. Frekvencija neopravdanih pregleda u jednoj zdravstvenog ustanovi primarnog tipa, prikazana je na Simpozijumu održanom 1981.

godine, kako je dato u tabeli 6 [18]. Slična tema, sada na primeru jedne opšte bolnice, prikazana i 1983. godine (tabela 7), kada je utvrženo da je 45% pregleda bilo medicinski neopravdano [19].

Opravdanost sistematskih pregleda pluća bila je tema na simpozijumu održanom 1985. godine [20]. Utvrđeno je da na ona oko 100000 pregledanih stanovnika, dijagnostikovano 94 nova slučaja tuberkuloze. Na osnovu merenja doza za pacijente, konstatovano je da je broj indukovanih karcinoma manji od 1 na ukupno 300000 pregledanih stanovnika, ali i da je iz prakse neophodno ukloniti monofazne gerenatore rendgenskog zračenja, u cilju smanjenja doza za izloženu populaciju.

**Tabela 6. Nalazi pregleda pluća u ATD u Sarajevu, 1973. godine [17].**

Redni broj	Grupa obojenja	Broj anketiranih bolesnika	Ukupan broj rtg. pregleda u bolnici	Prosječan broj rendgen pregleda po jednoj bolesnici	Ukupan broj pregleda prije dolaska u bolnicu	Prosječan broj rtg. pregleda prije dolaska u bolnicu	Broj bolesnika koji su došli u bolnicu pri dolasku u bolnicu			
							da		ne	
							Broj	%	Broj	%
1.	Bolesti dišajnih organa izuzev the. pluća	8	29	3,6	42	5,2	2	25	6	75
2.	Bolesti urinarnog sistema	25	96	3,8	198	7,9	8	32	17	68
3.	Bolesti srca i krvnih sudova	12	33	2,7	34	2,8	1	8,3	11	91,7
4.	Bolesti jetre i žučnih puteva	5	23	4,6	26	5,2	2	40	3	60
5.	Hronična obojenja kostiju i zglobova	3	13	4,3	15	5,0	2	66	1	34
6.	Bolesti endokrinog sistema	2	9	4,5	5	2,5	-	-	2	100,0
7.	Bolesti želuca i duodenuma	9	37	4,1	69	7,7	3	33	6	67
8.	Bolesti krvi i krvotvornih organa	1	3	3,0	4	4,0	-	-	1	100,0
9.	Povrede ekstremiteta	9	30	3,3	6	0,6	6	67	3	33
Ukupno:		74	273	3,7	401	5,4	24	32,3	50	67,7

**Tabela 7. Rezultati dijagnostičkih pretraga u oB Zrenjanin [19].**

Dijagnostički rezultat	Broj	%
Pozitivan (medicinski koristan)	4.642	36
Praktično b.o. (bez posebnog kliničkog značaja)	2.260	19
Negativan (medicinski neopravdan)	5.829	45
U k u p n o	12.731	100

Važno je istaći da je ukupno...

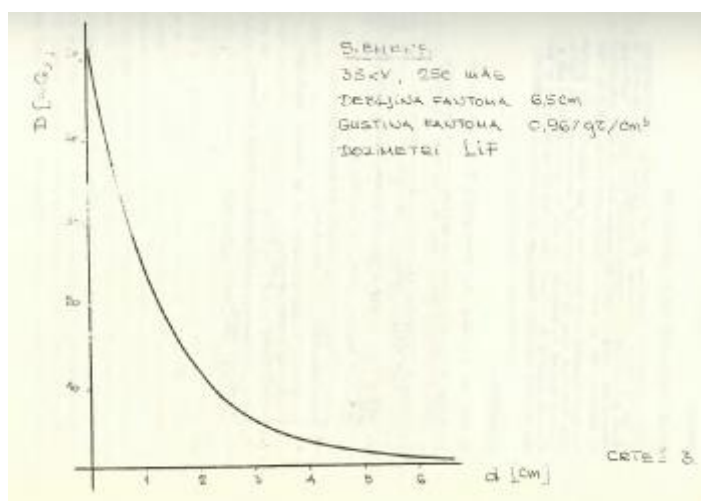
### 6. Zaštita od zračenja u mamografiji

Dozimetrija i zaštita od zračenja u mamografiji bila je tema na tri skupa održana u periodu 1983 -1989. godine, u vreme kada je ovaj dijagnostički modalitet bio daleko manje zastupljen. U radu *Ozračenost dojki pri mamografiji* autora *Tomašević i sardanika* (1983) [21], doza je merena je pomoću dve metode, jonizacionom komorom i pasivnim, termoluminescentnim dozimetrima. Konstatovano je da rezultati merenja pomoću jonzacione komore nisu pouzdani, te su merenja ponovljena pasivnim



dozimetrima (slika 1). Na slici su prikazani rezultati merenje doze za dojku pomoću standardnog fantoma.

Doza u mamografiji bila je tema i na narednom Simozijumu (*Strinic i sardanici*, 1985) [22]. U oba rada, konstatovana je relativno visoka doza za dojku tokom mamografskog pregleda. Oba rada baziraju se na merenju doza na površini kože pacijenta, iako je drugom radu pomenuta i dozimetrijska veličina „srednja grudna doza“ ali metodologija i rezultati merenja iste nisu prikazani. Rizik koje je posledica izlaganja jonizujućem zračenju u mamografiji na osnovu rezultata dostupnih epidemioloških studija, bio je tema rada prekanog na Simpozijumu održanom 1989. godine u Prištini (*Mušanović i saradnici*, 1989) [23]. U radu su date i preporuke za kontrolu rizika prikazane na Slici 2.



Slika 1. Rezultati merenje doze za dojku pomoću standardnog fantoma [21].

U cilju poboljšanja dijagnostike i smanjenja zračenja WHO je preporučila da se prilikom mamografije koristi samo jedna projekcija uz što manji fokus na cijevi, veća kompresija, veća fokus-film distanca, fototajmer za obezbjeđenje standardne ekspozicije. Pri tome je neophodan timski rad i uska saradnja sa radifizičarima.

Slika 2. Preporuke za kontrolu rizika u mamografiji [23].

### 7. Drugi odabrani radovi

Spektrometrija x –zračenja je danas jedna od najznačajnijih tema u metrologiji jonizujućih zračenja. Na simpozijumima društva za zaštitu od zračenja pominje se još od 1969. godine (*Ignjatovic S*, 1969) [24]. U ovom radu prikazan je metod za određivanje spektra x-zračenja šestoventilnog rendgen-aparata, primenom Ge-Li spektrometara. Interesantno je da je u ovom radu analiziran spektar upadnog x-zračenja i snop propušten kroz telo pacijenta. U radu *Cerovac i sardnici* (1973) [25], prikazana je metoda za određivanje napona rendgenske cevi primenom scintilacionog spektrometra IBK Vinča Minus 1, koji je prethodno kalibrisan pomoću radionuklida odgovarajuće energije. Linerna veza između izlazne vrednosti na diskriminatoru (V) i upadnog napona, omogućila je određivanje nazivnog napona rendgen-aparata.

U radu *Vukčević i sardanici* (1995), identifikovan je problem dozimetrije u kompjuterizovanoj tomografiji koji je posledica parcijalnog izlaganja jonizacione komore i širine snopa (tabela 8) [26]. Ovaj dozimetrijski problem aktuelan je i danas.

**Tabela 8. Izmere vrednosti doza po jednom preseku u kompjuterizovanoj tomografiji.**

Nominalna širina skena i kondicije	10 mm 133 kV, 350 mAs, 2s	5 mm 133 kV, 350 mAs. 2 s	2 mm 133 kV, 475 mAs, 2.7 s
Doza po skenu bez preklapanja polja	2.8 cGy	4.4 cGy	5.5 cGy
Doza po skenu sa preklapanjem polja	3.2 cGy	5.9 cGy	10.6 cGy

### 8. Zaključak

Zaštita od zračenja u medicini je kao tema bila zastupljena na svim do sada održanim Simpozijumima društava za zaštitu od zračenja. Identifikovane teme bile su aktuelne i u skladu sa trenutnim nivoom tehnološkog razvoja primene izvora jonizujućih zračenja u medicini. Mnoge od ovih tema značajne su i danas, što potvrđuje tezu za bez obzira na brz tehnološki razvoj, fundamentalna pitanja u zaštiti od zračenja u medicini, posebno pitanje implementacije standarda u kliničkoj praksi, ostaju i dalje otvorena.

### 9. Zahvalnica

Ovaj rad je podržan od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja, pod Projektom III43009

### 10. Literatura

- [1] O. Holmberg, R. Czarwinski, F. Mettler. The importance and unique aspects of radiation protection in medicine. *Eur J Radiol.* 76(1), 2010, 6-10.
- [2] Pravilnik o zaštitnim mjerama pri radu sa rentgenskim uređajima i radioaktivnim materijama, Službeni list br. 100/47, 1947.
- [3] O. Ciraj Bjelac, M. Kovacevic, G. Pantelic. On the Occasion of the 50<sup>th</sup> Anniversary of Organised Radiation Protection, *Nucl. Technol. Radiat. Prot.* 28, 3, 2013, I-IV.
- [4] Zakon o radijacionoj i nuklearnoj sigurnosti i bezbednosti, Sl. glasnik RS 95/18 i 10/19, 2019.
- [5] Radiation Protection and Safety in Medical Uses of Ionizing Radiation, IAEA Safety Standards Series No. SSG-46, IAEA, Vienna, 2018.
- [6] Magarašević M, Ojdanić Z. Stručna sprema medicinskog osoblja na radu sa dijagnostičkim rendgen aparatima. *IV simpozijum JDRZ, Zbornik radova*, Abs. -2, Baško Polje, 1969.
- [7] F. Čerkez, B. Simić. Probiemi radiološke zaštite pri dijagnostičkoj upotrebi



- rentgen aparata u zubarstvu. *IV simpozijum JDRZ, Zbornik radova*, Baško Polje, 1969, 755-762.
- [8] J. Jokić, G. Žarković, D. Panov, M. Kilibarda. Problemi zaštite pri primeni jonizujućih zračenja u medicinske i industrijske svrhe. *IV simpozijum JDRZ, Zbornik radova*, Baško Polje, 1969, Abs. P-1.
- [9] Z. Kalendarov. Aktualni problemi zaštite od zračenja u medicinskoj radioiologiji. *10. simpozijum JDZZ, Zbornik radova*, Portorož, 1981, 283-294.
- [10] I. Prlić, H. Cerovac, M. Novaković. Zaštita u medicinskim rendgen dijagnostikama Republike Hrvatske - danas. *XVI simpozijum JDZZ, Zbornik radova*, Neum, 1991, 243-247.
- [11] M. Vukčević, S. Stanković, M. Kovačević. Greške u QA kontroli dijagnostičkih rendgena, *XX simpozijum JDZZ, Zbornik radova*, Tara, 1999, 293-295.
- [12] J. Jokić, A. Marijanac. Stručnost kadrova koji rukuju rendgen aparatima u zdravstvenim ustanovama SFRJ. *V simpozijum JDRZ, Zbornik radova*, Nr.2/05, Bled, 1970, 1-12.
- [13] Ninković Ž., Babić R.: Neke vrednosti dodatnih doza ozračivanja stanovništva pri rendgenskim pregledima imere njihovog smanjenja. *IX simpozijum JDZZ, Zbornik radova*, 145-150, Jajce, 1977.
- [14] D. Križanović. Merenje i analiza podataka o izloženosti jonizujućim zračenjima lica koja rade sa izvorima jonizujućih zračenja i ostalog stanovništva. *XII simpozijum JDZZ, Zbornik radova*, Ohrid, 1983, 428-431.
- [15] O. Ciraj-Bjelac, D. Arandjic, P. Božović, D. bKošutić. Procena doze od medicinskih izlaganja u Republici Srbiji, *XXVII simpozijum DZZ SCG, Zbornik radova*, Vrnjačka Banja, 2013, 181-184.
- [16] J. Jokić, A. Marijanac, B. Simić B. Izloženost stanovništva jonizujućem zračenju kao posledica administrativnih zahtjeva. *VI simpozijum JDZZ, Zbornik radova*, Ohrid, 1972, 617-618.
- [17] J. Jokić, A. Marijanac S. Jokić, D. Perović, S. Čaušević. Analiza razlika i kriterija upućivanja pacijenata na rendgen dijagnostičke preglede pluća. *VII simpozijum JDZZ, Zbornik radova*, Kaštel Stari, 1973, 638-645.
- [18] I. Ružička. Udio opravdanosti upućivanja na rendgen dijagnostičke pretrage u izloženosti stanovništva ionizirajućem zračenju. *XI simpozijum JDZZ, Zbornik radova*, Portorož, 1981, 321-326.
- [19] J. Aredljan, D. Križanović, D. Radočaj. Kriteriji prilikom upućivanja na rentgen preglede u opštoj bolnici u Zrenjaninu 1982. godine. *XII simpozijum JDZZ, Zbornik radova*, Ohrid, 1983, 569-574.
- [20] M. Tomašević, R. Radovanović, J. Simonović, Z. Minevski. Procena opravdanosti sistematskog rendgen-dijagnostičkog ispitivanja pluća stanovnika Beograda. *XIII simpozijum JDZZ, Zbornik radova*, Pula, 1985, 281-284.
- [21] M. Tomašević, D. Križanović, D. Petrović. Ozračenost dojki pri mamografiji. *XII simpozijum JDZZ, Zbornik radova*, Ohrid, 1983, 599-604.
- [22] S. Strinić, M. Mušanović, A. Drljević, B. Dresto. Apsorbovana doza u mamografiji.

grafiji. *XIII simpozijum JDZZ, Zbornik radova*, Pula, 1985, 301-304.

- [23] M. Mušanović, S. Strinić, A. Drljević, B. Dresto. Rizik mamografije kod pojave raka dojke izazvanih jonizujućim zračenjima. *XV simpozijum JDZZ, Zbornik radova*, Priština, 1989, 309-314.
- [24] S. Ignjatovic. Spektar x zračenja 6-ventilnog Siemens ro aparata pri anodnom naponu od 65, 70, 80 kV, *JDZZ, Zbornik rezimea*, Baško Polje, 1969,133-134.
- [25] H. Cerovac, Z. Benčak, R. Hufnu. Mjerenje radnog napona dijagnostičke rendgen cijevi pomoću scintilacionog kristalnog spektrometra. *VII simpozijum JDZZ, Zbornik radova*, Kaštel Stari, 1973, 42-44.
- [26] M. Vukčević, M. Ateljević, S. Stanković, I. Avramović, M. Kovačević. Profil polja kod kompjuterizovanog tomografa, *XVIII simpozijum JDZZ, Zbornik radova*, Bečići, 1995, 169-173.

### **RADIATION PROTECTION IN MEDICINE: FIRST 55 YEARS**

**Olivera CIRAJ BJELAC**

University of Belgrade, Vinca Institute of Nuclear Sciences, Belgrade, Serbia,  
[ociraj@vinca.rs](mailto:ociraj@vinca.rs)

#### **ABSTRACT**

Radiation protection in medicine has been a topic of professional radiation protection since the beginning of the establishment of this area as an independent scientific and professional discipline. During 55 years long history of the Society for Radiation Protection, radiation protection in medicine was represented at all symposiums in a way that reflects contemporary topics in this field. The paper presents an overview of topics related to radiation protection in medicine on Symposiums of the Radiation Protection Society.

## VERIDIC: VALIDATION AND ESTIMATION OF RADIATION SKIN DOSE IN INTERVENTIONAL CARDIOLOGY

**Olivera CIRAJ BJELAC<sup>1</sup>, Nikola KRŽANOVIĆ<sup>1</sup>, Miloš ŽIVANOVIĆ<sup>1</sup>,  
Valentin BLIDÉANU<sup>2</sup>, Francesca DE MONTE<sup>3</sup>, Marine DELEU<sup>4</sup>,  
Ann FEGHALI JOËLLE<sup>5</sup>, Aoife GALLAGHER<sup>6</sup>, Željka KNEŽEVIĆ<sup>7</sup>,  
Carlo MACCIA<sup>8</sup>, Françoise MALCHAIR<sup>8</sup>, Johann PLAGNARD<sup>2</sup>,  
Marta SANS MERCE<sup>4</sup>, Georgios SIMANTIRAKIS<sup>9</sup> and Jérémie DABIN<sup>10</sup>**

1)Vinca Institute of Nuclear Sciences (VINCA), University of Belgrade, Belgrade, Serbia; [ociraj@vinca.rs](mailto:ociraj@vinca.rs), [krzanovic@vinca.rs](mailto:krzanovic@vinca.rs), [milosz@vinca.rs](mailto:milosz@vinca.rs)

2)French Atomic Energy Commission (CEA), Gif-sur-Yvette, France, [valentin.blideanu@cea.fr](mailto:valentin.blideanu@cea.fr)

3)Veneto Institute of Oncology (IOV), Padua, Italy, [francesca.demonte@iov.veneto.it](mailto:francesca.demonte@iov.veneto.it)

4)University Hospital of Geneva (HUG) and University Hospital of Lausanne (CHUV), Switzerland, [marta.sansmerce@hcuge.ch](mailto:marta.sansmerce@hcuge.ch)

5)Paris Sud University Hospitals (APHP), Le Kremlin-Bicêtre, France, [joelleann.feghali@aphp.fr](mailto:joelleann.feghali@aphp.fr)

6)University Hospital Limerick (UHL), Limerick, Ireland, [aoife.gallagher@hse.ie](mailto:aoife.gallagher@hse.ie)

7)Ruđer Bošković Institute (RBI), Zagreb, Croatia, [zknez@irb.hr](mailto:zknez@irb.hr)

8)Centre d'Assurance de qualité des Applications Technologiques dans le domaine de la Santé (CAATS), Sèvres, France, [carlo.maccia9@gmail.com](mailto:carlo.maccia9@gmail.com), [francoise.malchair@zephyra.be](mailto:francoise.malchair@zephyra.be)

9)Greek Atomic Energy Commission (GAEC), Athens, Greece, [georgios.simantirakis@eeae.gr](mailto:georgios.simantirakis@eeae.gr)

10)Belgian Nuclear Research Centre (SCK•CEN), Mol, Belgium; [jeremie.dabin@sckcen.be](mailto:jeremie.dabin@sckcen.be)

### ABSTRACT

*In interventional cardiology (IC), patients may be exposed to high doses to the skin resulting in tissue reactions (skin burns) following single or multiple procedures. To address this issue, online and offline software has been developed to estimate the maximum skin dose (MSD) to the patient from IC procedures. However, the capabilities and accuracy of such skin dose calculation (SDC) software to estimate MSD and 2D dose distributions markedly differ among vendors. Hence, this project focuses on the harmonisation of RDSR (radiation dose structured report) and on the validation of SDC software products in IC, which will optimise radiation protection of patients. The outcome of the project will include the standards for digital dose reporting, development of protocols for acceptance testing and Quality Control (QC) of SDC software and setting of diagnostic reference levels per clinical complexity, assessing the frequency of high-dose procedures as well as dose reduction strategies based on the multi-centric data collection. This paper focuses on the work performed to investigate performance of solid state dosimeters used in clinical environment.*

## 1. Introduction

Fluoroscopically guided interventional procedures in interventional radiology (IR) and cardiology (IC) are techniques that have had increased use in the last decades. Although, they reduce most of the risks to patients, prolonged exposures due to complicated interventional procedures or use of inappropriate equipment may result in high doses to both patients and staff members, in particular, with potentially high radiation doses to the patient's skin. Numerous cases of radiation-induced deterministic tissue reactions following exposure in interventional procedures, such as erythema and hair loss, have been reported in the literature [1-3]. Recommendations for operators performing interventional procedures were published a few decades ago and the need for measuring patient dose was expressed [4]. Since then, a huge effort has been made to identify practical and easy-to-use methods to monitor and reduce patient skin doses in interventional procedures [2-3]. The steady increase in the number of IC procedures over the years has further strengthened that need.

## 2. Assessment of skin dose in interventional procedures

Until recently, measurements using passive dosimeters were the only way to assess patient's maximum skin dose (MSD) accurately. However, as these measurements are tedious and expensive to undertake, they could not be performed routinely at clinics and a more convenient means to estimate MSD was needed. Automated online and offline skin dose calculation (SDC) solutions have therefore been developed. Online software tools utilise live data streaming from the angiographic system to calculate skin doses directly during intervention, while offline solutions use data stored in the radiation dose structured report (RDSR) to compute skin exposure after the procedure. Currently, most vendors have implemented some form of skin dose calculations in their angiographic systems: from simple solutions only computing maximum cumulative air kerma dose specific angulations, values, to more advanced software solutions calculating a 2D distribution of the skin dose. Offline SDC software solutions have also been developed in research-based institutions or for commercial purposes, both as stand-alone products or integrated into the dose archiving and communication systems of the hospital. However, the capabilities and accuracy of such SDC software to estimate MSD and 2D dose distributions markedly differ among vendors; and the reporting of the MSD estimate and the related accuracy in the RDSR is neither systematic nor harmonised. In addition, there is currently no acceptance testing and quality control (QC) protocols of such systems.

## 3. VERIDIC project: accuracy of skin dose calculation software in interventional cardiology

Hence, the VERIDIC project (Validation and Estimation of Radiation skIn Dose in Interventional Cardiology), funded under European Joint Programme for the Integration of Radiation Protection Research, H2020 (Grant agreement No 662287), focuses on the harmonisation of RDSR and on the validation of SDC software products in IC, which will optimise radiation protection of patients. The project involves 10 partners from 8 European countries. It started on the 1 February 2018 and will run for 2 years. The aims, methodology and some of the preliminary results of the VERIDIC project are presented

in this work. The project is divided in three work packages (WP), while specific aims of each WP can be summarized as:

- Standards for digital dose reporting: 1) A complete list of parameters necessary to calculate MSD and 2D dose distribution (tube voltage, filtration, beam orientation, table position, backscatter factor, table attenuation, air KERMA-to-skin dose conversion coefficient, etc.); 2) The recording (format and content) of MSD values and 2D dose distributions in the RDSR.
- Protocols for acceptance testing and QC of SDC software, including: 1) comprehensive calibration of field dosimeters to be used for software benchmarking, including estimation of associated uncertainty; 2) acceptance testing of online and offline software in simple irradiation conditions; 3) QC tests of the software in clinical settings reproducing complex cardiac procedures such as Chronic Total Occlusions (CTO).
- Interventional Diagnostic Reference Levels (DRL) and frequency of high-dose procedures as well as dose reduction strategies will be established thanks to a multi-centric data collection.

#### 4. Methodology of the VERIDIC project

*WP1. Standards for digital dose reporting:* SDC software solutions are analysed according to their calculation algorithms and their capabilities. In particular, the factors considered in the calculation of the MSD estimates (such as the backscatter, the table attenuation or the patient's body shape) and how they are reported by different manufacturers are investigated. The availability of the parameters mandatory for MSD estimate are evaluated within a sample of RSDR collected in the participating hospitals. Furthermore, recommendations for harmonisation of the MSD reporting among different systems will be formulated.

*WP2. Protocols for acceptance testing and QC of SDC software:* Most commonly used field dosimeters, Gafchromic films and thermoluminescent dosimeters (TLDs) and semiconductor dosimeters (multimeters), are characterised and calibrated for a wide range of conditions encountered in IC, leading to a precisely computed uncertainty. Protocols for acceptance and QC tests to be used by medical physicists in clinical practice will be developed. Those protocols will also enable the comparison of different SDC software. Tolerance levels and technical criteria for acceptance of SDC systems will be proposed. Techniques and existing equipment, such as phantoms and dosimeters, readily accessible to medical physicists in clinical environment will be favoured in the QC approach. The QC and acceptance protocols will be first tested on angiographic systems equipped with existing, online SDC software. The RDSR of these experiments will be extracted from the angiographic systems and input in available offline SDC software for skin dose calculations. Calculated results will be compared with reference measurements. Exposure parameters of high-dose procedures will be extracted from the RDSR collected in several European hospitals (see below). Those procedures will be repeated on a Rando-Alderson phantom and measured using TLDs and Gafchromic films. The results will be used for comparison of reference dose measurements with dose estimates using online and offline SDC in realistic clinical conditions.

*WP 3. Interventional Reference Levels and dose reduction strategies:* In at least 12 European hospitals, 19 angiographic units with RDSR/dose reports, the project partners

will collect at least 50 cardiac therapeutic procedures per centre with RDSR and clinical indications, in order to develop reference levels. Skin dose will be calculated on different SDC software solutions depending on the availability of RDSR. Statistical analysis will be performed to find correlation between clinical parameters (procedure as well as clinical parameters) and patient exposure on one side as well as technical parameters (from RDSR) and patient exposure on another side. Reference levels will be developed based on clinical complexity. Moreover, the frequency of high dose procedures will be assessed and recommendations for patient dose optimization will be derived.

### **5. Characterisation of the solid-state multimeters used in clinical practice**

One of the tasks under *WP2. Protocols for acceptance testing and QC of SDC software* Task 2.1, is related to the calibration of field dosimeters and traceability to a national standard. Various examination techniques are employed in diagnostic radiology using tube voltages from approximately 20 kV to 150 kV. An accurate measurement of dose requires correct calibration of the instrumentation in radiation fields of known properties. In diagnostic radiology, the specification of radiation qualities is important as the response of all dosimeters depends, at least to a certain extent, on the spectral distribution of the X-rays employed. Ionization chambers have been the standard instruments used for diagnostic radiology dosimetry and quality assurance assessments for many years. Dosimeters based on semiconductor technology are now becoming widely available, and as the semiconductor detectors are smaller they are more convenient to use in many situations. Diagnostic dosimeters should be designed in compliance with IEC 61674 standard [5], which applies both to dosimeters equipped with ionization chambers and to semiconductor detectors. Traditionally, the main disadvantage of these devices has been their energy dependence of response which differs considerably from that of ionization chambers. Semiconductor diodes do not have the inherent relatively constant response with photon energy in the diagnostic X-ray range for measurement of air kerma that is a feature of ion chambers. Multiple semiconductor elements are incorporated into the semiconductor detector used for X-ray dosimetry. In order to make an assessment of radiation quality that is used to derive a dose compensation which is applied automatically. The angular dependence of measurements made using semiconductors is different from that of ionisation chambers. The commercial semiconducting detectors are mounted on lead backing plates, to attenuate radiation incident from the rear. This is required to ensure that the radiation incident on the detector elements represents that transmitted through filters at the front of the detector i.e. to ensure that the automatic energy compensation is applied correctly. As a result, it is the air kerma incident from the direction of the primary beam that is measured. Nevertheless, these types of detectors have found many applications in routine clinical measurements in hospitals. Most of them are capable of determining the air kerma, tube voltage, half value layer (HVL), and exposure time, as well as the output waveform from a single irradiation.

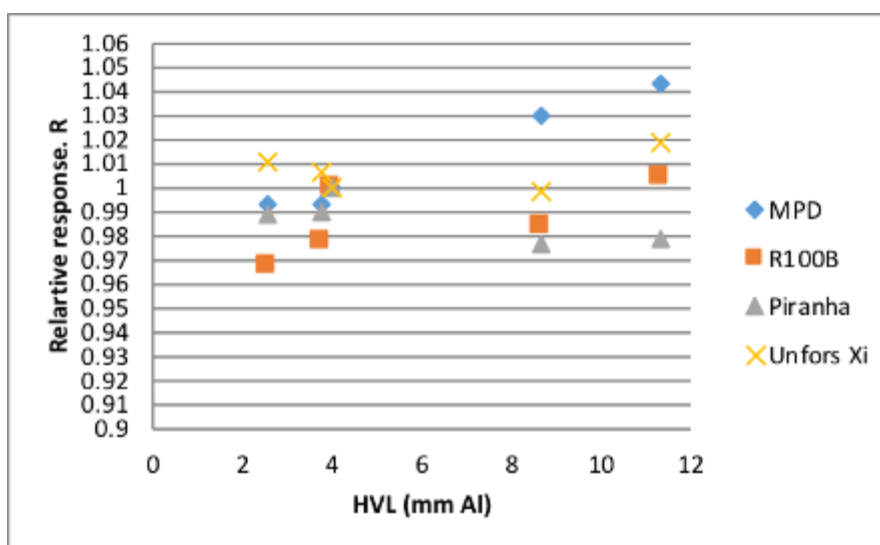
The dosimeters are routinely calibrated at the following standard radiation qualities (reference beam qualities according to IEC 61267): RQR 3 (50 kV) - RQR 5 (70 kV) - RQR 6 (80 kV) - RQR 8 (100kV) - RQR 9 (120 kV) which are not necessarily representative of the settings used clinically. The performance testing of X-ray equipment often requires the assessment of doses and dose rates for X-ray beams with



many different radiation qualities and in non-standard conditions. The combination of different energy and angular responses will influence detector performances in different X-ray fields, and could lead to significant differences in air kerma measurements. If different dosimeters are used for QC assessments, users must understand what is being recorded and how the measurements are influenced by the detector characteristics.

**Table 1. Solid state dosimeters tested in different standard and non-standard beam qualities.**

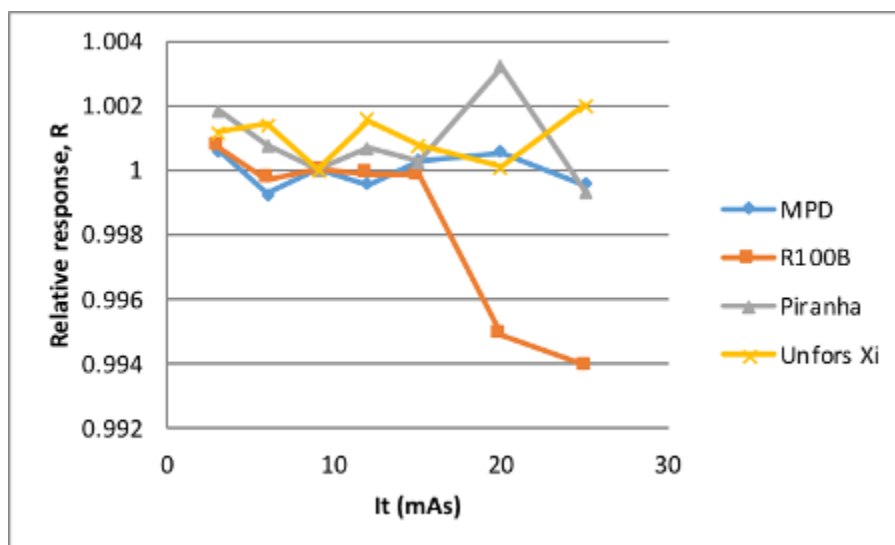
No	Manufacturer	Model	X-ray tube voltage or energy	Dose range	Dose rate range
1	RTI, Moldaln, Sweden	MPD, Barrcuda	35 – 155 kV	15 nGy – 1000 Gy	15 nGy/s – 450 mGy/s
2	RTI, Moldaln, Sweden	R100, Barrcuda	Not specified	2 nGy – 10 kGy	0.04 $\mu$ Gy/s – 160 mGy/s
3	RTI, Moldaln, Sweden	Black Piranha	50–150 kVp, 1–90 mm Al or 2 mm Cu	0.1 nGy–1500 Gy	1 nGy/s–320mGy/s
4	RaySafe, RTI, Moldaln, Sweden	Xi R/F Classic	35 – 160 kV/kVp (for up to 0.5 mm Cu or equivalent)	10 nGy – 9999 Gy	10 nGy/s – 1000 mGy/s



**Figure 1. Energy response of four different solid -state dosimeters.**

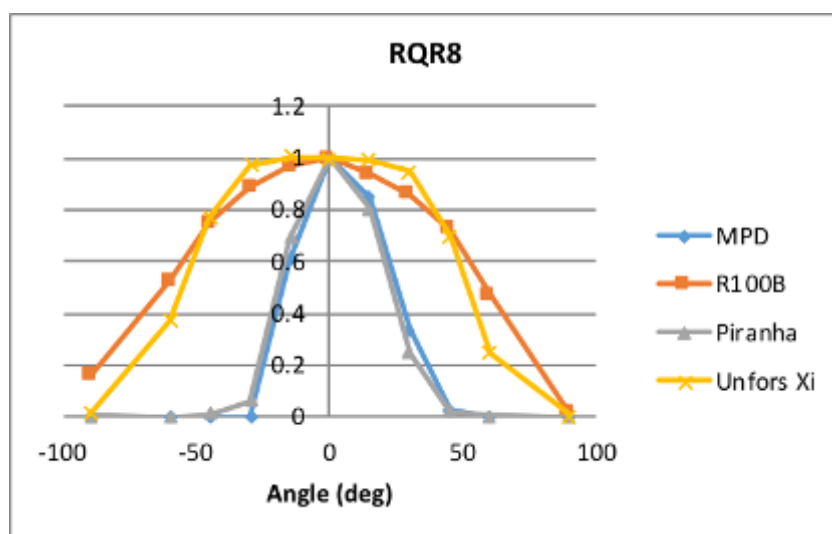
Therefore, the performance of four different semiconductor dosimeters/multimeters (Table 1) was investigated, both in standard and non-standard conditions. Tested parameters evaluated during characterisation of the solid-state dosimeters were: in air comparison, angular response, in air comparison for energy response and response linearity. The X –ray beams were generated using an X-ray unit Hopewell Design, with X-ray tube voltage (10-225) kV, whereas the dosimetry standard was an ionization chamber Exradin A3 with reference class electrometer Unidos (PTW, Germany).





**Figure 2. Linearity of four different solid -state dosimeters.**

Preliminary results are presented in Figures 1-3, indicating consistent performance.



**Figure 3. Angular response of four different solid -state dosimeters.**

## 6. Acknowledgement

This work has been supported by the European Commission, within the CONCERT project. This project has received funding from the Euratom research and training programme 2014-2018 under grant agreement No 662287.

## 7. References

- [1] S. Balter, J.W. Hopewell, D.L. Miller, L.K. Wagner, M.J. Zelefsky. Fluoroscopically Guided Interventional Procedures: A Review of Radiation Effects on Patients' Skin and Hair, *Radiology*, 254, 2010, 326-341.

- [2] J. Domienik, S. Papierz, J. Jankowski, J.Z. Peruga, Werduch A., Religa W. Correlation of patient maximum skin doses in cardiac procedures with various dose indicators. *Radiat. Prot Dosim.* 132, 2008,18-24.
- [3] W. Jaschke, M. Schmuth, A. Trianni, G. Bartal. Radiation-Induced Skin Injuries to Patients: What the Interventional Radiologist Needs to Know. *Cardiovasc Intervent Radiol.* 40, 2017, 1131-1140.
- [4] E. Vano, L. Arranz, J. M. Sastre, C. Moro, A. Ledo, M. T. Gárate and I. Minguez. Radiation protection considerations based on some cases of patient skin injuries in interventional cardiology. *Br J Radiol.* 71, 1998, 510-6.
- [5] International Electrotechnical Commission, Medical electrical equipment - Dosimeters with ionization chambers and/or semiconductor detectors as used in X-ray diagnostic imaging, IEC 61674:2012, 2012.

**VERIDIC: VALIDACIJA I PROCENA DOZE NA POVRŠINI KOŽE  
ZAPACIJENTE U INTERVENTNOJ KARDIOLOGIJI**

**Olivera CIRAJ BJELAC<sup>1</sup>, Nikola KRŽANOVIĆ<sup>1</sup>, Miloš ŽIVANOVIĆ<sup>1</sup>,  
Valentin BLIDÉANU<sup>2</sup>, Francesca DE MONTE<sup>3</sup>, Marine DELEU<sup>4</sup>,  
Ann FEGHALI JOËLLE<sup>5</sup>, Aoife GALLAGHER<sup>6</sup>, Željka KNEŽEVIĆ<sup>7</sup>,  
Carlo MACCIA<sup>8</sup>, Françoise MALCHAIR<sup>8</sup>, Johann PLAGNARD<sup>2</sup>,  
Marta SANS MERCE<sup>4</sup>, Georgios SIMANTIRAKIS<sup>9</sup> i Jérémie DABIN<sup>10</sup>**

1) Institut za nuklearne nauke Vinča (VINCA), Univerzitet u Beogradu, Beograd, Srbija,  
[ociraj@vinca.rs](mailto:ociraj@vinca.rs), [krzanovic@vinca.rs](mailto:krzanovic@vinca.rs), [milosz@vinca.rs](mailto:milosz@vinca.rs)

2) Francuska komisija za atomsku energiju (CEA), Žif sir Ivet, Francuska,  
[valentin.blideanu@cea.fr](mailto:valentin.blideanu@cea.fr)

3) Institut za onkologiju Veneto (IOV), Padova, Italija, [francesca.demonte@iov.veneto.it](mailto:francesca.demonte@iov.veneto.it)

4) Univerzitetaska bolnica Ženeve (HUG) i Univerzitetaska bolnica Lozane (CHUV),  
Švajcarska, [marta.sansmerce@hcuge.ch](mailto:marta.sansmerce@hcuge.ch)

5) Univerzitetске болнице у Паризу (APHP), La Kremlin Biset, Francuska,  
[joelleann.feghali@aphp.fr](mailto:joelleann.feghali@aphp.fr)

6) Univerzitetaska bolnica u Limeriku (UHL), Limerik, Irska, [aoife.gallagher@hse.ie](mailto:aoife.gallagher@hse.ie)

7) Institut Ruđer Bošković (RBI), Zagreb, Hrvatska, [zknez@irb.hr](mailto:zknez@irb.hr)

8) Centar za osiguranje kvaliteta tehnoloških aplikacija u oblasti zdravstva (CAATS),  
Sevr, Francuska, [carlo.maccia9@gmail.com](mailto:carlo.maccia9@gmail.com), [francoise.malchair@zephyra.be](mailto:francoise.malchair@zephyra.be)

9) Grčka komisija za atomsku energiju (GAEC), Atina, Grčka,  
[georgios.simantirakis@eea.gr](mailto:georgios.simantirakis@eea.gr)

10) Belgijski centar za nuklearna istraživanja (SCK•CEN), Mol, Belgija,  
[jeremie.dabin@sckcen.be](mailto:jeremie.dabin@sckcen.be)

**SADRŽAJ**

Interventne procedure u radiologiji i kardiologiji povezani su s visokim dozama za kožu pacijenta i potencijalnim radijacionim povredama kože. Različita metodologije i rešenja razvijene su za procenu maksimalne doze za kožu, čija se svojstva, uključujući i tačnost značajno razlikuju. U radu su prokazani ciljevi, metode i preminiran a rešenja projekta VERIDIC usmerenoj na validaciju zaličitih offline i online softvera za procenu doze za kožu pacijenta u intervenatnoj kardiologiji.

## PRIMENA $^{177}\text{Lu}$ U TERAPIJI NEUROENDOKRINIH TUMORA NA INSTITUTU ZA ONKOLOGIJU VOJVODINE - PRVA ZAPAŽANJA I PREDLOG MERA ZAŠTITE OD ZRAČENJA

Milana MARJANOVIĆ<sup>1,2</sup>, Silvija LUČIĆ<sup>1</sup>, Nataša TODOROVIĆ<sup>2</sup>,  
Predrag KUZMANOVIĆ<sup>2,3</sup> i Jovana NIKOLOV<sup>2</sup>

- 1) Institut za onkologiju Vojvodine, Sremska Kamenica, Srbija,  
[milana.marjanovic92@gmail.com](mailto:milana.marjanovic92@gmail.com), [silvijalu@gmail.com](mailto:silvijalu@gmail.com)
- 2) Univerzitet u Novom Sadu, Prirodno-matematički fakultet, Novi Sad, Srbija,  
[natasa.todorovic@df.uns.ac.rs](mailto:natasa.todorovic@df.uns.ac.rs), [jovana.nikolov@df.uns.ac.rs](mailto:jovana.nikolov@df.uns.ac.rs)
- 3) Visoka medicinska i poslovno-tehnička škola strukovnih studija, Šabac, Srbija,  
[predrag.kuzmanovic@vmpts.edu.rs](mailto:predrag.kuzmanovic@vmpts.edu.rs)

### SADRŽAJ

*Implementacija novih radionuklidnih terapija sa radioizotopima koji su kombinovani emiteri sa fizičkim osobinama beta i gama zračenja, u svakodnevnoj kliničkoj praksi pored medicinskog pristupa akvizicije novih tehnologija sa sobom nosi i pretpostavku angažmana i medicinskog fizičara sa zadatkom planiranja i projektovanja mera radijacione zaštite kako osoblja tako i pacijenata. Uvođenje novog radionuklida  $^{177}\text{Lu}$  u terapiji neuroendokrinih tumora na Institutu za onkologiju Vojvodine jedan je od takvih primera neophodnosti bliske saradnje medicinskih fizičara sa lekarima, radiološkim i laboratorijskim tehničarima i radiohemičarima. Cilj ovog rada je približiti fizičke aspekte radionuklida  $^{177}\text{Lu}$  osoblju koji manipulišu sa istim, kao i predlogom i projektom mera zaštite tokom manipulacije i aplikacije radionuklidne terapije obležene sa  $^{177}\text{Lu}$ , a u cilju postizanja maksimalne zaštite osoblja pri radu sa ovim radionuklidom.*

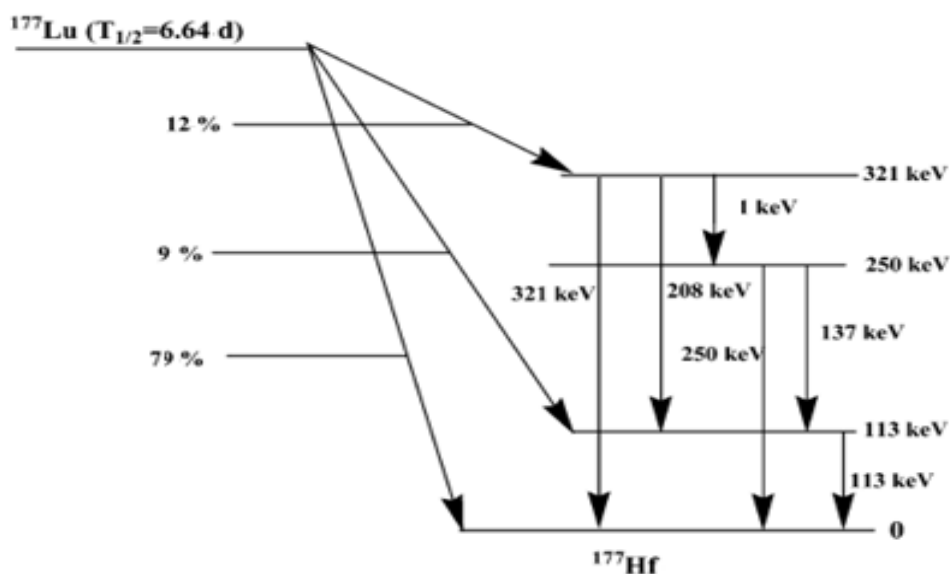
### 1. Uvod

Peptid-receptor radionuklidna terapija predstavlja molekularno-ciljanu radiološku terapiju, koja podrazumeva sistematsku administraciju ili lokalnu aplikaciju u regiji radioobeleženog peptida sa odgovarajućim radionuklidom koji emituje  $\beta^-$  zračenje, dizajniranog za ciljanje, sa velikim afinitetom i specifičnošću, prekomernih receptora kod tumora [1-5]. U Centru za nuklearnu medicinu, Instituta za onkologiju Vojvodine ovakav vid terapije se izvodi intravenskim davanjem peptida  $^{177}\text{Lu}$ -DOTATATE, obeleženog sa radionuklidom  $^{177}\text{Lu}$ , gde je neophodno postojenje ekspresije somatostatinskih receptora. Ovaj oblik terapije primenljiv je kod pacijenata koji imaju proširenu (metastatsku) bolest, odnosno kod kojih ne postoji mogućnost hirurškog lečenja [1-5]. Terapija se primenjuje kod pacijenata sa neuroendokrinim tumorom. Neuroendokrini tumori spadaju u grupu tumora koji pokazuju značajnu ekspresiju somatostatinskih receptora na površini tumorskih ćelija [1-5].

U terapijske svrhe  $^{177}\text{Lu}$ -DOTATATE se koristi zbog kratkodometnih  $\beta^-$  čestica, međutim  $^{177}\text{Lu}$  emituje i  $\gamma$  fotone koji predstavljaju opasnost od spoljašnjeg zračenja za one koji dolaze u kontakt sa pacijentom, posebno bolničko osoblje, porodica i javnost. Izuzev ovoga, drugi izvor rizika proizilazi iz bioloških izlučevina radiofarmaceutika koji se prvenstveno javljaju kroz urin [6]. Zbog svih ovih razloga potrebno je obratiti posebnu pažnju na zaštitu od zračenja profesionalno izloženog osoblja i stanovništva, kako nalaže Zakonska regulativa Republike Srbije, kao i međunarodne preporuke [7, 8]. Uvođenje novog radionuklida  $^{177}\text{Lu}$  u terapiji neuroendokrinih tumora na Institutu za onkologiju Vojvodine zahteva i angažovanje medicinskog fizičara u svrhu planiranja i projektovanja mera radijacione zaštite kako osoblja tako i pacijenata i javnosti. Cilj ovog rada je približiti fizičke aspekte radionuklida  $^{177}\text{Lu}$  osoblju koji manipulišu sa istim, kao i predlogom i projektom mera zaštite tokom manipulacije i aplikacije radionuklidne terapije obležene sa  $^{177}\text{Lu}$ , a u cilju postizanja maksimalne zaštite osoblja pri radu sa ovim izvorom.

### 2. Metode i merenja

Radionuklid  $^{177}\text{Lu}$  se raspada do stabilnog  $^{177}\text{Hf}$  sa fizičkim periodom od 6,647 dana [9], tako što dolazi do emisije  $\beta^-$  čestica i  $\gamma$  fotona. Pojednostavljena šema raspada je prikazana na Slici 1. Srednje energije  $\beta^-$  čestica su 48 keV (zastupljenost 12%), 112 keV (zastupljenost 9%) i 149 keV (zastupljenost 79%) sa maksimalnom energijom od 498 keV [9]. Ovaj radionuklid emituje i  $\gamma$  fotone energija 113 keV (zastupljenost 6%) i 208 keV (zastupljenost 10%) [9]. Zbog osobine da pored emitovanja kratkodometnih elektrona emituje i fotone, upotrebom radionuklida  $^{177}\text{Lu}$  pored kontaktne terapije omogućava se i imidžing pacijenta.



Slika 1. Šema raspada  $^{177}\text{Lu}$ .

U tabeli 1 su upoređene fizičke karakteristike svih radionuklida koji se koriste u Centru za nuklearnu medicinu, radi lakšeg razumevanja istih [9].

Tabela 1. Fizičke karakteristike radionuklida, koji se koriste u Centru za nuklearnu medicinu.

Karakteristika/radionuklid	<sup>18</sup> F	<sup>99m</sup> Tc	<sup>131</sup> I	<sup>177</sup> Lu
Period polu raspada	109,77 min	6 h	8,03 d	6,65 d
Tip zračenja	β <sup>+</sup>	γ	β <sup>-</sup> , γ	β <sup>-</sup> , γ
Energija γ zračenja [keV]		141	365; 637	113; 208
Srednja energija β zračenja [keV]	250		192	48; 112; 149
Maksimalna energija β zračenja [keV]			807	498

Prodornost radionuklida <sup>177</sup>Lu u vodi/mekom tkivu pri srednjoj energiji β<sup>-</sup> čestice je oko 0,25 mm, dok je prodornost u vodi/mekom tkivu, pleksiglasu, aluminijumu i olovu pri maksimalnoj energiji β<sup>-</sup> čestica oko 1,9 mm, 1,6 mm, 0,8 mm, 0,3 mm, respektivno [10]. Radionuklid <sup>177</sup>Lu se proizvodi u nuklearnom reaktoru aktivacijom neutrona, <sup>176</sup>Lu(n, γ) <sup>177</sup>Lu [3].

Celokupna priprema i administracija radiofarmaceutika se sprovodi na način koji će kontaminaciju i ekpoziciju smanjiti na minimum. S obzirom da se radionuklidi ne proizvode, već se dopremaju do Instituta za onkologiju Vojvodine, zaposleni prvo treba da pregledaju njegove karakteristike označene na ambalaži. Vreme provedeno u radu sa radionuklidima treba da bude što je kraće moguće, nepohodna je upotreba zaštitne opreme i što je moguće veća udaljenost od izvora zračenja, kako i nalažu nacionalne i međunarodne preporuke [7, 8].

Pripremu peptid-receptor radionuklidne terapije obavlja hemičar u radiohemijскоj laboratoriji Centra za nuklearnu medicinu. Priprema počinje od otvaranja kutije sa radionuklidom, otvaranja kontejnera sa radionuklidom, provera aktivnosti radionuklida pomoću doze kalibratora, zatim vraćanje flašice sa radionuklidom u kontejner i dopremanje do lifta pomoću koga se radionuklid, najkraćim i bezbednim putem, transportuje do terapijskog bloka Centra za nuklearnu medicinu.

Aplikacija peptid-receptor radionuklidne terapije, uz adekvatnu prethodu pripremu pacijenta, vrši se u terapijskom bloku Centra za nuklearnu medicinu. Aplikaciju obavlja laboratorijski tehničar uz pomoć lekara specijaliste. U cilju zaštite bubrega neposredno pred aplikaciju i nakon same aplikacije pacijentima se intravenski aplikuju pozitivno naelektrisane aminokiseline čime se sprečava proksimalna tubularna reabsorpcija radiopeptida [1, 2]. Sam radiopeptid se pre davanja takođe razređuje fiziološkim rastvorom, tako da ukupni volumen bude između 10 ml i 100 ml u zavisnosti od toga kakav se infuzioni sistem koristi, a daje se polako intravenski u trajanju od oko 30 minuta [1, 2]. Preporučena doza radiofarmaceutika je 5,5 GBq do 7,4 GBq (150 mCi do 200 mCi), 3-5 ciklusa sa vremenskim intervalom od 10-12 nedelja [1, 2].

Obzirom da pacijent odmah nakon aplikacije terapije postaje izvor jonizujućeg zračenja, zbog γ fotona koje emituje radionuklid, direktan kontakt sa pacijentom je limitiran i zavisi od postojećih tegoba pacijenta i rezultata pratećeg monitoringa, kao i eventualne potrebe za simptomatskom terapijom. Komunikacija medicinskog osoblja i pacijenta može se takođe obavljati putem telefona, interfona, kao i preko olovnog prozora na vratima od terapijske sobe. Pacijent napušta terapijski blok Centra za nuklearnu medicinu kada ispuni uslov naveden u „Pravilnik o primeni izvora jonizujućih zračenja u medicini“ član 41 [7]. Ovaj deo zaštite od zračenja je izuzetno bitan, prvenstveno za porodicu pacijenta koji je primio ovaj vid terapija, ali i za javnost [5, 6, 13].

Merenja su izvršena u Centru za nuklearnu medicinu, pri čemu je merena jačina ambijantalnog ekvivalenta doze H\*(10), pomoću detektora ATOMTEX 6101 koje je

izvršila akreditovana laboratorija za ispitivanje „KVARAK d.o.o.“. Ovaj detektor je lagan, prenosiv i jednostavan za rukovanje i sastoji se od scintilacionog NaI detektora i Gajger-Milerovog brojača. Mereni opseg brzina doza je od 0,01  $\mu\text{Sv/h}$  do 10  $\text{mSv/h}$ , a opseg energija  $\gamma$  zračenja je od 20 keV do 3 MeV, dok je merna nesigurnost instrumenta maksimum  $\pm 20\%$ .

$H^*(10)$  je merena u nekoliko pozicija koje su značajne u toku procesa primene ove terapije, u radiohemijskoj laboratoriji i terapijskom bloku, dok je efektivna godišnja doza računata prema sledećoj formuli:

$$E = H^*(10) \cdot \omega_T \cdot t \quad (1)$$

gde je  $E$  (Sv) - efektivna doza za jednu godinu,  $H^*(10)$  (Sv/h) - srednja vrednost jačine ambijentalnog ekvivalenta doze za tkivo na dubini od 10 mm,  $\omega_T$  - težinski faktor tkiva/organa i  $t$  - period izloženosti zračenju. Pri računu se koristio težinski faktor za ozračivanje celog tkiva vrednosti 1. S obzirom da je upotreba ovog radionuklide tek početak njene implementacije u terapijske svrhe, planiran broj procedura u mesecu je 1, što znači ukupno 12 na godinu dana. Vreme zadržavanja hemičara tokom obavljanja pripreme iznosi nekoliko minuta, za slučaj proračuna uzećemo da je to vreme 10 minuta. Vreme zadržavanja laboratorijskih hemičara tokom aplikacije se kreće od 30 minuta do sat vremena, a za slučaj proračuna uzećemo da je to vreme 1h.

### 3. Rezultati

Izmerena jačina ambijentalnog ekvivalenta doze zračenja prirodnog novoa zračenja (fona) je 0,08  $\mu\text{Sv/h}$  na merenoj lokaciji. Rezultati merenja jačine ambijentalnog ekvivalenta doze u određenim pozicijama u radiohemijskoj laboratoriji i terapijskom bloku Centra za nuklearnu medicinu, kao i procenjena efektivna doza za godinu dana za profesionalno izloženo osoblje su prikazani u tabeli 2.

**Tabela 2. Rezultati merenja jačine ambijentalnog ekvivalenta doze i proračunate vrednosti efektivne doze.**

Opis pozicije	$H^*(10)$ ( $\mu\text{Sv/h}$ )	E ( $\mu\text{Sv}$ )
<b>RADIOHEMIJSKA LABORATORIJA</b>		
Kontaktno na kutiji u kojoj se nalazi $^{177}\text{Lu}$	4,9	9,8
Kontaktno na kontejneru u kome se nalazi $^{177}\text{Lu}$	4,2	8,4
Otvaranje kontejnera	8,4	96,8
Operater	1,75	3,5
Doze kalibrator	2,2	4,4
Spremljena doza	63	126
<b>TERAPIJSKI BLOK</b>		
Vrata terapijske sobe dok je pacijent uzimao terapiju	0,55	6,6
Vrata terapijske sobe nakon što je pacijent dobio terapiju	0,8	9,6
Pozicija tehničara koji uključuje terapiju	20	240
Predprostor terapijskog bloka kada je pacijent unutra (vrata zatvorena)	0,33	3,96
Vrata na ulazu u terapijski blok kada je pacijent unutra	0,2	2,4



### 4. Diskusija

Prilikom rukovanja sa radionuklidom  $^{177}\text{Lu}$  potrebno je voditi računa o mogućoj spoljašnjoj i unutrašnjoj ekspoziciji (kontaminaciji), do kojih može doći prilikom ingestije, inhalacije, ubodom, preko rana.

Na osnovu izvršenog merenja jačine ambijentalnog ekvivalenta doze pri upotrebi radionuklida  $^{177}\text{Lu}$ , procena efektivne doze za profesionalno izloženo osoblje je niska. Međutim, potrebno je imati na umu da se ne može precizno uvrđiti rizik za profesionalno izloženo osoblje iz dva razloga. Prvi razlog je zbog nepotpunog merenja jačine ambijentalnog ekvivalenta doze, na primer, ni jedno merenje ne pokazuje jačinu ambijentalnog ekvivalenta doze koje prime ekstremiteti laboratorijskih tehničara pri uključivanju terapije. ORAMED projekat je predstavio koliko je merenje, a potom i zaštita ekstremiteta značajna pri upotrebi radiofarmaceutika u nuklearnoj medicini [11]. Drugi razlog je taj što se u toku godine obavljaju i druge procedure, kao i to što njih ne obavlja samo jedan čovek, već ceo tim.

### 5. Preporuke

Pre svega, profesionalno izloženo osoblje jonizujućem zračenju treba da ispune svoje obaveze i obave svoje dužnosti za zaštitu i sigurnost [7, 8]. Osoblje treba da se pridržava svih važećih pravila za zaštitu, da pravilno koriti uređaje za nadzor, zaštitnu opremu i odeću i da saraduje sa vlasnikom licence u pogledu zaštite [7, 8].

Posebno treba naglasiti sledeće preporuke za zaštitu od zračenja u nuklearnoj medicini pri upotrebi radionuklida  $^{177}\text{Lu}$  [10, 11, 12, 14]:

1. Monitoring doze za ekstremitete je izuzetno značajan;
2. Zaštitne naočare, rukavice i filter papir, kao i zaštita za bočice i špriceve je izuzetno značajna. Zaštita od 2 mm načinjena od pleksiglasa će u potpunosti zaustaviti  $\beta^-$  zračenje, dok će 2-3 mm olova znatno smanjiti spoljašnju ekspoziciju  $\gamma$  zračenja;
3. Bilo koji uređaj ili alat koji će povećati udaljenost od ruku/prstiju i izvora je vrlo efektivan (npr. klješta, hvataljke, automatski injektor);
4. Trening i edukacija o celokupnom procesu rada sa radionuklidima u medicinske svrhe predstavlja dodatnu zaštitu i bezbednost kako za profesionalno izloženo osoblje, tako i za pacijente i javnost (npr. planiranje procedura, ponavljanje procedura sa ne-radioaktivnim izvorom).

### 6. Zaključak

Zaključujemo da brzina u radu sa radionuklidima u medicinske svrhe nije dovoljna, već da je upotreba zaštite ili povećavanje udaljenosti mnogo efikasniji metod zaštite od zračenja i bezbednosti za profesionalno izloženo osoblje, pacijenta i javnost.

S obzirom da se implementacija radionuklida  $^{177}\text{Lu}$  tek uvodi u terapijske primene na Institutu za onkologiju Vojvodine, kao i to da se njegova primena u medicini tek istakla u ovoj deceniji, potrebno je da se inoviraju preporuke Direktorata za radijacionu i nuklearnu sigurnost i bezbednost Srbije o primeni izvora jonizujućih zračenja u medicini.

### 7. Literatura

- [1] J. J. Zaknun, L. Bodei, J. Mueller-brand, M. E. Pavel, R. P. Baum, D. Hörsch, M. S. O'Doriso, T. M. O'Doriso, J. R. Howe, M. Cremonesi, D. J. Kwekkeboom, The joint IAEA, EANM, and SNMMI practical guidance on peptide receptor radionuclide therapy (PRRNT) in neuroendocrine tumours, *Eur. J. Nucl. Med. Mol. Imaging* 40, 2013, 800-816.
- [2] Practical Guidance on Peptide Receptor Radionuclide Therapy (PRRNT) for Neuroendocrine Tumors, IAEA HUMAN HEALTH SERIES No. 20, IAEA, Vienna, 2013.
- [3] S. Banerjee, M. R. A. Pillai, F. F. (Russ) Knapp, Lutetium-177 Therapeutic Radiopharmaceuticals: Linking Chemistry, Radiochemistry, and Practical Applications, *Chem. Rev.* 115, 2015, 2934-2974.
- [4] L. Bodei, G. Paganelli, *Peptide Receptor Radionuclide Therapy (PRRT): Clinical Application*, In: Somatostatin Analogues: From Research to Clinical Practice, First Edition, John Wiley & Sons Inc, 2015, 252-263.
- [5] D. Levart, E. Kalogianni, B. Corcoran, N. Mulholland, G. Vivian, Radioation precautions for inpatient and outpatient <sup>177</sup>Lu-DOTATATE peptide receptor radionuclide therapy of neuroendocrine tumors, *EJNMMI Physics* 6:7, 2019.
- [6] M. Hosono, H. Ikebuchi, Y. Nakamura, N. Nakamura, T. Yamada, S. Yanagida, A. Kitaoka, K. Kojima, H. Sugano, S. Kinuya, T. Inoue, J. Hatazawa, Manual of the proper use of lutetium-177-labeled somatostatin analogue (Lu-177-DOTA-TATE) injectable in radionuclide therapy, *Ann. Nucl. Med.* 32:3, 2018, 217-235.
- [7] Pravilnik o primeni izvora jonizujućih zračenja u medicini, Sl. glasnik RS, br. 1/2012, 2012.
- [8] Radiation Protection and Safety in Medical Uses of Ionizing Radiation, IAEA Safety Standards Series No. SSG-46, IAEA, Vienna, 2018.
- [9] Nuclear Data Service, IAEA, <https://www-nds.iaea.org/relnsd/vcharthtml/VChartHTML.html> (pristupljeno 01. Jun 2019).
- [10] L. Jødal, Beta emitters and radiation protection. *Acta Oncol.* 4:2, 2009, 308-313.
- [11] Euratom Programme for Nuclear Research and training, Optimization of Radiation protection for MEDical staff (ORAMED) project, 7<sup>th</sup> EU Framework Programme, Practical guidelines to reduce hand exposure for standard nuclear medicine procedures, 2008-2011, <http://www.oramed-fp7.eu/en/Guidelines>. (pristupljeno 01. Jun 2019.).
- [12] S. Mattsson, C. Hoeschen, *Radiation Protection in Nuclear Medicine*, Springer, 2013.
- [13] Release of Patients After Radionuclide Therapy, IAEA Safety Reports Series No. 63, IAEA, Vienna, 2009.
- [14] M. Sans-Merce, N. Ruiz, I. Barth, A. Carnicer, L. Donadille, P. Ferrari, M. Fulop, M. Ginjaume, G. Gualdrini, S. Krim, F. Mariotti, X. Ortega, A. Rimpler, F. Vanhavere, S. Baechler, Recommendations to reduce hand exposure for standard nuclear medicine procedures. *Radiat. Meas.* 46:11, 2011, 1300-1333.

**APPLICATION OF  $^{177}\text{Lu}$  IN THE NEUROENDOCRINE TUMOR THERAPY AT THE ONCOLOGY INSTITUTE OF VOJVODINA – FIRST OBSERVATION AND PROPOSAL OF RADIATION PROTECTION MEASURES**

**Milana MARJANOVIĆ<sup>1,2</sup>, Silvija LUČIĆ<sup>1</sup>, Nataša TODOROVIĆ<sup>2</sup>,  
Predrag KUZMANOVIĆ<sup>2,3</sup> and Jovana NIKOLOV<sup>2</sup>**

1) *Oncology Institute of Vojvodina, Sremska Kamenica, Serbia,  
[milana.marjanovic92@gmail.com](mailto:milana.marjanovic92@gmail.com), [silvijalu@gmail.com](mailto:silvijalu@gmail.com)*

2) *University of Novi Sad, Faculty of Sciences, Novi Sad, Serbia,  
[natasa.todorovic@df.uns.ac.rs](mailto:natasa.todorovic@df.uns.ac.rs), [jovana.nikolov@df.uns.ac.rs](mailto:jovana.nikolov@df.uns.ac.rs)*

3) *Higher medical and bussines-technological school of applied stady, Šabac, Serbia,  
[predrag.kuzmanovic@vmpts.edu.rs](mailto:predrag.kuzmanovic@vmpts.edu.rs)*

**ABSTRACT**

Implementation of new radionuclide therapies with radioisotopes, which are combined emitters with the physical properties of beta and gamma radiation, in everyday clinical practice besides the medical approach to the acquiring new technologies, carry with them the assumption of engagement of the medical physicist with the task of planning and designing measures of radiation protection both for staff and patients. The introduction of a new radionuclide  $^{177}\text{Lu}$  in the treatment of neuroendocrine tumors at the Oncology Institute of Vojvodina is one of such examples of the necessity of close cooperation of medical physicists with physicians, radiologists and laboratory technicians and radiochemists. The aim of this paper is to approximate the physical aspects of radionuclides to the staff who handling with it, as well as the proposal and project of protection measures during the manipulation and administration of radionuclide therapy with  $^{177}\text{Lu}$ , in order to achieve the maximum protection of the staff when they working with this radionuclide.

## IZLOŽENOST ZRAČENJU PRI RADU SA $^{18}\text{F}$ -FDG NA ODELJENJU NUKLEARNE MEDICINE

**Predrag KUZMANOVIĆ<sup>1,2</sup>, Silvija LUČIĆ<sup>3</sup>, Nataša TODOROVIĆ<sup>1</sup>,  
Milana MARJANOVIĆ<sup>1,3</sup> i Jovana NIKOLOV<sup>1</sup>**

- 1) *Univerzitet u Novom Sadu, Prirodno-matematički fakultet, Departman za fiziku, Novi Sad, Srbija, [predrag.kuzmanovic@df.uns.ac.rs](mailto:predrag.kuzmanovic@df.uns.ac.rs), [natasa.todorovic@df.uns.ac.rs](mailto:natasa.todorovic@df.uns.ac.rs), [jovana.nikolov@df.uns.ac.rs](mailto:jovana.nikolov@df.uns.ac.rs)*
- 2) *Visoka medicinska i poslovno-tehnološka škola strukovnih studija, Laboratorija za fiziku, Šabac, Srbija, [predrag.kuzmanovic@vmpts.edu.rs](mailto:predrag.kuzmanovic@vmpts.edu.rs)*
- 3) *Institut za onkologiju Vojvodine, Sremska Kamenica, Novi Sad, Srbija, [silvijalu@gmail.com](mailto:silvijalu@gmail.com), [milana.marjanovic92@gmail.com](mailto:milana.marjanovic92@gmail.com)*

### SADRŽAJ

*Cilj ovog rada je procena nivoa izloženosti zračenju zaposlenih pri radu sa  $^{18}\text{F}$ -FDG-om na odeljenju nuklearne medicine u toku PET/CT procedura. Na osnovu zbirnih listi dnevne dozimetrije PET/CT-a za period od jula 2014. do decembra 2016. praćen je nivo doza u smislu  $H_p(10)$  parametara za 17 zaposlenih (5 doktora, 2 hemičara, 8 lab. tehničara i 2 struk. med. radiologa). Ukupan broj izvršenih procedura za analizirani period iznosio je 1992. Izloženost čitavog tela zračenju je praćena korišćenjem elektronskih ličnih dozimetara. Ukupne kumulativne doze zračenja su se kretale od (4 – 696)  $\mu\text{Sv}$ , dok je doza po jednoj proceduri u rasponu (0,002-0,35)  $\mu\text{Sv}$ . Tipična injektovana aktivnost  $^{18}\text{F}$ -FDG po pacijentu iznosi 7 – 10 mCi. Ustanovljena je veća izloženost pojedinih lica u odnosu na druga u okviru iste profesije na odeljenju NM u toku sve tri analizirane godine. Konstantno povećanje broja obavljenih procedura za oko 25% godišnje neće značajnije uticati na godišnju dozu zaposlenih jer su one daleko ispod preporučenih 20 mSv godišnje, što su potvrdili rezultati u ovom radu.*

### 1. Uvod

Pozitronska emisiona tomografija (PET) je savremena, neinvazivna dijagnostička metoda koja omogućava procenu funkcionisanja organa i tkiva. Kombinacijom sa kompjuterizovanom tomografijom (CT) može se dobiti potpuna anatomska i metabolička informacija o posmatranom regionu tela (PET/CT). PET zahteva aplikovanje radiofarmaceutika u organizam pacijenta, intravenskim putem. Najčešće korišćen radiofarmaceutik za PET/CT proceduru je  $^{18}\text{F}$ -fluorodezoksiglukoza ( $^{18}\text{F}$ -FDG) koji je pozitronski emiter (630 keV), anihilacijom proizvodi visokoenergijske fotone (511 keV) što može uzrokovati visoku izloženost zračenju u nuklearnoj medicini [1-4]. Injektovane aktivnosti  $^{18}\text{F}$ -FDG pacijentima npr. u Koreji iznose u rasponu od 5,11 – 310 MBq [5], dok je aktivnost u Norveškoj i Španiji oko 350 MBq [1, 6], a Švedskoj oko 300 MBq [7]. Kod pedijatrijskih pacijenata u Australiji se koriste aktivnosti ovog radiofarmaceutika u rasponu od 51 – 302 MBq, zavisno od broja godina pacijenta [8]. U radu autora Mohammed Alkhybari i saradnika [8] se naglašava da ne treba previše

pridavati značaj aktivnosti radiofarmaceutika već kvalitetu slike, što može predstavljati opasnost kako za izlaganje pacijenta, tako i za izlaganje osoblja u NM.

Stepen izloženosti zračenju zavisi od aktivnosti izvora i trajanja pojedinačne izloženosti [2]. Studije koje su se bavile nivoom zračenja u nuklearnoj medicini ukazuju na to da je visok nivo profesionalne izloženosti direktna posledica rukovanja sa radiofarmaceuticima (rukovanje sa špricovima, apliciranja pacijentu, rukovanje otpadom i dr.) i kontakta sa pacijentima [3, 6, 7]. Upotreba PET/CT procedure za dijagnostiku predstavlja potencijalni rizik za nastanak raka kako kod pacijenata tako i kod zaposlenih koji sprovode proceduru [4].

Prema zakonskoj regulativi Evropske Unije kao i Republike Srbije dozvoljene godišnje efektivne doze koje primi profesionalno izloženo lice godišnje ne sme preći vrednost od 20 mSv ili 100 mSv za period od pet godina izlaganja jonizujućem zračenju [9].

Cilj ovog rada je procena nivoa izloženosti jonizujućem zračenju zaposlenih na odeljenju NM pri PET/CT procedurama na Institutu za onkologiju Vojvodine u Sremskoj Kamenici, kao i diskusija o načinu smanjenja profesionalne izloženosti.

## 2. Materijal i metode

Standardi zaštite od zračenja Međunarodne agencije za atomsku energiju (IAEA) [10] preporučuju upotrebu ličnih doznih ekvivalenata  $H_p(0,07)$  za ekstremitete,  $H_p(3)$  za očno sočivo, i  $H_p(10)$  za izloženost zračenju čitavog tela, što se smatra relevantnim za praćenje profesionalne izloženosti. Praćenje ovih parametara pri sprovođenju PET/CT procedura u Institutu za onkologiju Vojvodine u Sremskoj Kamenici se prati korišćenjem termoluminescentnih (TLD) i elektronskih ličnih dozimetara.

Klasična PET/CT procedura na ovom odeljenju NM se sastoji iz višestrukih koraka. Prvi od koraka je prijem radiofarmaceutika ( $^{18}\text{F}$ -FDG) koji se doprema iz uvoza. Rukovanje sa  $^{18}\text{F}$ -FDG-om se odvija u tzv. „vrućoj laboratoriji“ koja uključuje pravljenje multidozne aktivnosti u špricovima za pojedinačno aplikovanje pacijentima, a zatim ubrizgavanje radiofarmaceutika pacijentima. Zabeleženo je da faza injektovanja doprinosi najvećoj izloženosti osoblja [4]. Poslednji korak obuhvata vreme provedeno u mirovanju i preuzimanju primljene doze od strane tkiva i ćelija, te sprovođenju pacijenata u prostoriju za snimanje, pozicioniranje i, nakon izvršene procedure, pratnju pacijenata iz odeljenja NM. Svaki ovaj pojedinačni korak doprinosi ukupnoj dozi zračenja koju primi osoblje NM, zavisno od dizajna i organizacije u samom objektu NM i nivoa i načina zaštite od zračenja. U ovom centru su postojala 2 različito strukturirana tima koja rade sa i vode brigu o pacijentima. Dnevno se u ovom odeljenju NM pregleda u proseku oko 10 pacijenata. Svaki tim radi najmanje 1 dan nedeljno na modalitetu PET/CT-a. U timu se obično nalaze 1-2 doktora, radiohemičar, laboratorijski tehničar i struk. med. radiolog (obično 4-5 u timu). Od 2011. u ovoj ustanovi se sprovodi automatizovano doziranje i injektovanje radiofarmaceutika u čemu učestvuju svi iz tima, ali su najviše u kontaktu sa pacijentima laboratorijski tehničari. Automatsko injektovanje povećava tačnost u isporuci aktivnosti pacijentu i može smanjiti dozu zračenja koju prime lab. tehničari i do 60% u odnosu na ručno injektovanje [6].

U odeljenju NM koriste se standardni alati radi zaštite od zračenja kao i olovne cigle debljine 10 cm, olovna stakla, olovni kontejneri za transport kao i pincete za rad sa radionuklidima duge oko 30 cm. PET/CT procedura se izvodi iz dobro zaštićenih kontrolnih soba, tako da je glavna izloženost osoblja NM od radiofarmaceutika [7].

Prikupljanje podataka je izvršeno na osnovu zbirnih listi dnevne dozimetrije PET/CT-a za 17 zaposlenih na odeljenju NM (5 doktora specijalista, 8 laboratorijskih tehničara, 2 hemičara, i 2 struk. med. radiologa). Praćenje doza u smislu  $H_p(10)$  parametra je vršeno za period od 2,5 godine (od 1. jula 2014. do 31. decembra 2016.) elektronskim ličnim dozimetrom Mirion DMC 2000XB.

### 3. Rezultati i diskusija

Ukupan broj sprovedenih procedura na odeljenju NM za period od jula 2014. do decembra 2016. iznosi 1992. U drugoj polovini 2014. godine izvršeno je 301 PET/CT procedura (oko 600 za čitavu 2014. godinu, gruba procena), dok je u 2015. i 2016. godini izvršeno 755 i 936 procedura, respektivno. Ovo jasno ukazuje na povećanje broja izvršenih procedura tokom analiziranog perioda od 2,5 godine. Broj sprovedenih procedura u 2015. godini je veći za oko 25% nego u 2014., dok je broj procedura u 2016. godini veći za 24% u odnosu na 2015. godinu i 55,5% veći u odnosu na 2014. godinu. U 2014. godini broj osoblja na NM uključen u sprovođenje PET/CT procedure je bio 14 (4 doktora, 2 hemičara, 6 lab. tehničara i 2 struk. med. radiologa), dok je u 2015. i 2016. godini taj broj bio 16 (4 doktora, 2 hemičara, 8 lab. tehničara i 2 struk. med. radiologa), odnosno 17 (5 doktora, 2 hemičara, 8 lab. tehničara i 2 struk. med. radiologa). Zbog povećanog broja PET/CT procedura u Srbiji, a i u svetu i zbog viših doza zračenja nego u drugim tipovima NM najveći problem predstavlja zaštita osoblja koje sprovodi proceduru, imajući u vidu da nošenje zaštitnih kecelja nije izvodljivo [6]. U toku jednog dana izvrši se između 7 i 14 PET/CT procedura, što je u proseku oko 10 procedura. Broj analiziranih PET/CT dana za 2014. godinu iznosi 29, za 2015. 76, a za 2016. 94, što je ukupno 199 PET/CT dana u analiziranom periodu.

Vrednosti kumulativnih doza zračenja za čitavo telo očitane iz elektronskog dozimetra izražene u  $\mu\text{Sv}$  za sve zaposlene na odeljenju NM po godinama date su na Slici 1 (a-c). Na Slici 1d je prikazana ukupna doza zračenja za sve zaposlene za period 2014-2016.

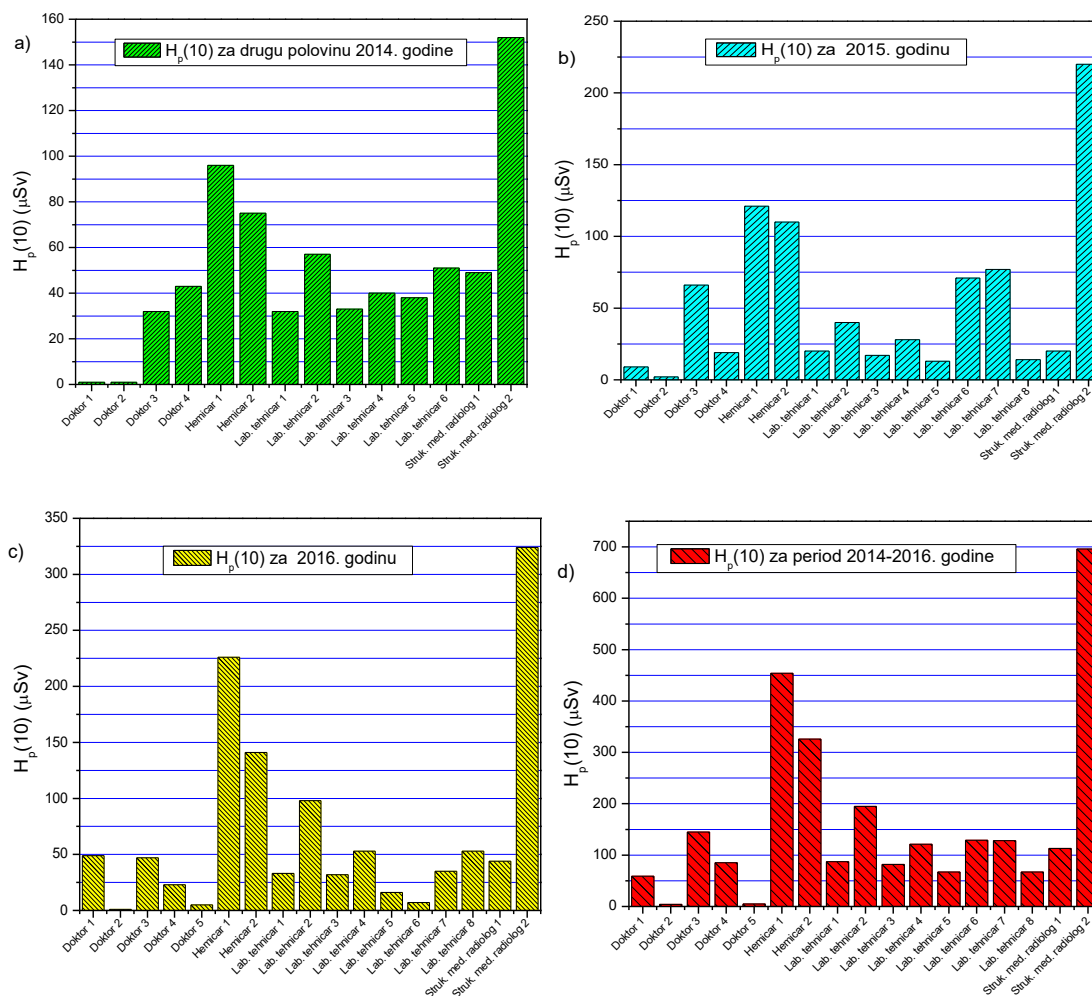
Najmanju dozu zračenja u 2014. godini su primili doktor 1 i doktor 2 koja iznosi 1  $\mu\text{Sv}$ , dok je najveću dozu zračenja primio struk. med. radiolog 2 od 152  $\mu\text{Sv}$ . U 2015. godini najmanju dozu zračenja primio je doktor 2 koja iznosi 2  $\mu\text{Sv}$ , dok je najveću dozu zračenja od 220  $\mu\text{Sv}$  primio struk. med. radiolog 2. U 2016. godini najmanju dozu zračenja je primio doktor 2 koja iznosi 1  $\mu\text{Sv}$  dok je najveću dozu zračenja primio struk. med. radiolog 2 koja iznosi 324  $\mu\text{Sv}$ .

Sa slike 1d se može videti da su najizloženija lica među profesijama na odeljenju NM za analizirani period, doktor 3 sa ukupnom dozom od 145  $\mu\text{Sv}$ , zatim hemičar 1 sa primljenom dozom od 442  $\mu\text{Sv}$  potom lab. tehničar 2 sa dozom do 195  $\mu\text{Sv}/\text{GBq}$  i struk. med. radiolog 2 sa dozom od 696  $\mu\text{Sv}$ . Na Slici 1(a-c) se može uočiti da su 2 profesionalna lica koja su u sve tri godine znatno izloženija od ostalih hemičar 1 i struk. med. radiolog 2.

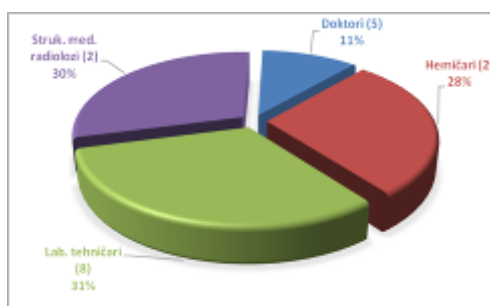
Dobijeni rezultati u poređenju sa ranijim istraživanjima u radu autora Antića i saradnika [3] koja su sprovedena na istom odeljenju NM govore da su u posmatranom periodu pojedina lica bila izloženija zračenju u odnosu na ostale u okviru iste profesije. Sa slike 1d se može videti da je struk. med. radiolog 2 primio je 6,2 puta veću dozu zračenja od struk. med. radiologa 1, što se može pripisati većem broju obavljenih procedura na modalitetu PET/CT-a. Doktor 3 primio 36,3 puta veću dozu zračenja od doktora 2 u analiziranom periodu, što ukazuje na veći kontakt sa pacijentima. Prosečna doza za ukupan analizirani period iznosi 160,8  $\mu\text{Sv}$  po zaposlenom. Vrednosti godišnjih



doza zračenja, za zve zaposlene su ispod zakonski dozvoljene vrednosti u Srbiji od 20 mSv po godini za profesionalno izložena lica [9]. Na osnovu kumulativnih doza zračenja datih na Slici 1d za analizirani period procenjena je doza koju primi zaposleni po izvršenoj jednoj proceduri, vrednosti se kreću od 0,002  $\mu\text{Sv}$ , za doktora 2, do 0,35  $\mu\text{Sv}$ , za struk. med. radiologa 2. što je niže u poređenju sa drugim zemljama [1, 4].



Slika 1. Vrednosti kumulativnih doza –  $H_p(10)$  za čitavo telo izražene u  $\mu\text{Sv}$  za 2014.(a), 2015. (b), i 2016.(c) godinu, kao i ukupne kumulativne doze 2014-2016 (d).



Slika 2. Raspodela ukupne kumulativne doze zračenja za period 2014-2016. na odeljenju NM po profesijama.



Ukupna kumulativna doza zračenja za sve zaposlene za 2014. 2015. i 2016. godinu iznose redom, 699  $\mu\text{Sv}$  (oko 1400 za čitavu 2014. godinu, gruba procena), 847  $\mu\text{Sv}$  i 1187  $\mu\text{Sv}$ . U poređenju 2014. sa 2015. godinom uočava se pad ukupne doze od oko 39,5%, u 2015. godini dok je poređenjem 2015. i 2016. prisutan porast doze skoro za, 40,1%. Poređenjem 2014. i 2016. godine, uočen je pad ukupne doze za oko 15,2%. Na Slici 2 su prikazane raspodele ukupnih kumulativnih doza zračenja po profesijama na odeljenju NM za analizirani period. Uočava se da od ukupne doze koje su primili svi zaposleni u periodu jul 2014 – decembar 2016. (2733  $\mu\text{Sv}$ ), lab. tehničari (8) su primili oko 31% (858  $\mu\text{Sv}$ ), zatim struk. med. radiolozi (2) oko 30% (809  $\mu\text{Sv}$ ), potom hemičari (2) od oko 12% (768  $\mu\text{Sv}$ ) i doktori (5) od oko 11% (298  $\mu\text{Sv}$ ), što govori o dobroj korelaciji između profesije kao i očekivane primljene doze doktor 1, 3 i 4 su primili veću dozu zračenja od ostala 2 doktora jer su bili više u kontaktu sa pacijentima i tako doprineli povećanju ukupne doze zračenja.

**Table 2. Opseg vrednosti doza zračenja po jedinici aktivnosti (A)  $^{18}\text{F}$ FDG-a izražene u nSv/GBq.**

Period/Profesija	2014.		2015.		2016.	
	Min.	Maks.	Min.	Maks.	Min.	Maks.
Doktori (5)	2	80	4	120	2	90
Hemičari (2)	130	170	200	220	250	410
Lab. tehničari (8)	60	100	20	140	60	180
Struk. med. radiolozi (2)	90	270	40	390	80	580

Tipična vrednost aktivnosti  $^{18}\text{F}$ FDG-a koja se koristi za automatsko injektovanje iznosi 7 – 10 mCi (270 – 360 MBq) u zavisnosti od indikacije, uzrasta i mase pacijenta. U proseku se za masu pacijenta od 75 kg aplikuje aktivnost od 7,5 mCi (278 MBq)  $^{18}\text{F}$ -FDG. Ukupna aplikovana aktivnost u analiziranom periodu iznosi 558 GBq. U tabeli 2 date su vrednosti doza zračenja po jedinici aktivnosti (A)  $^{18}\text{F}$ FDG-a izražene koje u nSv/GBq se kreću se od 2 – 580 nSv/GBq. Dobijene vrednosti su znatno niže od onih iz ranijeg istraživanja na istom odeljenju NM [3].

#### 4. Zaključak

U ovom radu je prikazano praćenje nivoa izloženosti zračenju u smislu  $H_p(10)$  parametara za celo telo za sve zaposlene na odeljenju NM na Institutu za onkologiju Vojvodine u Sremskoj Kamenici pri radu sa FDG-om i izvođenju PET/CT pregleda pacijenata (slika 1(a-d)). Dobijene vrednosti kumulativnih doza očitane iz elektronskih dozimetara po godinama kao i u ukupnom periodu praćenja ne prelaze dozvoljenih 20 mSv [9].

Dobijeni rezultati ukazuju da je i dalje potreban konstantan rad na obezbeđivanju što boljih mera zaštite kako bi se i ove doze smanjile, iako su dobijeni rezultati doza niži od onih datih u ranijim istraživanjima na istom odeljenju NM [3]. Uočena je jasna korelacija između profesije na odeljenju NM i ukupne primljene kumulativne doze zračenja za analizirani period (slika 2). Zbog neujednačenih primljenih doza zračenja među profesijama na odeljenju NM preporučuje se ravnomernost u obavljanju posla na odeljenju NM čime bi se smanjile i ujednačile kumulativne doze zračenja među zaposlenima. Povećanjem udaljenosti i smanjenjem vremena kontakta sa pacijentom,

što iziskuje maksimalnu efikasnost u radu, kao i upotrebe zaštite gde je to moguće, mogle bi se smanjiti doze zračenja.

### 5. Zahvalnica

Rad je realizovan uz pomoć sredstava Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije u okviru projekata br. 171002, 43002.

### 6. Literatura

- [1] T. Seierstad, E. Stranden, K. Bjering, M. Evensen, A. Holt, H. M. Michalsen and O. Wetteland. Doses to nuclear technicians in a dedicated pet/ct centre utilising  $^{18}\text{F}$  fluorodeoxyglucose (FDG). *Radiat. Prot. Dosim.* 123(2), 2007, 246–249.
- [2] S. Mattsson, Ch. Hoeschen. *Radiation Protection in Nuclear Medicine*, Springer Heidelberg, New York, Dordrecht, London, 2013.
- [3] V. Antić, O. Ciraj-Bijelac, J. Stankovic, D. Arandjic, N. Todorovic and S. Lucic. Radiation exposure to nuclear medicine staff involved in PET/CT practice in Serbia, *Radiat. Prot. Dosim.* 162(4), 2014, 577–585.
- [4] D. J. Peet, R. Morton, M. Hussein, K. Alsafi, N. Spyrou. Radiation protection in fixed PET/CT facilities-design and operation. *Br. J. Radiol.* 85, 2012, 643–646.
- [5] H. W. Kwon, J. P. Kim, H. J. Lee, J. C. Paeng, J. S. Lee, G. J. Cheon, D. S. Lee, June-Key Chung, K. W. Kang. Radiation Dose from Whole-Body F-18 Fluorodeoxyglucose Positron Emission Tomography/Computed Tomography: Nationwide Survey in Korea. 31(Suppl 1), 2016, S69-S74.
- [6] R. M. Sanchez, E. Vano, J. M. Fernandez, M. Ginjaume, J. L. Carreras. Evaluation of an automated fdg dose infuser to PET-CT patients. *Radiat. Prot. Dosim.* 165(1–4), 2015, 457–460.
- [7] S. Leide-Svegborn. Radiation exposure of patients and personnel from a PET/CT procedure with  $^{18}\text{F}$ -FDG. *Radiat. Prot. Dosim.* 139(1–3), 2010, 208–213.
- [8] E. Mohammed Alkhybari, M. F. McEntee, K. P. Willowson, P. C. Brennan, T. Kitsos and P. L. Kench. An Australian local diagnostic reference level for paediatric whole-body 18F-FDG PET/CT. *Br. J. Radiol.* 2019, 92.
- [9] Pravilnik o granicama izlaganja jonizujućim zračenjima i merenjima radi procene nivoa izlaganja jonizujućim zračenjima. Sl. glasnik RS, br. 86/2011 i 50/2018, 2018.
- [10] International Atomic Energy Agency. *Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards, Interim Edition*. International Atomic Energy Agency (2011).

## EXPOSURE TO RADIATION WITH FDG IN DEPARTMENT OF NUCLEAR MEDICINE

**Predrag KUZMANOVIĆ<sup>1,2</sup>, Silvija LUČIĆ<sup>3</sup>, Nataša TODOROVIĆ<sup>1</sup>, Milana MARJANOVIĆ<sup>1,3</sup> and Jovana NIKOLOV<sup>1</sup>**

1) *University of Novi Sad, Faculty of Science, Department of Physics, Novi Sad, Srbija, [predrag.kuzmanovic@df.uns.ac.rs](mailto:predrag.kuzmanovic@df.uns.ac.rs), [natasa.todorovic@df.uns.ac.rs](mailto:natasa.todorovic@df.uns.ac.rs), [jovana.nikolov@df.uns.ac.rs](mailto:jovana.nikolov@df.uns.ac.rs)*

2) *Higher medical and business-technological school of applied studies in Sabac, Laboratory for Physics, Šabac, Serbia, [predrag.kuzmanovic@vmpts.edu.rs](mailto:predrag.kuzmanovic@vmpts.edu.rs)*

3) *Oncology Institute of Vojvodina, Sremska Kamenica, Novi Sad, Serbia, [silvijalu@gmail.com](mailto:silvijalu@gmail.com), [milana.marjanovic92@gmail.com](mailto:milana.marjanovic92@gmail.com)*

### ABSTRACT

The aim of this paper is to evaluate the level of exposure to radiation of employees when working with the  $^{18}\text{F}$ -FDG in the NM department during PET/CT procedures. Based on collection lists of PET/CT dozes for the period from July 2014 to December 2016, assesments the dose level in terms of Hp(10) parameters for 17 employees (5 doctors, 2 chemists, 8 laboratory technicians and 2 med. radiologist). The total number of procedures performed for the analyzed period was 1992. The exposure of the whole body to radiation was monitored using electronic personal dosimeters. The total cumulative radiation doses ranged from (4 – 696)  $\mu\text{Sv}$ , while the dose by one procedure ranged (0.002 – 0.35)  $\mu\text{Sv}$ . The typical injected activity of  $^{18}\text{F}$ -FDG per patient is 7 – 10 mCi. Higher radiation exposure of individuals to another was established within the same profession at the NM department during the three analyzed years. The constant increase in the number of procedures performed by about 25% per year will not significantly affect the annual dose of employees because they are far below the recommended 20 mSv per year, as confirmed by the results in this paper.

## KONCEPT ZA KLASIFIKACIJU, EVALUACIJU, SISTEM KONTROLE I MERE PREVENCIJE VANREDNIH SITUACIJA U NUKLEARNOJ MEDICINI

Vojislav ANTIĆ

Klinički centar Srbije, Beograd, Srbija, [antic.vojislav@gmail.com](mailto:antic.vojislav@gmail.com)

### SADRŽAJ

*Za praćenje procesa u nuklearnoj medicini, uključujući i eksterne faktore, razvijeno je nekoliko softvera ali nijedan od postojećih nije obezbedio sistematski pristup (potencijalnim) incidentnim situacijama. U radu je prikazano rešenje za prepoznavanje i adekvatan tretman ovakvih događaja na osnovu njihove kategorizacije, kvantifikovanja, relevantnih uputstava i mera prevencije. Definisani su sledeći elementi: 1) identifikacija radnih procedura koje mogu dovesti do incidenata vezanih za kontaminaciju osoblja i radnog prostora; 2) radijaciona i nuklearna bezbednost; 3) elementi u sistemu obezbeđivanja kvaliteta rada nuklearno-medicinskog centra sa tehničko-tehnološkog aspekta, koji utiču ili mogu uticati na prevenciju incidenata; 4) osobenosti i potencijalni rizici za pojavu akcidentalnih situacija vezani za radioaktivni otpad u centru za nuklearne medicinu; 5) incidentne situacije u nuklearnoj medicini kao posledica mehaničkih nezgoda; 6) incidenti vezani za grešku pri administraciji radiofarmaceutika: pogrešnom pacijentu, neodgovarajuća doza, aplikacija trudnici/dojilji; 7) potencijalni rizici u nuklearnoj medicini kao posledica pacijentovog zdravstvenog stanja; 8) uticaj pacijenta u kreaciji, odnosno eskalaciji incidenata. U eri digitalizacije, ideja je da ovaj koncept dobije globalni karakter, kako bi se učilo na greškama i razvijala bezbednosna kultura.*

### 1. Uvod

Povećanje dijagnostičkih mogućnosti i kapaciteta nuklearne medicine je ostvareno sofisticiranjem i zahtevnijom tehnologijom nuklearno-medicinskog procesa, preko tehničkih inovacija, novih referentnih vodiča na bazi relevantnih kliničkih studija, kao i unapređenja u proizvodnji radioizotopa, sintezi radiofarmaceutika, pripremi pacijenta, procesu snimanja, rekonstrukciji medicinske slike i pristupačnijem softverskom okruženju, sa značajnim brojem dodatnih funkcija.

Za razliku od dijagnostičke radiologije, gde je potencijalni štetni uticaj jonizujućeg zračenja na profesionalno izložena lica ograničen samo na ozračivanje tokom akvizicionog procesa, odnosno slikanja ili fluoroskopskog praćenja, nuklearno-medicinska dijagnostika podrazumeva i spoljašnje i unutrašnje izlaganje prilikom procesa proizvodnje radiofarmaceutika, transporta, pripreme, separacije i aplikacije radiofarmaceutika, pripreme pacijenta pre snimanja, kao i interakcije sa pacijentom nakon završenog pregleda [1,2].

Imajući u vidu širinu spektra nepredvidljivosti vanrednih situacija tokom nuklearno-medicinskog procesa, koje će biti tematski predstavljene konceptom, neophodno je da se one u opštem smislu u što većoj meri prvo elaboriraju, a zatim da se pažljivo osmisle i

spovedu mere za njihovo predupređenje, odnosno smanjenje posledica ukoliko do incidenata ipak dođe.

### **2. Koncept sveobuhvatnog pristupa prevencije vanrednih situacija u nuklearnoj-medicini**

Koncept koji je osmišljen i koji se odnosi na vanredne situacije u nuklearnoj medicini predviđa podelu na osam kategorija, i to na: 1) identifikaciju radnih procedura koje mogu dovesti do incidenata vezanih za kontaminaciju osoblja i radnog prostora; 2) radijaciju i nuklearnu bezbednost; 3) elemente u sistemu obezbeđivanja kvaliteta rada nuklearno-medicinskog centra sa tehničko-tehnološkog aspekta, koji utiču ili mogu uticati na smanjenje incidenata; 4) osobenosti i potencijalne rizike za pojavu akcidentalnih situacija, vezanih za radioaktivni otpad u nuklearno-medicinskom centru; 5) incidentne situacije u nuklearnoj medicini kao posledica mehaničkih nezgoda; 6) incidente vezane za greške pri administraciji radiofarmaceutika u nuklearnoj medicini: pogrešnom pacijentu, neodgovarajući put aplikacije, neodgovarajuća doza, aplikacija trudnici/dojilji; 7) potencijalne rizike u nuklearnoj medicini kao posledica zdravstvenog stanja pacijenta i 8) uticaj pacijenta na nastanak, odnosno eskalaciju incidenata.

Kontaminacija u nuklearnoj medicini je predvidljiv incident i do nje može doći tokom radnih procedura u laboratoriji za pripremu i separaciju radiofarmaceutika, pri aplikaciji administrirane aktivnosti u pacijenta, prikupljanju, segregaciji i skladištenju radioaktivnog otpada i kao posledica interakcije sa izlučevinama (urin, znojenje, feces) pacijenata. Prevencija se zasniva na kvalitetu uređenja nuklearno-medicinskog prostora, poštovanju radnih procedura (koje moraju biti detaljne, optimizovane, konkretne i sledljive) i automatizaciji tehničko-tehnološkog procesa.

Odeljenje nuklearne medicine se obično nalazi u istoj zgradi sa drugim kliničkim organizacionim jedinicama, a izvori zračenja ne zahtevaju složeno raspakivanje i lako su prenosivi, pa je neophodno pažljivo proceniti i izraditi efikasni bezbednosni sistem, sa ciljem obezbeđivanja zaštite radioaktivnih izvora od krađe, sabotaze, gubitka ili neovlašćenog pristupa. U skladu sa relevantnim elaboriranjem ovih činjenica, nova zakonska regulativa je predvidela izradu adekvatnog Plana bezbednosti, kojim se opisuju mere radijacione i nuklearne bezbednosti. Potrebno je održavati usresređenost i pripravnost odgovarajućim obukama i vežbama, u kojima treba da učestvuju i interne bezbednosne snage i policija (od kojih inicijalno treba pribaviti saglasnost na Plan bezbednosti), kontinuirano obezbeđujući usklađenost sa procenom osnovne bezbednosne ugroženosti [3].

Osiguranje kvaliteta u nuklearnoj medicini predstavlja kontrolu procesa u cilju obezbeđivanja kvaliteta dijagnostičke informacije, počev od specifikacije opreme, prijemnih ispitivanja/statusnih testova, preko servisa opreme (za sve komponente radnog procesa koje direktno ili indirektno utiču na njega), inicijalne i tekuće ambijentalne i lične dozimetrije (uključujući i procenu doza za pacijente), kalibracije svih uređaja, evaluacije i optimizacije kvaliteta nuklearno-medicinske slike, dokumentacije i baze podataka u informacionom sistemu, kompletne sigurnosno-bezbednosne procene, do razvojnog procesa, sa odgovarajućim korektivnim akcijama, na bazi pozitivne povratne sprege, kojim se kroz lokalne i globalne interne i eksterne revizije analizira i elaborira efikasnost svih procesa i donošenja odluka (za šta se zalaže i ovaj koncept). Sa aspekta analize vanrednih događaja, treba vršiti redovnu evaluaciju kako se postojeća efikasnost

obezbeđenja kvaliteta odražava na prevenciju i smanjenje incidenata i pogotovo *post festum* razmatrati da li je inicijalno bilo preduzeto sve što je bilo potrebno.

Program za upravljanje radioaktivnim otpadom bazira se na principima prevencije stvaranja i minimizacije, uz obezbeđenje zaštite od svih potencijalnih vanrednih situacija, sa imperativom obezbeđenja zdrave životne sredine. Odgovarajuća bezbednosna procena treba da obuhvati celokupni radioaktivni materijal unutar nuklearno-medicinskog objekta, obrazac upotrebe, količine otpada koje se generišu i potencijalne puteve za odlaganje. Najbolje je menadžement upravljanja radioaktivnog otpada definisati prilikom izgradnje objekta, ali najčešće to nije slučaj, pa se mora osmisliti odgovarajuća optimizacija i naknadno usklađivanje radnih aktivnosti.

Nuklearna medicina treba da razmatra i povrede kao posledice uboda na iglu ili posekotine na oštar predmet (primena procedure za slučaj izloženosti potencijalno infektivnom biološkom otpadu), pad pacijenta (praćenje kretanja, procena za imobilizaciju pre početka snimanja), tehničke razloge za povredu pacijenata (pričvršćenost mehaničkih sklopova, nereagovanje autokontura pri SPECT snimanju i sl.), kao i fizičke povrede zaposlenog lica teškim predmetom, tj. sve vanredne situacije koje mogu da dovedu do mehaničkih povreda pacijenata, odnosno osoblja.

Aplikacija pogrešnom pacijentu (zbog greške u identifikaciji pacijenta ili neadekvatno označenog naziva radiofarmaceutika na kontejneru ili špricu) prevenira se utvrđenim mehanizmima za dodatnu proveru indentiteta, dok je za prevenciju administriranja pogrešnog radiofarmaceutika ključna opšta organizacija i urednost prostora, uz obavezu isporučioaca da izvrši kolorno kodiranje. Aplikacija neodgovarajuće aktivnosti sprečava se striktnim poštovanjem radne procedure administracije radiofarmaceutika, koja podrazumeva da se svaka doza pojedinačno proveru u kalibratoru doza i da se vodi računa o planiranom vremenu aplikacije. Ukoliko postoji sumnja na trudnoću, treba pregled odložiti na 5-12 dana posle ciklusa, a u rizičnijim slučajevima obavezno uraditi odgovarajući laboratorijski test. Što se dojlja tiče, najbolje je, ukoliko je pregled nuklearno-medicinski pregled indikovao, da se uradi PET (sa  $^{18}\text{F}$ -FDG-em) - dojenje novorođenčeta može da se nastavi odmah posle pregleda. Korišćenje jodnih radiofarmaceutika je zabranjeno u oba slučaja. Sa tehničke strane, u cilju prevencije, osnovno je da sva oprema u sistemu administriranja treba da se održava, a kalibratori doza i etaloniraju, dok je sa aspekta personala potrebno da procedure za administraciju doza budu precizne i jasne i da je na njih svo osoblje upućeno.

Rizici samih nuklearno-medicinskih procedura, koji mogu imati neposredan uticaj na zdravlje pacijenta, su vezani za radiofarmaceutik (nastajanje akutnog plućnog srca odnosno mikroembolizacija sistemskih organa kod scintigrafije pluća sa makroagregatima albumina, HAMA serumska reakcija kod imunoscintigrafije, primena  $^{18}\text{F}$ -FDG-a kod pacijenata sa dijabetesom), ispitivanje bolesti srca pod opterećenjem (za procenu ishemije) i ekstravazacija radiofarmaceutika. Ove pojave su detaljno opisane u literaturi [4,5], ali treba staviti akcenat na usresređenost na adekvatnu pravovremenu reakciju, obzirom na potencijalne posledice i činjenicu da su relevantni neželjeni događaji retki.

Pacijentu na afirmativan a jednostavan način treba objasniti proces nuklearno-medicinske dijagnostike, u smislu navođenja i obrazlaganja koji su svi koraci predviđeni tokom dijagnostičkog postupka i šta se od njega očekuje tokom sprovođenja dijagnostičke procedure, istovremeno mu unoseći spokojstvo, što podrazumeva adekvatan fluidan pristup. Relevantne informacije treba nekoliko puta ponoviti pre iniciranja radiofarmaceutika, kako bi se izbegla, odnosno smanjila komunikacija sa



pacijentom nakon iniciranja, tokom vremena preuzimanja, prilikom sprovođenja do sobe za snimanje odnosno nakon završenog pregleda (tokom akvizicije podataka, odnosno nuklearno-medicinskog snimanja, audio-video komunikacija mora da postoji). Osoblje bi moralo da bude obučeno u smislu da vešto prevazilazi izazove eventualnog ometajućeg ponašanja pacijenata i dalje ostavljajući neokrnjenu neprikosnovenu poziciju pacijenta u zdravstvenom sistemu. Potencijalni uticaj pacijenata na vanredne događaje je veliki i prožima sve prethodno opisane situacije. Na primer, ako je pacijent nemiran, to povećava rizik od kontaminacije prilikom aplikovanja radiofarmaceutika, može uticati na rizik i intenzitet mehaničke povrede kao posledica uboda na iglu, odnosno može doći do toga da padne sa pacijent kreveta i povredi se, a ako je nestrpljiv, uz prethodne napomene može doći do toga da mu se aplikuje pogrešan radiofarmaceutik ili neodgovarajuća aktivnost (ukoliko se lažno predstavi, u želji da što pre obavi pregled), kao i da, ukoliko mu kretanje nije ograničeno, izlaže zračenju okolno stanovništvo.

### 3. Softveri za podršku nuklearno-medicinskog procesa i implementacija predstavljenog koncepta

Imajući u vidu kompleksnost nuklearno-medicinske dijagnostike, razvijeni su adekvatni softveri za podršku. Vodeće relevantne aplikacije dostupne na tržištu - „IBC Clinic Nuclear Medicine Management Software“, proizvođača „Comecer“ [6] i „BioDose / NMIS“ proizvođača „ec<sup>2</sup> software solutions“ [7] su vrlo slične i obe pružaju mogućnost praćenja sledljivosti procesa, planiranja pregleda, naručivanja, kontrole kvaliteta, pripreme špriceva, merenja doze u realnom vremenu, menadžmenta zaliha i otpada, integraciju uređaja, podršku za očitavanje barkodova, pisanja izveštaja i vođenje statistika (frekventnost administriranih aktivnosti, prosečna vremena za obavljanja određenih procedura itd.) [8-10]. Treba izdvojiti i zatvorenu verziju „Optility™ Nuclear Medicine Management Software“ proizvođača „Capintec“ [11].

Implementacija predstavljenog koncepta u postojeća softverska rešenja treba da se sprovodi iskačućim oblačićima u kojima se nalaze odgovarajuće procedure neposredno pre nego što treba da se izvrše (da se iznova pročitaju makar pasivnom pažnjom, sa obaveznom potvrdom, bez koje se ne može nastaviti validacija nuklearno-medicinskog procesa) i prikladno organizovanim tokom raznih obaveštenja (vezanim za pitanja značajna za prevenciju), uz zvučne i svetlosne efekte, u intervalima i na način da je posledično delimično usporavanje rada višestruko kompenzovano povećanjem usresređenosti na potencijalne rizike.

Softverskim rešenjem je potrebno da se omogući da se odgovarajuće informacije o vanrednim događajima, sistematizovanim na opisan način, analiziraju tokom vremena kada zaposleni nisu neposredno u radnom procesu, individualno radi shvatanja i prihvatanja sa samokritičnim internim dijalogom, odnosno kolektivno, u otvorenoj razmeni zapažanja i mišljenja.

### 4. Zaključak

Vanredni događaji su nepredvidivi po definiciji, ali se potencijalni uzroci mogu u velikoj meri elaborirati i preduprediti. Drugim rečima, ne možemo eliminisati slučajnost, ali sistematski pristup pozitivno utiče i na kolektiv i na pojedinca. Time se unapređuje ili dokazuje konzistentnost u obezbeđivanju menadžmenta upravljanja



kvalitetom, što je imperativ koji se nameće u kliničkoj praksi, pogotovo u većim zdravstvenim sistemima.

Prezentovani koncept je formiran na bazi prirode incidentnih situacija, iako se posledice u većoj ili manjoj meri prepliću. Evaluacijom preventivnih obaveštenja, kao i analizom, kvantifikacijom i učenjem na primerima iz prakse, globalnom distribucijom putem zajedničkog softvera, vanredne situacije u nuklearnoj medicini značajno bi se smanjile i ograničio bi im se uticaj.

### 5. Literatura

- [1] M. Dondi, L. Torres, M. Marengo, T. Massarado, E. Mishrani, A. Van Zyl Ellmann, K. Solanki, E.E. Lobato, R.N. Miler, D. Paez, T. Pascual. Comprehensive Auditing in Nuclear Medicine Through the International Atomic Agency Quality Management Audits in Nuclear Medicine (QUANUM) Program. Part 1: the QUANUM Program and Methodology. *Semin Nucl Med.* 47(6), 2017, 680-686.
- [2] V. Antic, O. Ciraj-Bjelac, J. Stankovic, D. Arandjic, N. Tomasevic, S. Lucic. Radiation exposure to Nuclear Medicine Staff Involved in PET/CT Practice in Serbia. *Rad. Prot.Dosim.* 162 (4), 2014, 577-585.
- [3] Zakon o radijacionoj i nuklearnoj sigurnosti i bezbednosti ("Sl. glasnik RS", br. 95/2018 i 10/2019), 2019.
- [4] Sampson CB Adverse reactions and drug interactions with radiopharmaceuticals, *Drug Saf.* 8(4), 1993, 280-94.
- [5] J. Martin, N. Saleem. 18F-FDG PET-CT scanning and diabetic patients: what to do?. *Nucl Med Commun.* 35(12), 2014, 1197-203.
- [6] <https://www.comecer.com/ibc-clinic-management-software/>
- [7] ec<sup>2</sup> Software Solutions Biodose Version 18 User Manual.
- [8] G. Serreli, L. Ruffini, O. Ortenzia, C. Cidda, C. Lazzara, C. Ghetti. Radiation dose reduction in myocardial perfusion imaging single-photon emission computed tomography/computed tomography using a dose tracking software. *Nucl. Med. Commun.* 39(10), 2018, 894-900.
- [9] J.L. Hakala, J.S. Hung, E.A. Mosman. Minimizing Human Error in Radiopharmaceutical Preparation and Administration via a Bar Code-enhanced Nuclear Pharmacy Management System. *J. Nuclear Med. Technol.* 40(3), 2012, 183-186.
- [10] S. Bogen. A Root Cause Analysis Into the High Error Rate in Clinical Immunohistochemistry. *Appl. Immunohistochem M.M.* 27(5), 2019, 329-338.
- [11] Capintec Optility™ Nuclear Medicine Management Software Version 4 User Manual.

### **CONCEPT FOR CLASSIFICATION, EVALUATION, SYSTEM CONTROL AND PREVENTION OF EMERGENCY SITUATIONS IN NUCLEAR MEDICINE**

**Vojislav ANTIĆ**

*Clinical Center of Serbia, Belgrade, Serbia, [antic.vojislav@gmail.com](mailto:antic.vojislav@gmail.com)*

#### **ABSTRACT**

Several software has been developed to monitor the nuclear medical process, including external factors, but none of the existing offered a solution for such events identification and adequate treatment, based on categorization, quantification, relevant instructions and preventive measurements. The following elements were defined: 1) identification of working procedures that can lead to incidents related to contamination of personnel and workspace; 2) radiation and nuclear security; 3) quality assurance elements of the nuclear medical center work from a technical and technological aspect, which influence or can influence to the reduction of incidents; 4) peculiarities and potential risks for the occurrence of accidental situations related to radioactive waste at the nuclear-medical center; 5) incidental situations in nuclear medicine as a result of mechanical problems; 6) errors in the administration of radiopharmaceuticals: wrong patient, inadequate dose, application to the pregnant/breast-feeding woman; 7) potential risks in nuclear medicine as a result of the patient's health; 8) the influence of the patient in the creation, or the escalation of incidents. In the era of digitization, the idea is to achieve a global character with this concept, to learn from errors and to develop the safety culture.



## ДОЗИМЕТРИЈА



# HARMONISATION OF DOSE MEASUREMENT PROCEDURES USING PASSIVE DOSEMETERS: USE OF PASSIVE H\*(10) DOSIMETRY SYSTEMS IN EUROPE

Olivera CIRAJ-BJELAC<sup>1</sup>, Miloš ŽIVANOVIĆ<sup>1</sup>, Nikola KRŽANOVIĆ<sup>1</sup>,  
Gordana PANTELIĆ<sup>1</sup>, Jelica KALJEVIĆ<sup>1</sup>, Jelena STANKOVIĆ-PETROVIĆ<sup>1</sup>,  
Željka KNEŽEVIĆ MEDIJA<sup>2</sup> and Marija MAJER<sup>2</sup>

1) Vinca Institute of Nuclear Sciences, University of Belgrade, [ociraj@vinca.rs](mailto:ociraj@vinca.rs),  
[milosz@vinca.rs](mailto:milosz@vinca.rs), [krzanovic@vinca.rs](mailto:krzanovic@vinca.rs), [pantelic@vinca.rs](mailto:pantelic@vinca.rs), [jkaljevic@vinca.rs](mailto:jkaljevic@vinca.rs),  
[jelena.stankovic@vinca.rs](mailto:jelena.stankovic@vinca.rs)

2) Rudjer Boskovic Institute, Zagreb, Croatia, [zknez@irb.hr](mailto:zknez@irb.hr), [marija.majer@irb.hr](mailto:marija.majer@irb.hr)

## ABSTRACT

*One of the outstanding tasks of the project 16ENV04 Preparedness, is to investigate the use of passive dosimeters aimed for measurement of operational quantity H\*(10). The aim of this task is to develop a rationale to harmonize the procedures used by European measuring bodies and authorities, which provide services or fulfil tasks in radiation protection by using passive H\*(10) area monitoring systems. Procedures used by European measuring bodies and services for environmental monitoring using passive area dosimeters are investigated, with a goal to investigate the applicability of passive dosimetry systems in the aftermath of a nuclear event.*

## 1. Introduction

The protection of the public against ionizing radiation and radioactive contaminations caused by nuclear or other radiologically relevant incidents or accidents (i.e. events), including terrorist attacks, is of major importance and may affect thousands of people. Following a radiological event, radiation protection authorities and other decision makers need quick and credible information on affected and contaminated areas. Therefore, the 16ENV04 Preparedness project (European Union's Horizon 2020, EMPIR Environment Call, 2017-2020) [1] was designed to develop reliable instrumentation and methods needed in the field of preparedness, so that correct decisions on countermeasure will be possible. Among other activities, the project will further work on improving methods for long-term monitoring. The results of this project will enable an adequate response for the protection of the public and the environment against dangers arising from ionizing radiation during and in the aftermath of a nuclear or radiological event.

The overall objective of this project is the establishment of a metrological basis to support adequate protective measures in the aftermath of nuclear and radiological emergencies. To achieve this, the specific objectives of this project are:

1. To develop unmanned aerial detection systems installed on aerial vehicles and helicopters for the remote measurement of dose rates and radioactivity concentrations. In addition, to establish novel methods applicable to core and remote areas of a nuclear or radiological incident for air-based radiological

measurements including dose rates, radioactivity concentrations, traceable calibrations for the determination of ground surface activities and interpretation methodologies for Rotary-wing Unmanned airborne monitoring system (RWUAMS) or helicopter based radiological measurements.

2. To develop transportable air-sampling systems for immediate information on radioactive contamination levels in air. This will include generating industry appropriate pre-production models of modular and portable air-sampling systems based on gamma spectrometric detectors that can be quickly transported to places of interest.
3. To investigate the metrological relevance of 'crowd sourced monitoring' data on dose rates and provide recommendations on the usability of such data. In addition, to develop handy detector systems with the potential to be used as dose rate measuring instruments in governmental and non-governmental applications.
4. To establish stable and reproducible procedures to measure ambient dose equivalent rates using passive dosimetry in order to harmonize passive dosimetry for environmental radiation monitoring across Europe.
5. To facilitate the take up of the technology and measurement infrastructure developed in the project by the measurement supply chain (instrument manufacturers, accredited laboratories), standards developing organizations (ISO, IEC) and end users (national nuclear regulatory bodies, decision/policy makers e.g. IAEA, European Community Urgent Radiological Information Exchange (ECURIE), OECD/NEA, EURADOS, UNEP, WHO, WMO).

The project consists of 17 partners and 6 collaborators, working on accomplishment of the above mentioned objectives. The project activities are organized in four work packages (WP):

WP1: Unmanned aerial detection of radiological data

WP2: Transportable air-sampling systems

WP3: Monitoring of ionizing radiation by non-governmental networks

WP4: Passive Dosimetry

The objective of this paper is to present activities carried out under the WP 4 related to measurements of ambient dose equivalent rates using passive dosimetry.

## 2. Passive dosimetry in Europe

In Europe, there are approximately 100 dosimetry services e.g. governmental offices, companies, and institutions associated with a research facility or a hospital, using different passive area dosimeters (dosimeters without inbuilt electronics) for environmental monitoring. Due to the lack of international standards, a variety of different measurement procedures and uncertainty calculation methods are used. The application of passive detectors for radiation protection is not a trivial task. Due to the natural background radiation, it is difficult to verify the compliance of measured data with the limits of the effective dose defined by the European Basic Safety Standards outlined in the Directive 59/2013 [2] or radiation protection, e.g. 1 mSv per year for the public.

A recent survey by the EURADOS ([www.eurados.org](http://www.eurados.org)) Working Group 3 (WG3-Environmental Dosimetry) [3], showed that some of these services are neither traceable to primary dosimetric standards nor accredited. The survey addressed the following topics: main radiological characteristics of the dosimetry systems, dose



assessment methodology, different aspects of quality assurance including accreditation, other services provided by laboratory and participation in the intercomparisons. Within the survey, 60 questionnaires had been received from 47 different institutions and 24 different countries. The vast majority of dosimetry systems (86%) used for environmental monitoring were photon dosimetry systems. As regards the dosimetry systems, the systems are based on thermoluminescent (TL) detectors in 83% of the cases, followed by radiophotoluminescent detectors (RPL) in 7% of the cases. To a lesser extent, optically stimulated detectors (OSL), direct ion storage detectors (DIS), CR-39 and fission track detectors are used [3]. LiF:Mg,Cu,P emerged as a material with significant advantages over LiF:Mg, Ti for environmental dosimetry applications, due to 30 times better sensitivity, than LiF:Mg, Ti, however, later are still commonly used. The average lower limit of the stated dose range was 54  $\mu$ Sv, whereas the stated lower energy range in different laboratories was from 5 keV to 100 keV [3].

The findings of the survey revealed that in terms of dose calculation procedures, the dosimetry services apply transport dose corrections in half of the cases, only 30% of the services subtract the natural background and in 43% of cases the dosimetry services apply fading correction factors [3]. Most of the laboratories (83%) calculate the overall measurement uncertainty and have Quality Management System in place. Overall conclusion of the survey highlighted a further need for a harmonization in the field of environmental dosimetry using passive detector systems. Some open questions have been identified, e.g. concerning the harmonization in terminology, uncertainty assessment procedures or corrections of measured dose values due to transport and climate [3].

### **3. Basic properties of passive dosimeters used in Europe**

As mentioned above, TL detectors are the most common systems used in Europe. Among TLD systems, different types of detectors are used such as: LiF:Mg,Cu,P, LiF:Mg, Ti, CaF<sub>2</sub>, CaSO<sub>4</sub>, etc [5,6]. Their basic properties are given in the Table 1.

### **4. Passive dosimetry within the project 16ENV04 Preparedness**

As harmonization is urgently needed even in routine monitoring, recommendations and guidelines will be elaborated within the project *16ENV04 Preparedness* which will serve as a basis for the development of international standards. For nuclear and radiological accidents, the feasibility of follow-up surveillance using passive dosimeters will be investigated and conclusions will be drawn.

The aim of this work package is to establish stable and reproducible procedures to measure ambient dose equivalent rates using passive dosimetry in order to harmonize passive dosimetry for environmental radiation monitoring across Europe. In the aftermath of a nuclear or radiological event, long-term monitoring of external gamma-doses may be performed by using passive detectors. Passive detectors are small, cheap and robust, and do not need an electrical power supply, so that they can be placed anywhere. However, the metrological correctness of the dose data obtained from these detectors is a presupposition for the application of such detectors in official measurements, which may lead to far-reaching decisions in radiation protection of the public.

**Table 1. Common passive dosimeters used in Europe.**

Phosphor	CaF <sub>2</sub> :Dy	CaF <sub>2</sub> :Mn	LiF:Mg,Cu,P,	LiF:Mg, Ti
Detector Form	chip	chip	chip	chip
Dimensions (mm)	3.2 × 3.2 × 0.9	3.0 × 3.0 × 0.9	3 × 3 × 0.9	3.2 x 3.2 x 0.89
Energy Dependence	±30% of <sup>60</sup> Co from 50 to 1500 keV	±10% of <sup>60</sup> Co from 70 keV to 1250 keV, 25% of <sup>60</sup> Co @ 40 keV	±20% from 20 keV to 1250 keV, 140% of <sup>137</sup> Cs @ 40 keV	-
Dose range	0.1pSv to 1Sv	0.1pSv to 1Sv	10 pSv – 10 Sv	10 pSv – 10 Sv
Fading	10% in 1st 24 hr 16% total in 2 weeks	8% in 1st 24 hr 12% total in 2 weeks	5%/y at 20 °C with anneal	5%/y at 20 °C with anneal

To address these issues, investigations of the current status of passive area dosimetry systems used for environmental monitoring will be performed in Task 4.1. This will be done by compiling available information and by performing a comprehensive intercomparison. In Task 4.2, methodological studies and extended measurements will be carried out to explore the properties and detection limits of passive dosimeters used for environmental monitoring. In Task 4.3 it will be investigated as whether a different detector type, electret ion chambers, could replace common passive dosimetry systems in the future. In Task 4.4, a conclusion will be drawn concerning the applicability of passive detector systems in the framework of preparedness. In addition, harmonized measuring and calibration procedures will be recommended to achieve a European comparability of passive area measurements.

## 5. Conclusion

A need for a harmonization in the field of environmental dosimetry using passive detector systems is evident. WP 4 of project *16ENV04 Preparedness* will contribute to the evaluation of properties of passive dosimeters along with recommendation for harmonization of measuring and calibration procedures of passive area dosimetry systems.

## 6. Acknowledgement

The research presented in this paper was realized within 16ENV04 Preparedness project. This project has received funding from the EMPIR programme co-financed by the Participating States and from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme. Duration of the project is 2017-2020.

## 7. Literature

- [1] <http://www.preparedness-empir.eu/> (Accessed on 8 August 2019).
- [2] M.A. Duch, H. Dombrowski, C. Hranitzkyet et al. Status of passive environmental dosimetry in Europe. *Radiat Meas.* 106, 2017, 242-245.
- [3] European Commission. Council Directive 2013/59/Euratom of 5 December 2013 laying down basic safety standards for protection against the dangers arising from

exposure to ionising radiation, and repealing Directives 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom and 2003/122/Euratom, Euroatom, 2013.

- [4] M. Ginjaume, X. Ortega, M.A. Duch, et al. Characteristics of LiF: Mg,Cu, P for clinical applications. *Radiat. Prot. Dosim.* 85, 1999, 389-391.
- [5] J. Harvey. Performance of Thermoluminescent Dosimeters Under As-Deployed Conditions, University of Michigan, 2011.
- [6] Thermoluminescent Dosimeter Use for Environmental Surveillance at the Hanford Site, 1971–2005, Pacific Northwest National Laboratory, Richland, Washington, 2010.

## **HARMONIZACIJA PROCEDURA ZA MERENJE AMBIJENTALNOG EKVIVALTA DOZE: PRIMENA PASIVNI H (10) DOSIMETRIJSKIH SISTEMA U EVROPI**

**Olivera CIRAJ-BJELAC<sup>1</sup>, Miloš ŽIVANOVIĆ<sup>1</sup>, Nikola KRŽANOVIĆ<sup>1</sup>,  
Gordana PANTELIĆ<sup>1</sup>, Jelica KALJEVIĆ<sup>1</sup>, Jelena STANKOVIĆ-PETROVIĆ<sup>1</sup>,  
Željka KNEŽEVIĆ MEDIJA<sup>2</sup> i Marija MAJER<sup>2</sup>**

1) *Institut za nuklearne nauke Vinča, Univerzitet u Beogradu, Beograd, Srbija,*  
*ociraj@vinca.rs, milosz@vinca.rs, krzanovic@vinca.rs, pantelic@vinca.rs,*  
*jkaljevic@vinca.rs, jelena.stankovic@vinca.rs*

2) *Institut Ruđer Bošković, Zagreb, Hrvatska, zknez@irb.hr, marija.majer@irb.hr*

### **SADRŽAJ**

Jedan od zadataka projekta 16ENV04 Preparedness je ispitivanje pasivnih dozimetrijskih sistema namenjenih za merenje operativne dozimetrijske veličine H\*(10). Cilj ovog zadatka je evaluacija i harmonizacija procedura koji koriste laboratorije u Evropi a odnose se na merenje ambijentalnog ekvivalenta doze, a u vezi eventualne primene ovakvih dozimetrijskih sistema u kontekstu dleovanja u vanrednom događaju.

## PRELIMINARNA ISPITIVANJA IZLOŽENOSTI PACIJENATA U STOMATOLOŠKOJ PRAKSI U CRNOJ GORI

Aleksandra MILATOVIĆ, Benard BERIŠAJ i Nikola SVRKOTA

Centrar za ekotoksikološka ispitivanja Podgorica, Crna Gora,

[aleksandra.milatovic@ceti.co.me](mailto:aleksandra.milatovic@ceti.co.me), [beniber@t-com.me](mailto:beniber@t-com.me), [nikola.svrkota@ceti.co.me](mailto:nikola.svrkota@ceti.co.me)

### SADRŽAJ

*Stomatološki pregledi predstavljaju najmasovniju grupu radioloških pregleda u Crnoj Gori. Dijagnostički referentni nivoi (DRL) su alat za optimizaciju radioloških procedura. Uspostavljanje DRL-a je zahtjev nacionalnih propisa. U svrhu određivanja preliminarnih vrijednosti lokalnih DRL i optimizacije doza za pacijente, izvršena su mjerenja incidentne kerme (incident air kerma -  $K_i$ ) i proizvoda kerme u vazduhu i površine (kerma area product - KAP) za različite modalitete snimanja u stomatološkoj radiologiji. Za potrebe ovog rada, izvršena su ispitivanja 30-tak različitih stomatoloških rendgen-aparata u više gradova Crne Gore. Izmjerene srednje vrijednosti doza su najveće za stomatološke rendgen-aparate koji rade na principu kompjuterizovane tomografije konusnog snopa (CBCT snimanja) i kreću se u opsegu (431 – 2626)  $mGy \cdot cm^2$ . Na osnovu rezultata u ovom radu, utvrđeno je da ima prostora za smanjenje izloženosti pacijenata kroz proces optimizacije stomatološke prakse.*

### 1. Uvod

Savremeni aparati za stomatološku radiologiju omogućavaju snimanje u tri dimenzije i snimanje u više navrata (jer su doze na površini kože pacijenata značajno smanjene), pružaju mogućnost digitalnog snimanja s boljim kvalitetom dijagnostičke informacije, mjerenje anatomskih struktura, a time i detaljno planiranje kompletne procedure liječenja. Stomatološki rendgenski snimci su korisne dijagnostičke informacije u otkrivanju i liječenju oralnih bolesti poput karijesa, parodontnih bolesti i oralne patologije. U razvijenim zemljama se procjenjuje da postoji oko 440 stomatoloških rendgen-aparata na million stanovnika, što predstavlja 57% svih rendgenskih uređaja koji se koriste u medicinskoj radiologiji [1].

U Crnoj Gori stomatološka praksa je u potpunosti prešla u privatne ruke. Na osnovu podataka dva tehnička servisa Centra za ekotoksikološka ispitivanja Podgorica (CETI) i Prirodno matematičkog fakulteta, registrovano je oko 160 stomatoloških rendgen-aparata u našoj zemlji. Takođe, procjenjuje se da trenutno postoji najmanje 50 stomatoloških rendgen-aparata bez licence za rad.

U posljednje vrijeme, stomatološki radiografski pregledi predstavljaju najmasovniju grupu dijagnostičkih pregleda. Iako su doze zračenja u stomatološkoj radiografiji niske, izloženost jonizujućem zračenju treba svesti na minimum, gdje je to moguće. Jedan od načina optimizacije je uvođenje graničnih nivoa koji bi omogućavali razdvajanje dobre od loše radiološke prakse. Utvrđivanje referentnih nivoa na nacionalnom nivou prema preporukama EU [2-3] predstavlja prvi korak u harmonizaciji zaštite od zračenja.

Takođe, oslanjajući se na mogućnosti za smanjenje doza, ICRP preporučuje primjenu referentnih nivoa doza (DRL) u dijagnostičkoj radiologiji [4-5].

Dijagnostički referentni nivoi (DRL) su alat za optimizaciju radioloških procedura. Uspostavljanje DRL-a je zahtjev nacionalnih propisa [6]. U svrhu optimizacije doza za pacijente i određivanje preliminarnih vrijednosti lokalnih DRL u stomatološkoj praksi izvršena su ispitivanja vrijednosti incidentne kerme (incident air kerma) i proizvoda kerme u vazduhu i površine (kerma area product-KAP) za različite modalitete snimanja u stomatološkoj radiologiji.

Ovaj rad je prvi korak ka uspostavljanju nacionalnih stomatoloških referentnih nivoa koji bi omogućili optimizaciju pacijentnih doza i prakse za obavljanje standardnih dijagnostičkih postupaka u radu sa ovim uređajima.

## 2. Metode i mjerenja

Za potrebe ovog rada izvršena je kontrola kvaliteta 30-tak stomatoloških rendgen-aparata koji su smješteni u različitim gradovima Crne Gore. Podaci o ispitivanim rendgen-aparata su dati sa osnovnim tehničkim karakteristikama i starošću uređaja u tabeli 1.

**Tabela 1. Tehnički parametri posmatranih stomatoloških rendgen-aparata.**

Vrsta rendgen-aparata	Broj jedinica	Nominalni napon (kV)	Jačina struje (mA)	Prečnik tubusa (cm)	Starost rendgen-aparata (godina)	Vrsta prijemnika
ProX, Planmeca	11	60-70	2-8	6	2-7	Digitalni
Altis, Owany	3	65	5	6	2-5	Digitalni
RX, Owandy	5	60-70	6	6	2-14	Digitalni
Expert <sup>DC</sup> , Gendex,	2	65	7	6	7-9	Digitalni
Timex 70, Gnatus	3	70	7	6	8-10	Film
PAX-Flex 3D, VATECH	1	50-90	6-10	-	2	Digitalni CMOS FDD
α Expert, RAYSCAN 3D	1	60-90	4-17	-	5	Digitalni CMOS
Rotograph Evo 3D, Villa Sistemi Medicali	1	60-86	6-12	-	7	Digitalni aSi-CsJ
ProOne, Planmeca	2	60-70	2-7	-	4	Digitalni

Kontrola kvaliteta (QC) koju sačinjavaju različiti testovi urađeni su u skladu sa standardima i uključuju [5,7-8]: vizuelnu inspekciju rendgen-aparata i prateće opreme, kontrolu zaštite od jonizujućeg zračenja za pacijente, profesionalno izložena lica i stanovništvo u prostorijama gdje su smješteni ispitivani uređaji i testiranje performansi stomatoloških rendgen-aparata. Kontrola zaštite od jonizujućeg zračenja za pacijente, profesionalno izložena lica i stanovništvo, u prostorijama u kojima se koriste rendgen-aparati izvršena je merenjem jačine ambijentalnog ekvivalenta doze, kalibrisanom jonizacionom komorom Victoreen 451P (Fluke Biomedical). Uobičajena godišnja kontrola kvaliteta svih ispitivanih stomatoloških rendgen-aparata izvršena je multimetrom MPD Barracuda (RTI Electronics AB, Sweden). Radi provjere stabilnosti rada rendgen-aparata, sva mjerenja su ponovljena 5 puta i statistički obrađena.

Starije verzije stomatoloških rendgen-aparata koje se koriste u našoj zemlji, a posebno uređaji za intraoralna snimanja imaju fiksnu vrijednost napona koji odgovara nazivnoj vrijednosti napona (ili mogućnost izbora između dvije ili tri diskretne vrijednosti) fiksnu vrijednost jačine struje za postavljeni napon rendgenske cijevi. U posljednje vrijeme, intraoralni rendgen-aparati se zamjenjuju sa uređajima koji pružaju više mogućnosti i širi opseg parametara snimanja (napon, vrijeme i jačina struje).

Operater ima mogućnost izbora vremena ekspozicije koje se određuje u odnosu na anatomsku lokaciju snimanja i karakteristike prijemnika slike. U ovom radu vrijeme ekspozicije je odabrano uglavnom automatski za sve tipove stomatoloških rendgen-aparata, osim za uređaj Timex 70, Gnatus.

Sakupljanje podataka o nivoima izlaganja za CBCT i panoramske stomatološke rendgen-aparate izvršeno je prema protokolu koji je preporučen kroz IAEA projekte. Podaci za CBCT i panoramske stomatološke rendgen-aparate sakupljeni su očitavanjem vrijednosti koje su date na monitorskim konzolama posmatranih stomatoloških uređaja. Za svaki rendgen-aparat prikupljeno je najmanje 10 pacijenata. Ukupan broj analiziranih pacijenata je 54, oba pola.

### 3. Rezultati i diskusija

U tabeli 2 dati su rezultati za QC ispitivanih stomatoloških rendgen-aparata, koja je urađena sa multimetrom MPD Barracuda (RTI Electronics AB, Sweden). U sklopu testiranja performansi stomatoloških rendgen-aparata pored izmjerenih veličina kriterijumi za dozvoljene granične vrijednosti prikazani su u tabeli 2.

Prikazane vrijednosti kontrole kvaliteta svih rendgen-aparata nijesu pokazala odstupanja od standarda osim u slučaju rezultata ponovljivosti vremena ekspozicije kod uređaja Timex 70, Gnatus.

**Tabela 2. Rezultati QC za ispitivane stomatološke rendgen-aparate.**

Vrsta rendgen-aparata	Tačnost napona (%)	Tačnost vremena (%)	Ponovljivost vremena (%)	Ponovljivost radijacionog izlaza (%)	HVL (mm Al)
ProX, Planmeca	3,0	0,3	0,3	2,4	2,4
Altis, Owandy	2,5	0,4	0,6	3,4	2,2
RX, Owandy	2,6	1,0	0,5	4,0	2,3
Expert <sup>DC</sup> , Gendex,	4,5	0,5	2,7	1,8	2,4
Timex 70, Gnatus	8,1	21,0	0,5	4,0	2,0
PAX-Flex 3D, Vatech	4,0	2,7	0,4	3,2	2,4 na 70 kV
α Expert, Rayscan 3D	1,0	5,7	2,4	4,3	3,3 na 90 kV
Rotograph Evo 3D, Villa Sistemi Medicali	1,4	0,5	0,4	3,6	3,5 na
ProOne 2D, Planmeca	1,5	2,2	0,5	2,0	2,8 na 70 kV
Kriterijum [9]	10%	20%	10%	20%	Za 60 kV $\geq 1,8$ Za 90 kV $\geq 2,5$



Veličina koja je mjerena prilikom eksponiranja kutnjaka gornje i donje vilice pomoću koje se mogu odrediti doze za pacijente [10] je incidentna kerma (incident air kerma). Takođe, u tabeli 3 su prikazani treći kvartil incidentne kerme i vrijeme izlaganja pacijenta za rendgen-aparate koji su posmatrani.

Srednje vrijednosti izmjerenih doza kreću se u rasponu od 0,6 mGy do 1,7 mGy za kutnjake donje vilice i od 0,8 mGy do 2,6 mGy za kutnjake gornje vilice, odnosno najveća vrijednosti trećeg kvartila je 1,9 mGy za donje kutnjake i 2,8 mGy za gornje kutnjake. Kod intraoralnih rendgen-aparata pacijentne doze ne prelaze referentne nivoe, ali se može uočiti da su ove vrijednosti kod uređaja koji koriste filmove kao prijemnik informacije najveće i da postoji prostora za optimizaciju ovih procedura snimanja.

Razlog ovako niskih vrijednosti pacijentnih doza je sve veća upotreba digitalnih stomatoloških intraoralnih rendgen-aparata.

**Tabela 3. Distribucija doza za intraoralne rendgen-aparate.**

Vrsta rendgen-aparata	Donji kutnjaci			Gornji kutnjaci		
	t (s) sr.vri.±sd (max-min)	K <sub>i</sub> (mGy) sr.vri.±sd (max-min)	Q <sub>3</sub> (mGy)	t (s) sr.vri.±sd (max-min)	K <sub>i</sub> (mGy) sr.vri.±sd (max-min)	Q <sub>3</sub> (mGy)
ProX, Planmeca	0,1±0,02 (0,08-0,2)	0,8±0,2 (0,4-1,2)	0,9	0,2±0,1 (0,1-0,3)	1,3±0,4 (0,8-1,8)	1,6
Altis, Owandy	0,4±0,04 (0,1-0,2)	0,6±0,1 (0,5-0,7)	0,7	0,2±0,06 (0,2-0,3)	0,9±0,3 (0,6-1,2)	1,1
RX, Owandy	0,2±0,05 (0,1-0,3)	0,9±0,3 (0,9-1,4)	1,1	0,3±0,2 (0,2-0,6)	1,8±0,6 (1,6-2,3)	2,4
Expert <sup>DC</sup> , Gendex	0,2	1,2±0,1 (1,1-1,1)	1,2	0,2 0,2	1,5±0,1 (1,4-1,6)	1,5
Timex 70, Gnatus	0,5±0,1 (0,5-0,6)	1,7±0,4 (1,2-2,0)	1,9	0,7±0,1 (0,6-0,8)	2,6±0,4 (2,1-2,9)	2,8

KAP vrijednosti sa minimalnim, maksimalnim i srednjim vrijednostima, standardnom devijacijom i dodatno izračunatim trećim kvartilom distribucije doza su prikazani u tabeli 4 za CBCT i panoramske ortopane.

**Tabela 4. Distribucija doza za CBCT i panoramske rendgen-aparate.**

Vrsta rendgen-aparata	Broj pacijenata	Napon (kV)	mA	t (s)	KAP (mGy·cm <sup>2</sup> ) sr.vri.±sd (max-min)	Q <sub>3</sub> (mGy)
PAX-Flex 3D, Vatech	13	87±1 (89-90)	87±1 (89-90)	24	431±13 (415-450)	445
α Expert, Rayscan 3D	10	88±2 (85-90)	10±1 (8-12)	14	2626±518 (1844-3200)	3080
Rotograph Evo 3D, Villa Sistemi Medicali	11	83±1 (89-90)	9±1 (9-10)	11	2067±545 (1354-2730)	2330
ProOne 2D, Planmeca	20	67±4 (68-70)	8±4 (7-15)	12±2 (9-19)	70±36 (35-162)	65



Takođe, u radu su prikazani podaci za tehničke parametre snimanja: napon, proizvod jačine struje i vremena snimanja pacijenta (tabela 4). Rezultati distribucije individualnih pacijentnih doza (tabela 4), u ovom radu, ukazuju na značajnu varijaciju, što se može pripisati različitim tehničkim karakteristikama ispitivanih stomatoloških rendgen-aparata i u manjoj mjeri različitim procedurama rada sa ovim uređajima. Rezultati KAP u tabeli 4 ukazuju na širog opseg izmjerenih vrijednosti posebno za CBCT i kreću se od  $431 \text{ mGy}\cdot\text{cm}^2$  do  $2626 \text{ mGy}\cdot\text{cm}^2$ . U ovom radu je prikazan širok opseg dobijenih KAP vrijednosti za CBCT uređaje, koje se razlikuju i do 8 puta. Ove vrijednosti su znatno veće od onih koje možemo pronaći u literaturi [10].

Utvrđeno je i da, u velikom broju slučajeva, operateri koji rukuju sa panoramskim i CBCT rendgen-aparatima nemaju dovoljno saznanja o karakteristikama opreme i mogućnostima koju pružaju ovi uređaji. Uobičajeno je da operateri prihvataju protokol rada koji serviseri/proizvođači predlože, tako da se parametri snimanja veoma rijetko mijenjaju. Takođe, operateri teško prihvataju sugestije za optimizaciju svojih procedura za snimanje i nijesu svjesni njihove uloge u ovom procesu.

#### 4. Zaključak

Rezultati mjerenja u ovom radu ukazuju na dobar potencijal za optimizaciju procedura snimanja, a posebno kod stomatoloških rendgen-aparata koji rade na principu kompjuterizovane tomografije konusnog snopa zračenja (CBCT). Uspostavljanje nacionalnih DRL je najbolje sredstvo u procesu optimizacije u mnogim zemljama tako da je Crnoj Gori neophodno hitno uspostavljanje nacionalnih DRL za procedure snimanja u stomatološkoj radiološkoj praksi.

Takođe, trebalo bi proširiti postojeće testove u okviru kontrole kvaliteta sa mjerenjima pacijentne izloženosti, poboljšati kontrolu kvaliteta slike i voditi evidenciju ponovljenih snimaka. Potpuniju kontrolu kvaliteta bi trebalo posebno proširiti na CBCT rendgen-aparate. Da bi ovaj proces bio kompletan, neophodno je organizovati stalnu edukaciju operatera koji rade sa izvorima jonizujućeg zračenja u stomatološkoj radiološkoj praksi i uskladiti njihovu implementaciju sa QA programom.

#### 5. Literatura

- [1] Source and Effects of Ionizing Radiation. Report to General Assembly with Scientific Annexes, Volume I, United National Scientific Committee on Effects of atomic Radiation, New York, 2010.
- [2] Radiation Protection 136. European Guidelines on radiation protection in dental radiology. Office for Official Publications of the European Union Commission, 2004.
- [3] Council Directive 2013/59/EURATOM on Laying down basic safety standards for protection against the dangers arising from exposure to ionising radiation, The Official Journal of the European Union, Brussels, 2013.
- [4] ICRP Publication 103, International Commission on Radiological Protection, Oxford:Pergamon Press, 2007.
- [5] Pravilnik o uslovima za promet i korišćenje radioaktivnih materijala, rendgen-aparata i drugih uređaja koji proizvode jonizujuća zračenja, „Sl.list SRJ“ br. 32/98, 1998.

- [6] M. Alcaraz, F. Velasco, Y. Martinez-Beneyto, M. Alcaraz-Saura, E. Velasco, G.D. Achel, M. Canteras. Evolution of diagnostic reference levels in Spanish intraoral radiology. *Radiat. Prot. Dosim.* 151, 2012, 166 – 171.
- [7] Dosimetry in Diagnostic Radiology, An International Code of Practice, Technical Reports Series, No. 457, IAEA, Vienna, 2007.
- [8] Vrednovanje i redovna ispitivanja u medicinskim odeljenjima vizuelizaciju slike - Performanse vizuelizacije slike stomatoloških rendgen-aparata, Deo 3-4, JUS IEC 61223-3-4, Savezni zavod za standardizaciju, Beograd, 2002.
- [9] Criteria for Acceptability of Medical Radiological Equipment used in Diagnostic Radiology, Nuclear Medicine and Radiotherapy, Radiation Protection, No 162, Luxembourg, 2012.
- [10] M.T. Bahreyni Toosi, M. Nazery, H. Zare, Application of dose-area product compared with three other dosimetric quantities used to estimate patient effective dose in diagnostic radiology, Iran. *J. Radiat. Res.* 4/1, 2006, 21-27.
- [11] R. Pauwels, CBCT Quality Assurance, Department of Imaging & Pathology, Biomedical Sciences Group, Leuven, Belgium, 2018.

## PRELIMINARY INVESTIGATION OF PATIENT EXPOSURE IN DENTAL PRACTICE IN MONTENEGRO

**Aleksandra MILATOVIĆ<sup>1</sup>, Benard BERIŠAJ and Nikola SVRKOTA**

*Centre for Eco-toxicological Research, Podgorica, Montenegro,*

*[aleksandra.milatovic@ceti.co.me](mailto:aleksandra.milatovic@ceti.co.me), [beniber@t-com.me](mailto:beniber@t-com.me), [nikola.svrkota@ceti.co.me](mailto:nikola.svrkota@ceti.co.me)*

### ABSTRACT

Dental examinations represent the most numerous group of radiological examinations in Montenegro. Diagnostic reference levels (DRL) are a valuable tool for the optimization of radiological procedures. Establishing the DRLs is required by national legislations. In order to determine preliminary values of local DRLs and to optimize patient doses, measurements are performed of incident air kerma ( $K_{ai}$ ) and kerma area product (KAP) for various modalities of radiography in dental practice. In this work investigation is made of some 30 different dental X-ray units in several towns in Montenegro. Mean values of measured doses are the highest for dental X-ray units which operate on the principle of computerized tomography of the cone beam (CBCT radiography) and range within (431 – 2626)  $mGy \cdot cm^2$ . Based on the results of this work, it is concluded that there is potential for reducing patient exposure through the optimization of the dental practice.

## ELEMENTI PROCENE IZLAGANJA RADNIKA JONIZUJUĆIM ZRAČENJIMA PRIRODNOG POREKLA - PRISTUP I METODOLOGIJA NA PRIMERU RUDARA U RUDNIKU MRKOG UGLJA “SOKO”

Vesna ARSIĆ, Jovana ILIĆ, Suzana BOGOJEVIĆ i Irena TANASKOVIĆ  
*Institut za medicinu rada Srbije “Dr Dragomir Karajović”, Beograd, Srbija,*  
[vesna.arsic@institutkarajovic.rs](mailto:vesna.arsic@institutkarajovic.rs), [jovana.ilic@institutkarajovic.rs](mailto:jovana.ilic@institutkarajovic.rs),  
[suzana.bogojevic@institutkarajovic.rs](mailto:suzana.bogojevic@institutkarajovic.rs), [irena.tanaskovic@institutkarajovic.rs](mailto:irena.tanaskovic@institutkarajovic.rs)

### SADRŽAJ

*U radu je prikazan pristup proceni izlaganja jonizujućim zračenjima prirodnog porekla za radnike u rudniku. Procena izlaganja rađena je u skladu sa dokumentima: „Council Directive“ 2013/59/EURATOM i „Assessing the need for radiation protection measures in work involving minerals and raw materials“, IAEA, SRS No.49. Nakon sagledavanja svih karakteristika radnog prostora i radnog procesa uz podatke o radnom vremenu, to jest vremenu ekspozicije, na osnovu izvršenih merenja jačine ambijentalnog doznog ekvivalenta, određivanja sadržaja radionuklida u odabranim uzorcima (ugalj, jalovina, jamska prašina, jamska voda) i merenja koncentracije aktivnosti radona kratkotrajnom metodom pomoću kanistera sa aktivnim ugljem, izvršena je procena doze uz predstavljanje svih teškoća i nezaobilaznih ograničenja tokom ovog procesa.*

### 1. Uvod

Izlaganje zaposlenih koji rade sa NORM materijalima (bilo da su oni deo radnog procesa ili deo radnog okruženja), jonizujućim zračenjima, može biti eksterno, interno i kombinovano.

Rad u rudnicima predstavlja rad pod zemljom, i kao takav, prema dokumentu SRS No.49 [2], spada u grupu radnih mesta sa potencijalno povišenim izlaganjem jonizujućim zračenjima prirodnog porekla. Javno preduzeće za podzemnu eksploataciju uglja Resavica formirano je 1992. godine objedinjavanjem devet rudnika uglja u jedinstveno preduzeće za proizvodnju uglja podzemnom eksploatacijom. Jedan od njih je rudnik mrkog uglja „Soko“ koji se nalazi u istočnom delu Sokobanjske kotline. Jama rudnika Soko je zbog metana, prisutne vode i ugljene prašine, jedan od najopasnijih rudnika u Evropi [11]. U rudniku radi 589 radnika (podatak iz 2011. godine). Svakodnevno, u tri smene, u jamu se spušta više od 200 rudara. Bezbednost rudara kontroliše se iz dispečerskog centra. Uvidom u Akt o proceni rizika, saznajemo da štetnosti po pitanju izloženosti jonizujućem zračenju nisu ispitivane. Merenja nisu rađena, pa rizik od ove vrste štetnosti nije procenjivan.

U okviru procene izlaganja radnika jonizujućim zračenjima prirodnog porekla, Laboratorija za ispitivanje radioaktivnosti IMRS “Dr Dragomir Karajović”, 2018 godine, izvršila je merenje i uzorkovanje u rudniku mrkog uglja “Soko”. Procena izlaganja rađena je u skladu sa dokumentima: Direktiva EURATOM 59 [1] i SRS No.49 [2]. Za potrebe

Agencije za zaštitu od jonizujućih zračenja i nuklearnu sigurnost Srbije izvršena je, skrining metodom (mali broj merenja i uzoraka radi dobijanja brzih rezultata), procena doze za radnike, koja će biti prikazani u ovom radu. Prvi korak u ovom poslu bio je sagledavanje karakteristika terena, upoznavanje radnog procesa, uzimanje podataka o radnom vremenu (vremenu ekspozicije) i drugih relevantnih podataka. Nakon toga, izvršena su merenja jačine ambijentalnog doznog ekvivalenta i neophodna uzorkovanja. Cilj procene doze izlaganja radnika je procena radiološkog rizika, utvrđivanje važnih puteva izlaganja i prepoznavanje situacija u kojima će biti neophodno sprovođenje zaštitnih mera.

Poznato je da se mrki ugalj odlikuje slabije održanom drvenastom strukturom i da je mrke do crne boje. Od kamenog uglja se razlikuje, izuzev po sadržaju humusnih supstanci, i po koncentraciji aktivnosti radionuklida - mrki ugalj ima nešto niže vrednosti [5].

## 2. Metodologija

Za procenu izlaganja, potrebno je utvrditi puteve izlaganja i proceniti ukupnu efektivnu dozu za radnika, sumiranjem efektivne doze od eksternog i internog izlaganja.

Koraci u proceni doze su:

1. Prikupljanje informacija o izvorima zračenja, uključujući podatke o tipovima i koncentracijama prisutnih radionuklida i emitovanog zračenja. Preliminarna merenja jačine ambijentalnog doznog ekvivalenta radi identifikovanja mesta i materijala sa povećanim izlaganjem.
2. Odabir i prikupljanje uzoraka koji su od značaja za procenu doze i koji će biti analizirani u laboratoriji.
3. Sagledavanje radnog procesa i uzimanje podataka o radnom vremenu (vremenu ekspozicije) i drugih relevantnih podataka.
4. Definisane scenarija izlaganja i relevantnih puteva izlaganja. Za slučaj skrininga, najbolje je održati maksimalno konzervativan pristup. U ovoj proceni je, zbog malog broja analiziranih uzoraka i kratkog vremena prikupljanja podataka, primenjen upravo takav pristup. Analiziran je samo jedan scenario izlaganja, a to je rad u uslovima maksimalnog. Procena izlaganja vrši se za godinu dana i treba da pokriva sva radna mesta pod sličnim uslovima maksimalnog opterećenja.
5. Procena doze i evaluacija prema usvojenom kriterijumu za procenu doze. Prema postojećoj zakonskoj regulativi [4], primenjuje se kriterijum zasnovan na graničnoj vrednosti za efektivnu dozu za pojedinca iz kategorije stanovništva - 1mSv za godinu dana (član 33).

Sagledavanje radnih procesa i merenje jačine ambijentalnog doznog ekvivalenta, generisalo je odabir uzoraka i analiza. Uzokovani su: ugalj, ugljena prašina i jamska voda (za gamaspektrometrijsku analizu). Postavljeni su detektori sa aktivnim ugljem za merenje radona i podeljeni su TLD dozimetri odabranoj grupi zaposlenih rudara koji će ih nositi tokom svojih redovnih radnih aktivnosti tokom 2 meseca. Ispitivanja su vršena sledećim metodama:

Gamaspektrometrijska merenja vršena su na 3 poluprovodnička HPGe detektora proizvođača ORTEC, relativne efikasnosti 25%, 25% i 40% i rezolucije 1,95 keV, 1,85 keV i 1,85 keV na liniji 1332,5 keV Co-60, respektivno. Za obradu dobijenih spektara korišćen je softver GammaVision 32. Kalibracija efikasnosti detektora izvršena je sertifikovanim referentnim materijalima (mešavina radionuklida homogeno raspoređena

u zapremini 1 l, gustine 1,22 g/cm<sup>3</sup>, Czech Metrological Institute Cert.No. 931-OL-095/01.)

Merenje koncentracije radona pomoću kanistera sa aktivnim ugljem u zatvorenom prostoru vršeno je standardnom metodom za merenje radona aktivnim ugljem, koja prema protokolu EPA 520/5-87-005 [8]. Ugljeni filteri za određivanje osnovne aktivnosti, kao i oni za određivanje efikasnosti, izrađeni su u skladu sa zahtevima EPA-procedure i pomoću njih se, pre svakog merenja, izračunava efikasnost detektora. Gama emisije radona-222 i njegovih potomaka; bizmuta-214 i olova-214 upotrebljavaju se za kvantitativnu analizu. Tri sata po zatvaranju filtera, uspostavlja se ravnoteža između radona i njegovih potomaka. Nakon uspostavljanja ravnoteže, koncentracija radona koji je adsorbovan na aktivnom uglju se izračunava se preko aktivnosti njegovih potomaka.

Merna nesigurnost rezultata gamaspektrometrijskih merenja izražena je kao proširena merna nesigurnost za faktor obuhvata k=2, koji za normalnu raspodelu odgovara nivou poverenja od 95%.

Merenje jačine ambijentalnog ekvivalenta doze gama zračenja u vazduhu vršeno je radijacionim monitorom MKS-A03. Rezultati merenja prikazani su sa mernom nesigurnošću od 20% (k=2). Merenja su vršena na visini 1 m od površine tla i na istoj udaljenosti od veće količine NORM materijala (uglja, jalovine, zemljišta...).

Merenje ličnog doznog ekvivalenta: očitavanje TLD dozimetara izvršeno je u Laboratoriji za ličnu dozimetriju koja u tu svrhu koristi termoluminescentne dozimetre od kristala LiF:Mg, Cu i uređaj za obradu: Harshaw TLD Reader Model 4500. Dobijeni rezultati su prikazani sa mernom nesigurnošću od 22,3% (k=2).

### 3. Rezultati merenja

Jačina ambijentalnog doznog ekvivalenta je na nivou fona za Srbiju. Maksimalno izmerena jačina ambijentalnog doznog ekvivalenta je iznosila 0,12 µSv/h. U široj okolini rudarskog postrojenja vrednosti su na nivou prirodnog fona. Merenje “brzine doze” nije otkrilo “vruće” tačke.

**Tabela 1. Rezultati merenja jačine ambijentalnog doznog ekvivalenta.**

Merno mesto	H*(10) (µSv/h)
Ispred upravne zgrade (fon)	0,09
Mesto uzorkovanja jalovine	0,10-0,12
Mesto uzorkovanja uglja	0,09
GTN (glavno transportno nalazište)	0,09
Mesto uzorkovanja uglj. prašine	0,09

U tabeli 2 prikazani su rezultati gamaspektrometrijskog ispitivanja uzoraka jamske vode, jalovine, uglja i jamske prašine. Date su koncentracije aktivnosti analiziranih radionuklida i njima pridružene merne nesigurnosti. Za gamaspektrometrijsko merenje korišćena je marineli posuda zapremine 1 l, hermetički zatvorena kako bi se uspostavila radioaktivna ravnoteža između <sup>226</sup>Ra i njegovih potomaka. Da bi se ovaj uslov ispunio, uzorci su mereni nakon 40 dana od zatvaranja posude.

**Tabela 2. Koncentracija aktivnosti radionuklida u uzorcima jamske vode, jalovine, uglja i jamske prašine.**

Uzorak	<sup>226</sup> Ra (Bq/kg)	<sup>232</sup> Th (Bq/kg)	<sup>40</sup> K (Bq/kg)	<sup>238</sup> U (Bq/kg)	<sup>235</sup> U (Bq/kg)	<sup>137</sup> Cs (Bq/kg)
Jamska voda	< 0,015	< 0,024	0,22 ± 0,02	< 0,16	< 0,003	< 0,008
Jalovina	36,0 ± 1,2	59,6 ± 2,5	520 ± 13	45 ± 16	1,7 ± 0,4	< 0,5
Ugalj	70,0 ± 2,1	21,4 ± 1,6	163 ± 7	80 ± 24	3,9 ± 0,6	< 0,2
Jamska prašina	70,2 ± 2,1	35,4 ± 2,2	229 ± 8	59 ± 21	3,4 ± 0,6	< 0,4

Koncentracije prirodnih radionuklida u uzorku jamske vode bile su ispod granice detekcije. Iz ovoga se zaključuje da jamska voda ne predstavlja izvor radijacionog rizika za radnike rudnika. Koncentracije aktivnosti svih radionuklida su se u svim uzorcima kretale u uobičajenim granicama i bliske su prosečnim koncentracijama aktivnosti u zemljištu prema podacima UNSCEAR [3], a i poredeći ih sa rezultatima radionuklida u zemljištu na teritoriji Srbije [7]. Antropogeni radionuklid <sup>137</sup>Cs je na nivou MDA. Prema ovim rezultatima, radno okruženje u rudniku mrkog uglja karakterišu niske koncentracije radioaktivnosti prirodnih radionuklida i ne predstavlja radijacioni rizik. Dozni ekvivalent koji potiče od udisanja ugljene prašine zanemaren je zbog niskih koncentracija aktivnosti radijuma-226, torijuma-232 i uranijuma-238 kao izbog korišćenja adekvatnih zaštitnih sredstava.

U tabeli 3 prikazani su rezultati očitavanja ličnih dozimetara, odnosno, lični dozni ekvivalent za period izlaganja od 60 dana i na osnovu njega izračunata efektivna doza od spoljašnjeg ozračivanja. Za ovu procenu je kao period izlaganja uzeto, pretpostavljeno vreme od 2000 h izlaganja godišnje, što odgovara uslovima maksimalnog opterećenja (osmočasovno radno vreme, 20 radnih dana mesečno).

**Tabela 3. Rezultati očitavanja TLD dozimetra.**

Radno mesto	H <sub>p</sub> (10) (μSv)	E <sub>sp</sub> (mSv)
Električar za mašine i uređaje okna	0,230	1,3
Poslovođa "s" radionice	0,187	1,0
I električar	0,156	0,9
Električar sa aspektom rada u postrojenjima i na visini	0,188	1,0
Električar u TS	0,213	1,2
Električar lampare	0,175	1,0
Električar za mašine i uređaje okna	0,214	1,2
Električar za mašine i uređaje okna	0,266	1,5

Kao što se vidi iz table 3, procenjena efektivna doza od eksternog zračenja za ova radna mesta kreće se od 0,9 do 1,5 mSv. Minimalnu eksternu dozu ima I električar i ona iznosi 0,9 mSv, a maksimalnu dozu ima električar za mašine i uređaje okna – 1,5 mSv, što predstavlja blago prekoračenje granične vrednosti za stanovništvo.

U tabeli 4 prikazani su rezultati merenja koncentracije radona i njima pripadajuće izračunate efektivne doze za unutrašnje izlaganje.



Tabela 4. Merenje koncentracije radona i proračun efektivne doze koja potiče od inhalacije radona za period izlaganja od godinu dana.

Broj kanistra	Koncentracija radona $C_{Rn}$ (Bq/m <sup>3</sup> )	Efektivna doza $E_{un}$ (mSv/god)
103	46 ± 6	0,3
119	15 ± 4	0,1
125	16 ± 4	0,1
131	96 ± 7	0,7
135	53 ± 6	0,4
159	72 ± 7	0,5
162	117 ± 9	0,8
170	109 ± 8	0,8
179	69 ± 7	0,5
183	137 ± 9	1,0
184	52 ± 5	0,4
189	64 ± 7	0,5
190	76 ± 7	0,5
196	19 ± 3	0,1
199	69 ± 7	0,5

#### 4. Procena doze izlaganja i diskusija

Ukupna efektivna doza dobija se sabiranjem efektivne doze koja potiče od eksternog izlaganja i efektivne doze od internog izlaganja:

$$E = E_{sp} + E_{un} \quad (1)$$

Razmatranjem svih prikupljenih podataka i literature (pristup proceni doze profesionalnog izlaganja radnika u neuranskim rudnicima koji je prikazao G.S. Hewson [10]), definisani su putevi izlaganja i to: eksterno izlaganje gama zračenju koje potiče od prisutnih radionuklida u dubljim slojevima zemljine kore, odnosno u radnom okruženju (jami) i interno izlaganje koje potiče od udisanja radona.

Za procenu doze učinjene su sledeće pretpostavke: da je vreme izlaganja 2000 h za godinu dana; da su radnici koji su nosili TLD dozimetre bili puno radno vreme u rudniku, i da slično radno opterećenje trpe tokom cele godine, da su za merenje koncentracije radona izabrana reprezentativna mesta. Uz poštovanje učinjenih pretpostavki, izvršena je procena doze uz prikazan račun.

Izračunavanje efektivne doze od radona za godinu dana, za reprezentativnog radnika, vrši se prema jednačini 2. (Rezultati su prikazani u tabeli 4).

$$E_{un} = C_{Rn} * F * O * DCF \quad (2)$$

Gde je:  $C_{Rn}$  koncentracija aktivnosti radona u Bq/m<sup>3</sup> u zatvorenoj prostoriji (detektori sa aktivnim ugljem su postavljeni u jami, koja se smatra zatvorenom radnom sredinom); DCF je konverzioni faktor za radon i kratkoživeće potomke utvrđen na osnovu



epidemioloških studija [6, 9] i iznosi 9 nSv/h po Bq/m<sup>3</sup>; F je faktor ravnoteže između radona i potomaka (F = 0.4 za zatvorene prostorije) i O je okupacioni faktor koji iznosi 2000 h za godinu dana).

Izračunavanje godišnje efektivne doze koja potiče od eksternog izlaganja jonizujućem zračenju NORM materijala iz radne sredine za godinu dana izvršeno je na osnovu očitavanja TLD dozimetara (direktno očitana vrednost puta faktor izlaganja). Rezultati su prikazani u tabeli 3.

Procena ukupne doze izlaganja: prema jednačini 1, sabiranjem maksimalnih vrednosti za efektivnu dozu od radona (1,0 mSv) i efektivne vrednosti za spoljašnje izlaganje (1,5 mSv), dobija se maksimalna vrednost za ukupnu dozu izlaganja 2,5 mSv za godinu dana. Minimalna doza iznosi, analogno, 1,0 mSv. Dakle, procenjena doza izlaganja radnika u rudniku «Soko» nalazi se u intervalu (1,0 - 2,5) mSv za godinu dana.

U ovom slučaju, unutrašnje ozračivanje (od inhalacije radona, koje je u literaturi poznato kao najveći rizik za rad pod zemljom), iako je pretpostavljeno da bi to mogao biti dominantan put izlaganja, nije potvrđen kao takav. Izmerene su niske vrednosti koncentracije radona (maksimalno do 137 Bq/m<sup>3</sup>). Slični su rezultatima dobijenim u rudnicima uglja Zapadne Australije prikazanim u referenci [10]. Moguće je da je razlog tome dobra ventilacija, ali je isto tako moguće da kratkotrajna merenja pomoću detektora sa aktivnim ugljem nisu dovoljno efikasna u ovim uslovima. Za pouzdane rezultate bilo bi vrlo važno da se izvrše dugotrajna merenja pasivnim, alfa trag detektorima.

Procena doze, inače, nije precizan proračun koji se može uraditi samo na jedan način i koji može dati samo jedan tačan rezultat. Procena koja je ovde prikazana, zbog brojnih ograničenja (vremenskih i tehničkih) ima veliku mernu nesigurnost. Za bolju procenu, potrebno je imati veći broj tačnih ulaznih podataka, ali i veći broj merenja, više mogućnosti za izmenu metodologije na terenu, prema uslovima koje situacija izlaganja nameće. Ono što evidentno, proceni dodatno uvećava nesigurnost, je kratkotrajna metoda merenja radona čija koncentracija varira (posebno u uslovima dobre veštačke ventilacije).

### 5. Zaključak

Rezultati procene pokazali su da radnik u rudniku prima, u uslovima maksimalnog opterećenja, dozu od 2,5 mSv/god (i ovaj rezultat se uklapa sa rezultatima iz refernce [10], gde srednja vrednost procenjene efektivne doze za radnike u rudnicima uglja, za 297 radnih mesta, iznosi 2,9 mSv/god a maksimalna - 4,2 mSv/god). Kako je procenjena doza blago prekoračila graničnu vrednost za stanovništvo (1 mSv/god), neophodno je ponoviti merenja sa znatno većim brojem uzetih uzoraka i posebno, ponoviti merenje koncentracije radona nekom od dugotrajnih metoda.

### 6. Literatura

- [1] COUNCIL DIRECTIVE 2013/59/EURATOM, December 2013 laying down basic safety standards for protection against the dangers arising from exposure to ionising radiation, 2013.
- [2] IAEA, SRS No. 49. Assessing the need for radiation protection measures in work involving minerals and raw materials, Vienna, 2006.
- [3] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). Sources and effects of ionizing radiation. Report to General Assembly, with Scientific Annexes, New York, 2000.

- [4] Правилник о границама излагања јонизујућим зрачењима и мерењима ради процене нивоа излагања јонизујућим зрачењима, Сл. гл. РС бр. 86/2011 Сл. гл. РС бр 50/18, 2018.
- [5] R. Kljajić, V. Šipka, M. Radenković, R. Mitrović. Ugljevi i mineralna đubriva kao izvor tehnološkog povećanja prirodne radio aktivnosti, Jonizujuća zračenja iz prirode, Monografija, Beograd, 1995.
- [6] “Effective dose from inhaled radon and its progeny”, Harrison, J.W. Marsh, ICRP, Annals of the ICRP Volume 41, (378–388), October–December 2012.
- [7] Izveštaj o realizaciji sistematskog ispitivanja sadržaja radionuklida u zemljištu u Republici Srbiji, Institut za nuklearne nauke Vinča, Institut za medicinu rada Srbije “Dr Dragomir Karajović”, PMF Novi Sad, Departman za fiziku, decembar 2018.
- [8] D.J. Gray, S.T. Windham. EERF Standard Operating Procedures for Radon-222 Measurement Using Charcoal Canisters, EPA 520/5-87-005, United States Environmental protection Agency, Montgomery, 1987.
- [9] ICRU Report 57. Conversion Coefficients for use in Radiological Protection Against External Radiation, 1998.  
G S Hewson, M I Ralph. An investigation into radiation exposures in underground non-uranium mines in Western Australia. *J. Rad. Prot.* 14(4), 1994, 359-370.
- [10] M. Ivković. Sistematizacija prirodno-geoloških uslova eksploatacije uglja u podzemnim rudnicima u Srbiji, Monografija, Resavica, 2012.

**ESTIMATION OF THE WORKER'S EXPOSURE TO YONIZING  
RADIATION OF NATURAL ORIGIN - ACCESS AND  
METHODOLOGY ON THE EXAMPLE OF THE COAL MINE  
"SOKO"**

**Vesna ARSIĆ, Jovana ILIĆ, Suzana BOGOJEVIĆ and Irena TANASKOVIĆ**  
*Serbian Institute of Occupational Health "DrDragomirKarajovic", Belgrade, Serbia,*  
*[vesna.arsic@institutkarajovic.rs](mailto:vesna.arsic@institutkarajovic.rs), [jovana.ilic@institutkarajovic.rs](mailto:jovana.ilic@institutkarajovic.rs),*  
*[suzana.bogojevic@institutkarajovic.rs](mailto:suzana.bogojevic@institutkarajovic.rs), [irena.tanaskovic@institutkarajovic.rs](mailto:irena.tanaskovic@institutkarajovic.rs),*

**ABSTRACT**

The paper presents an approach to estimation of exposure to ionizing radiation of natural origin for workers in the mine. The evaluation of the exposure was made in accordance with the documents: "Council Directive" 2013/59 / EURATOM and "Assessing the need for radiation protection measures in the work involving minerals and raw materials", IAEA, SRS No.49. After examining all the characteristics of the work space and the work process with the exposure time, based on the measurements of the ambient gamma dose rate, the measuring activity concentrations of natural radionuclides in selected samples (coal, coal dust, mine water ) and radon concentration activity measurement by a short-term method using an active charcoal detectors, an investigation into radiation exposures were performed with the presentation of all the difficulties and unavoidable limitations during this process.

## IZABRANE METODE PRORAČUNA BUILDUP FAKTORA U ZAŠTITI OD GAMA I X ZRAČENJA

Srboljub STANKOVIĆ<sup>1</sup>, Boris LONČAR<sup>2</sup>, Nikola KRŽANOVIĆ<sup>1</sup>,  
Miloš ŽIVANOVIĆ<sup>1</sup> i Gordan NIŠEVIĆ<sup>3</sup>

1) Univerzitet u Beogradu, Institut za nuklearne nauke VINČA, Beograd, Srbija,  
[srbas@vinca.rs](mailto:srbas@vinca.rs), [krzanovic@vinca.rs](mailto:krzanovic@vinca.rs), [milosz@vinca.rs](mailto:milosz@vinca.rs)

2) Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd, Srbija,  
[bloncar@tmf.bg.ac.rs](mailto:bloncar@tmf.bg.ac.rs),

3) Best Oncosupport d.o.o., Beograd, Srbija, [gordan.nisevic@bestoncosupport.com](mailto:gordan.nisevic@bestoncosupport.com)

### SADRŽAJ

*U ovom radu je dat pregled izabranih metoda proračuna buildup faktora na osnovu empirijskih aproksimacija Bergera, Tejlora i aproksimacije Geometrijske Progresije, sa kojima mogu da se rešavaju praktični problemi u zaštiti od zračenja u zavisnosti od stepena njihove složenosti. Razmatran je bazičan slučaj za određivanje buildup faktora u zavisnosti od karakteristika homogene materijalne sredine kroz koju se obavlja transport fotona X i gama zračenja, zatim od energije fotona iz izvora zračenja, kao od rastojanja između izvora fotona i tačke u materijalnoj sredini u kojoj se određuje dozimetrijska veličina. Posle sprovedene diskusije rezultata proračuna buildup faktora za olovo, gvožđe, običan beton i vodu, u radu su izvedeni odgovarajući zaključci u vezi efikasnosti primene pojedinih metoda proračuna u homogenoj materijalnoj sredini, uzimajući u obzir da svaka od prikazanih metoda ima svoje prednosti, kao i ograničenja, u zavisnosti od fokusa njene primene.*

### 1. Uvod

Pored eksperimentalnog pristupa u određivanju faktora nagomilavanja, odnosno buildup faktora (u daljem tekstu sa oznakom B), postoje i različiti načini za izračunavanje njegovih vrednosti. U opštem slučaju, u praksi se pojavila potreba za jednostavno razmatranje buildup faktora kao korekcionog faktora na izmereni odziv detektora koji potiče od fotona koji pri transportu nisu interagovali sa materijalom sredine, za komponentu koja doprinosi odzivu detektora koja potiče od rasejanog zračenja, kao i od dopunskog lokalnog zračenja. U zavisnosti od veličine koja se meri detektorom definiše se tip odziva detektora, tako da se buildup faktor određuje preko jačine apsorbovane doze gama i X zračenja, ili fluksa fotona, kao i drugih veličina (na primer, jačina ekspozicione doze), koje se još koriste u praksi sa uređajima starije tehnološke generacije, koji su proizvedeni od pre nekoliko decenija. Kao jedno od značajnijih pitanja koje se postavlja je do kog nivoa složenosti treba sprovoditi odgovarajući proračun, uzimajući u obzir zahteve koji su postavljeni za rešavanje konkretnog problema u praksi. Veoma često, u praksi se u prvoj aproksimaciji mogu sprovesti proračuni kojima se pre svega dobijaju rezultati za vrednosti buildup faktora za situaciju koja proističe iz pojednostavljenja realne složenije situacije, ili je čak veoma podudarna sa zahtevima koji se nameću u realnoj situaciji sa proračunom buildup faktora u zaštiti

od zračenja. Uzimajući u obzir ovakve mogućnosti, u ovom radu je prikazan pregled izabranih metoda koje su bazirane na empirijskim aproksimacijama za određivanje buildup faktora [1].

## 2. Metode proračuna

U opštem slučaju definicija buildup faktora na poziciji u prostoru određenu vektorom položaja  $\vec{r}$  se može prikazati preko relacije:

$$B(\vec{r}) = 1 + \frac{\int_0^{E_g} G(E)\varphi_s(\vec{r}, E)dE}{\int_0^{E_g} G(E)\varphi_u(\vec{r}, E)dE} \quad (1a)$$

Pri čemu su  $G(E)$  je funkcija odziva detektora fotona,  $\varphi_s$  i  $\varphi_u$  su komponenta fluensa fotona koja potiče od rasejanog, i nerasejanog zračenja, respektivno, dok je  $E_g$  najveća vrednost energije fotona. Kako bi se predstavile osnovne forme izabranih empirijskih aproksimacija za određivanje buildup faktora, a potom i razmatrale mogućnosti njihove primene, može se definisati jednostavna situacija, na koju se mogu svesti brojni slučajevi iz prakse. U takvoj situaciji postoji monoenergetski izvor zračenja veoma malih dimenzija (može se smatrati tačkastim izvorom), sa energijom fotona  $E_0$  (MeV), a detektor se nalazi u homogenoj sredini veoma velikih dimenzija u odnosu na karakteristične dimenzije izvora, i sa linearnim koeficijentom atenuacije  $\mu(E)$  ( $\text{cm}^{-1}$ ), dok je  $r(\text{cm})$  linearno rastojanje od detektora do izvora izvora zračenja. Za ovakav slučaj u kojem se razmatra transport fotona iz tačkastog izvora duž preferentnog pravca kroz materijalnu sredinu, definicija buildup faktora je data sa:

$$B(r) = 1 + \frac{\int_0^{E_0} \varphi_s(r, E) \cdot E \cdot \mu(E)dE}{\varphi_u(r, E_0) \cdot E_0 \cdot \mu(E_0)} \quad (1b)$$

U suštini problema koji je vezan za određivanje buildup faktor je rešavanje jednačina kojima se prati transport fotona kroz materijalnu sredinu, tako da su u skladu sa tim istraživači pristupili određivanju aproksimativnih formula kojima se mogu dobiti što tačnije vrednosti u poređenju sa vrednostima dobijenim iz eksperimenta. U ovom radu je dat prikaz primene tri izabrane empirijske aproksimacije za proračun B faktora.

### *Bergerova aproksimacija*

U ovoj aproksimaciji može se koristiti sledeća formula:

$$B(E_0, \mu r) = 1 + [ a \cdot \mu r \cdot \exp(+ b \cdot \mu r) ] \quad (2)$$

gde su parametri  $a$  i  $b$  zavisni od  $E_0$ , od materijalnih svojstva sredine u kojoj se dešava slabljenje snopa zračenja, kao i od tipa odziva detektora, odnosno veličine koja se meri detektorom. Uzimajući u obzir dostupne podatke u literaturi [2], moguće je koristiti parametre  $a$  i  $b$  za veoma dobro fitovanje buildup faktora u opsegu od 0 do 40 srednjih dužina slobodnog puta (mfp) u materijalnim sredinama kao što su voda, gvožđe, olovo, beton.

## Tejlorova aproksimacija

U опшој форми ова апроксимација се приказује следећом математичком релацијом:

$$B(E_0, \mu r) = \sum_{j=1}^N A_j \cdot e^{-\alpha_j \mu r} \quad (3)$$

u којој су параметри  $A_j$  и  $\alpha_j$  такође зависни од  $E_0$ , од материјалних својства средине u којој се дешава слабљење снопа зрачења, као и од типа одзива детектора. U литератури је уобичајено да се за материјалне средине које се срећу u оперативној дозиметрији u заштити од зрачења, као што су вода, олово, бетон итд. [3] препоручује коришћење формуле за  $j=2$ , са параметрима  $A_1, \alpha_1, A_2=1-A_1, \alpha_2$ .

## Aproksimacija geometrijske progresije

Ova апроксимација је развијена од стране аутора Harima [4] i Takeuchi, Tanaka i Kinno [5], тако да има форму:

$$B(E_0, \mu r) = 1 + (b-1)(M^{\mu r} - 1)/(M-1), \text{ за } M \neq 1 \quad (4a)$$

$$B(E_0, \mu r) = 1 + (b-1) \cdot \mu r, \text{ за } M = 1 \quad (4b)$$

где се вредност параметра  $M$  добија преко математичког израза:

$$M(\mu r) = c(\mu r)^a + d \cdot \frac{\tanh(\mu r / \xi - 2) - \tanh(-2)}{1 - \tanh(-2)} \quad (5)$$

Dok су параметри  $a, b, c, d$  и  $\xi$  зависни од  $E_0$ , од материјалних својства средине u којој се дешава слабљење снопа зрачења, као и од типа одзива детектора.

## 3. Rezultati i diskusija

U cilju demonstracije mogućnosti primene izabranih empirijskih aproksimacija, proračunate su vrednosti buildup faktora ( $B$ ) za olovo, gvožđe, običan beton i vodu, za izvor fotona energije 1 MeV, za pet dužina slobodnog puta (mfp) fotona, kada  $\mu r$  iznosi 5, i odgovarajući maseni atenuacioni koeficijent ( $\mu/\rho$ ) za posmatrani materijal, pri čemu su rezultati prikazani u tabeli 1.

**Tabela 1. Vrednosti buildup faktora za energiju fotona 1 MeV i  $\mu r = 5$  proračunate sa tri izabrane empirijske aproksimacije i prema standardu ANS [6], za četiri različite materijalne sredine (olovo, gvožđe, beton i voda).**

Materijal	$\mu/\rho$ (cm <sup>2</sup> /g)	ANSI/ANS- 6.4.3-1991 $B_{ANS}$	Bergerova Aproksimacija $B_B$	Tejlorova Aproksimacija $B_T$	Aproksimacija Geometrijske progresije, $B_{GP}$
olovo	0,06843	2,43	2,392	2,441	2,444
gvožđe	0,0594	6,74	6,924	6,526	6,752
beton	0,06382	8,33	8,452	9,409	8,308
voda	0,07072	10,1	9,979	11,550	10,041

Analizom relativnih odstupanja proračunatih vrednosti od vrednosti standarda ANS može se uočiti da su najmanja odstupanja dobijena primenom aproksimacije geometrijske progresije, a potom Bergerove aproksimacije, dok su najveća odstupanja za Tejlorovu aproksimaciju. Ukoliko se razmatraju vrednosti za svaku materijalnu sredinu ponaosob, Bergerova aproksimacija ima najveće relativno odstupanje za gvožđe od 2,7% . Primenom Tejlorove aproksimacije relativna odstupanja su bila 3,1% za gvožđe, dok su znatno veća za običan beton (oko 13%) i za vodenu sredinu (14,4%).

#### 4. Zaključak

U radu je dat pregled izabranih empirijskih aproksimacija kao metoda kojima se mogu određivati vrednosti buildup faktora prilikom postavljenih problema iz svakodnevne operative prakse u zaštiti od gama i X zračenja. Može se zaključiti da bi primena aproksimacije geometrijske progresije imala prednosti u odnosu na Bergerovu i Tejlorovu aproksimaciju. U budućim istraživanjima bi bilo od interesa ispitati mogućnosti primene empirijskih aproksimacija u slučajevima rešavanja praktičnih problema sa složenijim geometrijskim konfiguracijama, posebno kada su u pitanju nehomogene materijalne sredine.

#### 5. Literatura

- [1] Y. Harima, N. Kurosawa, Y. Sakamoto, Parameter search of geometric-progression formula for gamma-ray isotropic point source buildup factors up to depths of 100 mfp, including contribution of secondary radiations, *Progress in Nuclear Science and Technology*, 4, 2014, 548-552.
- [2] A.B. Chilton, Tschebysheff-Fitted Berger Coefficients for Eisenhauer-Simmons Gamma-Ray Buildup Factors in Ordinary Concrete, *Nucl. Sci. Eng.* 69, 1979, 436-438.
- [3] K. Shure, O.J. Wallace, Taylor Parameters for Gamma-Ray Buildup Factors in the Proposed American National Standard, Report WAPD-TM-1628, 1988.
- [4] Y. Harima, S. Tanaka, Y. Sakamoto, H. Hirayama, Development of New Gamma-ray Buildup Factors and Applications to Shielding Calculations, *J. Nucl. Sci. And Techn.* 28, 1991, 74-78.
- [5] K. Takeushi, S. Tanaka, M. Kinno, Transport Calculations of Gamma Rays, Including Bremsstrahlung by Discrete Ordinates Code PALLAS, *Nucl. Sci. Eng.* 78, 1981, 272-283.
- [6] ANSI/ANS-6.4.3-1991, American National Standard Gamma Ray Attenuation Coefficients and Buildup Factors for Engineering materials, American Nuclear Society, 1991.



## SELECTED METHODS FOR BUILDUP FACTOR CALCULATION IN GAMMA AND X RADIATION PROTECTION

**Srboljub STANKOVIĆ<sup>1</sup>, Boris LONČAR<sup>2</sup>, Nikola KRŽANOVIĆ<sup>1</sup>,  
Miloš ŽIVANOVIĆ<sup>1</sup> and Gordan NIŠEVIĆ<sup>3</sup>**

- 1) *University of Belgrade, Institute of Nuclear Sciences VINČA, Belgrade, Serbia,  
[srbas@vinca.rs](mailto:srbas@vinca.rs), [krzanovic@vinca.rs](mailto:krzanovic@vinca.rs), [milosz@vinca.rs](mailto:milosz@vinca.rs)*
- 2) *University of Belgrade, Faculty of Technology and Metallurgy, Belgrade, Serbia,  
[bloncar@tmf.bg.ac.rs](mailto:bloncar@tmf.bg.ac.rs)*
- 3) *Best Oncosupport d.o.o., Belgrade, Serbia,  
[gordan.nisevic@bestoncosupport.com](mailto:gordan.nisevic@bestoncosupport.com)*

### ABSTRACT

This paper provides an overview of selected calculation method buildup factors based on empirical approximation that can not be solved practical problems in radiation protection, depending on their level of complexity. A basic case was considered for the determination of the buildup factor depending on the characteristics of the homogeneous material environment through which the transport of photons X and gamma radiation is carried out, then from the energy of photons from the radiation source, from the distance between the photon source and the point in the material environment in which the dosimetric size. After the discussion of the results of the calculation of the buildup factors for lead, iron, ordinary concrete and water, the conclusions about the efficiency of the application of individual calculation methods in a homogeneous material environment were carried out, taking into account that each of the methods presented has its advantages, as well as the limitations, depending on the focus of its application.

## DETERMINATION OF UNIFORMITY AND FIELD SIZE OF REFERENCE X-RAY BEAMS

Vedrana MAKARIĆ<sup>1</sup>, Miloš ŽIVANOVIĆ<sup>2</sup>, Nikola KRŽANOVIĆ<sup>2</sup>  
and Miloš ĐALETIĆ<sup>2</sup>

- 1) Institute of Metrology of Bosnia and Herzegovina, Sarajevo, Bosnia i Hercegovina, [vedrana.makaric@met.gov.ba](mailto:vedrana.makaric@met.gov.ba)
- 2) Vinca Institute of Nuclear Sciences, Department of Radiation and Environmental Protection, University of Belgrade, Belgrade, Serbia, [milosz@vinca.rs](mailto:milosz@vinca.rs), [krzanovic@vinca.rs](mailto:krzanovic@vinca.rs), [djaletic@vin.bg.ac.rs](mailto:djaletic@vin.bg.ac.rs)

### ABSTRACT

*The aim of this paper is to study the uniformity and the size of a reference radiation field produced by an x-ray generator. This work uses a technique to map dose distribution and measure dose rates with a small-volume spherical ionization chamber in order to determine the correction factor for non uniformity of the radiation field. Results shown in this paper are profile measurements performed in radiation beam collimated by a 4.2 cm diameter aperture, generated by calibration x-ray equipment of constant voltage and current. The study was conducted in a diagnostic radiology radiation quality, but this procedure is also applicable to the new revised version of ISO 4037 standard from 2019 which specifies protection level reference radiation qualities.*

### 1. Introduction

Reference radiation fields used for calibration of dosimeters should be realized in agreement with their purpose and they conform to the requirements which are defined by the International Organization for Standardization (ISO) and International Electrotechnical Commission (IEC) standards. ISO and IEC standards specify the requirements for reference radiation qualities used for radiation protection and for quality control in diagnostic radiology [1, 2]. International Atomic Energy Agency (IAEA) technical documents can also be used to establish reference radiation qualities [3, 4]. Technical document dealing with protection level radiation qualities, IAEA Safety Report Series 16, is currently based on the old version of the ISO standard and will need to be revised [3].

Taking into account the fact that x-ray beam is continuous in energies, phenomena such as the heel effect (the reduction of the radiation field intensity at the anode side due to the formation of x-rays that undergoes absorption or attenuation in the interior of the anode) and also scattered radiation from the experimental setup inside and outside the collimated beam, it is obvious that there are significant factors that could contribute to beam non uniformity.

According to the new version of ISO 4037, the air kerma rate at each point of test should not vary by more than 5% over the entire cross sectional area of the sensitive volume of the detector under test [1]. The requirements for diagnostic radiology calibrations are stricter – the air kerma rate variation should be less than 2% [4].

Considering the above requirements, this study investigates a technique that could allow precise determination of the field size and its uniformity, since both of these parameters are essential when performing calibration of radiation detectors.

In the previous work, dose profiles were determined in the same dosimetry laboratory for the old X-ray equipment by using a medical class ionization chamber [5].

### 2. Materials and methods

The study and characterization of the radiation field were realized in the beam generated by a Hopewell Designs x-ray generator model X80-225 with a constant potential (10 kV – 225 kV), in the Secondary Standard Dosimetry Laboratory (SSDL) of Vinca Institute of Nuclear Sciences (VINS). The dosimeter used in order to address the need for profile measurements was a 3.6 cm<sup>3</sup> Exradin A3 spherical ionization chamber.

X-ray dose measurements were conducted using the chamber connected to a PTW UNIDOS Weblin electrometer. The chamber's active volume has a radius of 9.7 mm and it is a reference standard for diagnostic radiology calibrations in VINS. During the field profile measurements, the chamber was positioned horizontally with its stem normal to the beam. The ionization chamber was irradiated for 10 minutes before the measurements for stabilization purposes. The tube voltage and current were kept constant and their values were 70 kV and 10 mA, respectively.

Beam profiles along horizontal and vertical axes were determined in RQR 5 radiation quality at 100 cm focus-detector-distance, and the chamber was moved horizontally and vertically covering the distance range from -14 cm to 14 cm in increments of 1 cm.

The correction factor for non uniformity of the radiation field can be calculated using the following equation:

$$k_{nu} = \frac{g(0) \cdot \int_0^R r dr}{\int_0^R g(r) r dr} \quad (1)$$

where:

$2\pi \int_0^R g(r) r dr$  is the dose integral over the sensitive surface of the dosimeter used for the

measurements,  $2\pi \int_0^R r dr$  is the sensitive surface of the dosimeter – R being the radius of the

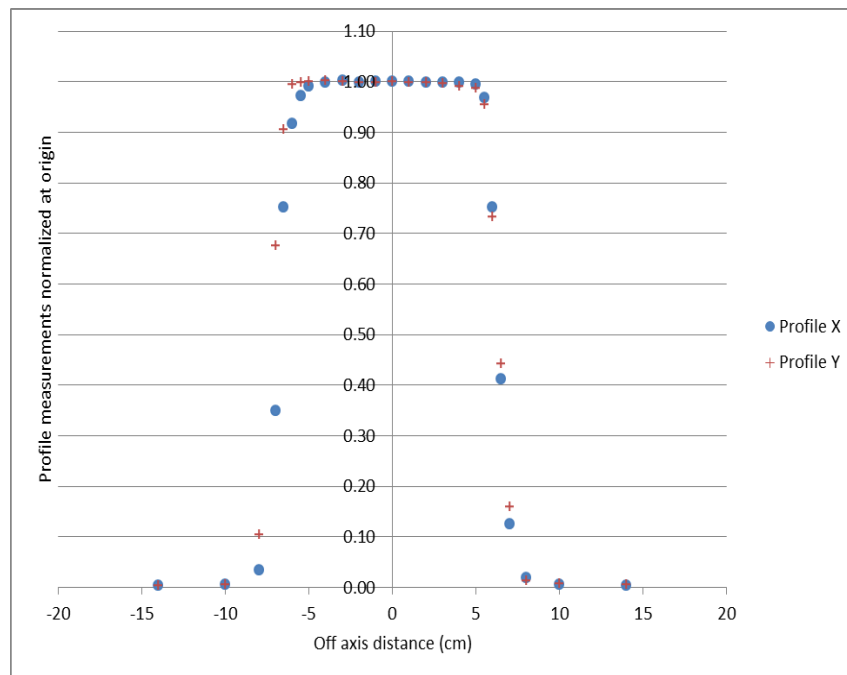
dosimeter,  $g(r)$  is the dose at a distance  $r$  from the axis and  $g(0)$  is the dose at a point on the axis [6].

In order to apply the above mentioned approach in this study, it was necessary to calculate the mean value of the profile and fit to a 4<sup>th</sup> degree polynomial to obtain the correction factor.

### 3. Results and discussion

According to the data provided by the X-ray generator manufacturer, the field diameter at 100 cm with 4.2 cm aperture was calculated to be 13.45 cm. Horizontal and vertical beam profiles measured with the ionization chamber are shown in Figure 1.

Measurements were corrected for influence quantities such as temperature and pressure. For better clarity, data are normalized at the origin of the profile axes.



**Figure 1. Horizontal and vertical profiles measured with Exradin A3 ionization chamber at 100 cm focus-detector distance.**

The field-size was calculated based on the measured horizontal and vertical relative intensity profiles (profile region within 50% intensity). As can be seen in the results in Table 1, data obtained with ionization chamber agree well with the calculated geometrical field size. The homogeneous profile regions (defined as 95% isodose level) were determined also. For applications in diagnostic radiology, homogenous region is often defined more strictly [4]. Using the wider field increases the measurement uncertainty, unless the non uniformity correction is applied.

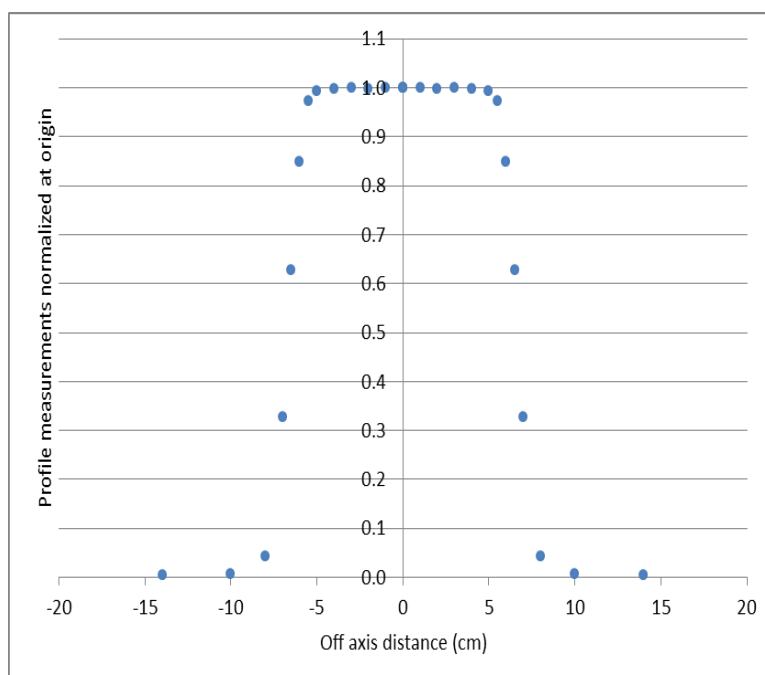
The values of the deviation of the calculated center of the field compared to the laser main beam axis are also included. The slightly negative values of the field center in x- and y-axes means that the main beam laser should be positioned lower by about 4 mm and in right direction by about 2 mm for perfect alignment. These deviations of the beam axis are calculated from the 50% profiles.

It is important to note that the finite size of the chamber used for measuring beam profiles is influencing the results and introducing measurement uncertainty. Use of smaller chambers would provide better spatial resolution, but the uncertainty due to the repeatability would increase significantly, because of the relatively low dose rate. The problem of low dose rates would be more pronounced for protection level fields compared to the diagnostic radiology fields. A radiation field profile measurement technique which uses radio chromic films could be used to increase the spatial resolution.

**Table 1. X ray field size as the result of the ionization chamber measurements.**

	<b>x-axis (cm)</b>	<b>y-axis (cm)</b>
Field size	13.18	13.71
Homogeneous region	11.93	11.84
Field center deviation	-0.2	-0.4

In order to determine the correction factor for non uniformity of the reference radiation field, the average value of data obtained by measurements over 2 axes is calculated and the mean profile is presented in Figure 2.



**Figure 2. Mean profile calculated from measurements with Exradin A3 ionization chamber at 100 cm focus-detector distance in a 4.2 cm diameter field.**

Mean profile was fitted using 4th degree polynomial from the 95% profile region to allow analytical calculation of the correction factor  $k_{nu}$ . The correction factor calculated by applying the formula (1) gives value of 1.0005 for Exradin A3 chamber over a sensitive surface of 1.94 cm diameter. This correction is under 0.1%, and the corrections of this magnitude are usually neglected in SSDs [7].

In this case the correction is small as it was expected. However, the correction factor could significantly increase for larger dosimeters. This is very important for determining maximum allowed detector sizes at certain distances and uncertainties due to field nonuniformity.

#### 4. Conclusion

X-ray beams used in calibration laboratories are well collimated, but some non uniformity is always present. Mapping the dose rate is necessary in order to estimate the measurement uncertainty, to determine the useful area of the beam and to perform

corrections for non uniformity. Method with small ionization chamber was successfully used and results are presented in this paper. Results are comparable to the manufacturer specifications. Comparison of this method with radio chromic films would provide better understanding of the beam mapping and would help determine the influence of the finite size of ionization chamber.

### 5. Acknowledgement

The research was supported by the International Atomic Energy Agency (IAEA) under the IAEA TC BOH9009 project “Sustaining an Integrated Management System and Capabilities in the Regulatory Body and Strengthening Capabilities of the Dosimetry Laboratory”.

### 6. Literature

- [1] ISO 4037-1:2019, X and gamma reference radiation fields for calibrating dosimeters and doserate meters and for determining their response as a function of photon energy - Part 1: Radiation characteristics and production methods, ISO, Geneva, 2019.
- [2] IEC 61267:2005, Medical diagnostic X-ray equipment – Radiation conditions for use in the determination of characteristics, IEC, 2005.
- [3] Safety Report Series No. 16, Calibration of Radiation Protection Monitoring Instruments, IAEA, Vienna, 2000.
- [4] Technical Report Series No. 457, Dosimetry in Diagnostic Radiology: An International code of practice, IAEA, Vienna, 2007.
- [5] S. Ćeklić, M. Živanović, D. Arandžić, P. Božović, J. Stanković, Đ. Lazarević, Dozni profili referentnih snopova X-zračenja, *XXVIII simpozijum Društva za zaštitu od zračenja Srbije i Crne Gore*, 30. septembar – 2. oktobar 2015, Vršac, 2015, 340 - 343.
- [6] S. Dufreneix, A. Ostrowsky, M. Le Roy, L. Sommier, J. Gouriou, F. Delaunay, B. Rapp, J. Daures and J-M. Bordy. Using a dose-area product for absolute measurements in small fields: a feasibility study. *Phys. Med. Biol.* 61(2), 2015, 650-662.
- [7] IAEA-TECDOC-1585, Measurement Uncertainty - A practical guide for Secondary Standards Dosimetry Laboratories, IAEA, Vienna, 2008.

## ODREĐIVANJE UNIFORMNOSTI I VELIČINE REFERENTNOG POLJA X- ZRAČENJA

Vedrana MAKARIĆ<sup>1</sup>, Miloš ŽIVANOVIĆ<sup>2</sup>, Nikola KRŽANOVIĆ<sup>2</sup>  
i Miloš ĐALETIĆ<sup>2</sup>

- 1) *Institut za mjeriteljstvo Bosne i Hercegovine, Sarajevo, Bosna i Hercegovina,*  
[vedrana.makaric@met.gov.ba](mailto:vedrana.makaric@met.gov.ba)
- 2) *Institut za nuklearne nauke Vinča, Univerzitet u Beogradu, Beograd, Srbija,*  
[milosz@vinca.rs](mailto:milosz@vinca.rs), [krzanovic@vinca.rs](mailto:krzanovic@vinca.rs), [djaletic@vin.bg.ac.rs](mailto:djaletic@vin.bg.ac.rs)

### SADRŽAJ

Cilj ovog rada je da se ispita uniformnost i veličina referentnog polja generisanog pomoću generatora X-zračenja. U tu svrhu je korišćena jonizaciona komora male zapremine tako što su mapirane jačine doze. Na osnovu merenja, određen je korekcionni faktor za neuniformnost polja zračenja. Rezultati prikazani u ovom radu se odnose na polje kolimisano pomoću aperture prečnika 4,2 cm i generisano pomoću generatora X-zračenja konstantnog napona i struje. Ispitivanje je izvršeno u kvalitetu zračenja koji se koristi u dijagnostičkoj radiologiji, ali je ova procedura takođe primenjiva i na kvalitete koji se koriste za etaloniranje uređaja za zaštitu od zračenja definisane u novoj verziji ISO 4037 iz 2019. godine.



## PROVERA APSORBOVANIH DOZA U VODI U RADIOTERAPIJSKIM USTANOVAMA SRBIJE OD 2017. DO 2019. GODINE

Nikola KRŽANOVIĆ<sup>1,2</sup>, Miloš ŽIVANOVIĆ<sup>2</sup>,  
Predrag BOŽOVIĆ<sup>1,2</sup> i Srboljub STANKOVIĆ<sup>2</sup>

1) Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, Beograd, Srbija,  
[krzanovic@vinca.rs](mailto:krzanovic@vinca.rs), [bozovic@vinca.rs](mailto:bozovic@vinca.rs)

2) Univerzitet u Beogradu, Institut za nuklearne nauke Vinča, Beograd, Srbija,  
[milosz@vinca.rs](mailto:milosz@vinca.rs), [srbas@vinca.rs](mailto:srbas@vinca.rs)

### SADRŽAJ

*Kontrola kvaliteta u radioterapiji je od velike važnosti za poboljšanje preciznosti i pouzdanosti radioterapijskih procedura. Minimizacija negativnih posledica po pacijente se postiže smanjenjem verovatnoće pojavljivanja slučajnih i sistematskih grešaka identifikovanjem problema u postojećim standardnim procedurama u bolnicama. Značajna metoda kontrole kvaliteta rada radioterapijskih centara jeste program poštanske termoluminiscentne dozimetrije, zajednički organizovan od strane Međunarodne agencije za atomsku energiju i Svetske zdravstvene organizacije, a u kojem učestvuje oko 1700 bolnica širom sveta. Radioterapijski centri u Srbiji takođe učestvuju u ovom programu. Program poređenja apsorbovanih doza u vodi u radioterapijskim centrima u Srbiji je sproveden i tokom 2017, 2018. i 2019. godine. U tom periodu, broj obuhvaćenih centara je porastao sa šest na osam. Radiofotoluminiscentni dozimetri su ozračivani u visokoenergetskim poljima X-fotona generisanim pomoću linearnih akceleratora.*

### 1. Uvod

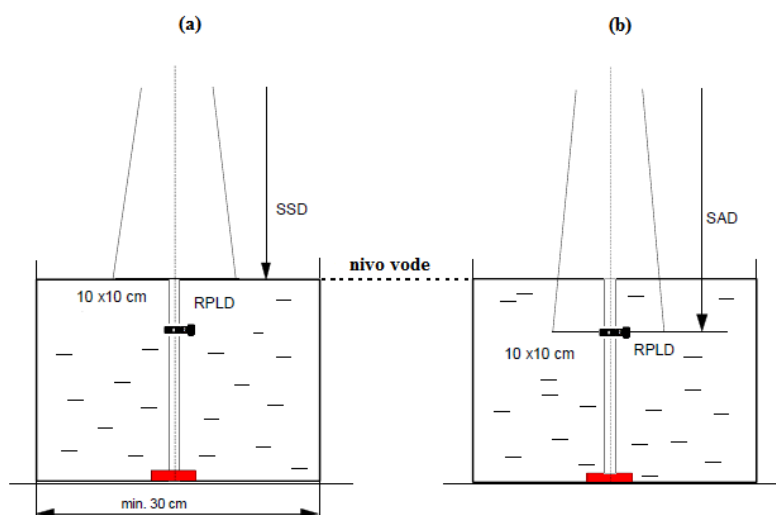
Radioterapijske provere doza zasnovane na upotrebi poštanske termoluminiscentne dozimetrije (TLD), organizovani od strane Međunarodne agencije za atomsku energiju (IAEA) i Svetske zdravstvene organizacije (WHO) se sprovode još od 1969. godine. Najpre su se TL dozimetri koristili za interkomparacije u poljima radioterapijskih Co-60, da bi se 1991. godine u IAEA/WHO TLD program uključili i kvaliteti zračenja fotona visokih energija proizvedenih u akceleratorima dostupnim u bolnicama. Pored kontrole kvaliteta radioterapijskih procedura u bolnicama, IAEA/WHO sprovodi i program poštanske dozimetrije namenjen dozimetrijskim laboratorijama sa sekundarnim etalonima (eng. *Secondary Standard Dosimetry Laboratory, SSDL*) u radioterapiji [1]. Učešće u programu poštanske dozimetrije je dobrovoljno, pri čemu se ponovna kontrola vrši u periodu od dve godine.

### 2. Materijali i metode

Termoluminiscentni (TL) dozimetri se poštom distribuiraju do učesnika programa (radioterapijski centri), gde se ozračuju u poljima visokoenergetskih fotona radionuklida

Co-60 ili megavoltažnih snopova X-zračenja linearnih akceleratora. Nakon ozračivanja se informacija o apsorbovanoj dozi dobija u dozimetrijskoj laboratoriji Međunarodne agencije za atomsku energiju, gde se TLD očitavaju. Apsorbovana doza se proračunava u odeljenju za dozimetriju i medicinsku fiziku pri IAEA, nakon čega se ova referentna vrednost upoređuje sa vrednošću apsorbovane doze kojom je ozračen TLD isporučen iz određenog radioterapijskog centra. TL dozimetri su u obliku cilindra prečnika 0,5 cm i visine 2,5 cm. U okviru kontrole kvaliteta sprovedene u radioterapijskim centrima tokom 2016. godine su korišćeni isključivo TL dozimetri [2]. U periodu od 2017. do 2019. godine su TL dozimetri zamenjeni pasivnim dozimetrima baziranim na efektu radiofotoluminiscencije (RPL). Za razliku od TL dozimetara RPL dozimetri nemaju simetričnu zapreminu, pri čemu je centar aktivne zapremine obeležen na površini dozimetara. Stakleni cilindri RPL dozimetara se čuvaju u nosećim kapsulama, jer je aktivna zapremina ovih dozimetara izuzetno osetljiva na spoljne uslove (povećana vlažnost vazduha, temperatura, Sunčevo elektromagnetno zračenje). Budući da se dozimetri u IAEA/WHO programu koriste za merenje vrednosti apsorbovane doze u vodi, kapsule sa dozimetrima su vodootporne [3].

RPL dozimetri su ozračivani na dubini od 10 cm u vodenom fantomu. Rastojanje između izvora zračenja i površine vode (SSD, eng. *source to surface distance*) ili rastojanje između izvora zračenja i centralne ose dozimetra (SAD, eng. *source to axis distance*) je vrednosti koje se koriste prilikom regularnih radioterapijskih procedura ozračivanja pacijenata. Na rastojanju SSD ili SAD, u zavisnosti od procedure koja se koristi u određenom radioterapijskom centru, dimenzije polja zračenja su 10 x 10 cm<sup>2</sup> [4-6]. Na slici 1 su prikazane geometrijske eksperimentalne postavke za ozračivanje RPL dozimetara u vodenom fantomu. Referentna vrednost apsorbovane doze u vodi kojom je neophodno ozračiti dozimetre je 2 Gy. U dozimetrijskoj laboratoriji IAEA je kontrolna grupa dozimetara ozračena u referentnom polju radionuklida Co-60 istom vrednošću apsorbovane doze, dok radioterapijski centri prilikom ozračivanja u poljima fotona megavoltažnih radnih napona X-cevi proračunavaju apsorbovanu dozu primenom korekcionih faktora za kvalitet snopa zračenja [5].



**Slika 1. Eksperimentalna postavka procedure ozračivanja RPL dozimetara u vodenom fantomu sa (a) rastojanjem izvor zračenja – površina vode u fantomu; (b) rastojanjem izvor zračenja – centralna osa cilindričnog dozimetra. Dimenzije polja na rastojanju SSD/SAD su 10 x 10 cm<sup>2</sup>.**

**Tabela 1. Spisak radioterapijskih centara koji su učestvovali u IAEA/WHO programu od 2017. do 2019. godine.**

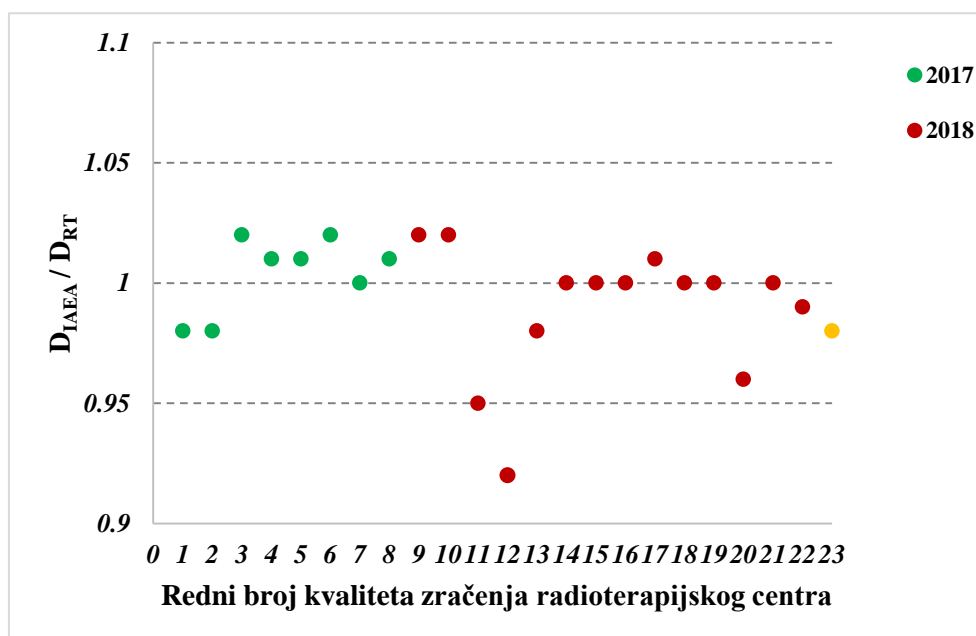
<b>Radioterapijski centar</b>	<b>Generator visokoenergetskog snopa zračenja</b>	<b>Snop zračenja akceleratora</b>	<b>Godina učešća</b>
Klinički centar Kragujevac	Elekta Synergy Platform Elekta Synergy Platform Elekta Precise	6 MV 10 MV 18 MV	2017
	Elekta Precise Elekta Precise Elekta Synergy	6 MV 10 MV 10 MV	2018
	Varian Clinac iX Varian Clinac iX Elekta Synergy Platform	6 MV 15 MV 6 MV	2019
Institut za onkologiju Vojvodine	Elekta Versa HD Elekta Versa HD Elekta Versa HD	6 MV 10 MV 15 MV	2017
	Varian Clinac 600	6 MV	2018
	Elekta Versa HD Elekta Versa HD Elekta Versa HD	6 MV 10 MV 15 MV	2019
Klinički centar Niš - klinika za onkologiju	Elekta Synergy Platform Elekta Synergy Platform Siemens Oncor Impression	6 MV 10 MV 15 MV	2018
	Varian Clinac iX Varian Clinac iX	6 MV 16 MV	2019
Zdravstveni centar Kladovo	Varian Clinac 600 C	6 MV	2018
	Varian Clinac iX Varian Clinac iX	6 MV 16 MV	2019
Vojnomedicinska akademija	Elekta Synergy Platform Elekta Synergy Platform Elekta Synergy Platform	4 MV 10 MV 18 MV	2018
Institut za onkologiju i radiologiju Srbije	Elekta Synergy Platform Elekta Synergy Platform	6 MV 15 MV	2017
	Elekta Synergy Platform Elekta Synergy Platform	6 MV 10 MV	2018
	Varian True Beam 2.5 Varian True Beam 2.5 Varian True Beam 2.5	6 MV 10 MV 15 MV	2019
Institut za plućne bolesti Vojvodine	Elekta Versa HD Elekta Versa HD Elekta Versa HD	6 MV 10 MV 15 MV	2019
Klinički centar Srbije	Varian Edge Varian Edge	6 MV 10 MV	2019

U okviru programa sprovedenog u periodu od 2017. do 2019. godine su u radioterapijskim centrima korišćena isključivo polja visokoenergetskog X-zračenja. U tabeli 1 je prikazan spisak radioterapijskih centara koji su učestvovali u IAEA/WHO programu poštanske dozimetrije u periodu od 2017. do 2019. godine.

### 3. Rezultati i diskusija

Nakon ozračivanja dozimetara u određenom radioterapijskom centru i očitavanja dozimetara u dozimetrijskoj laboratoriji IAEA, vrednost koju je prijavio radioterapijski centar se poredi sa referentnom vrednošću iz IAEA. Kriterijum kontrole kvaliteta jeste odstupanje od 5% od referentne vrednosti. Ako prijavljene vrednosti apsorbovane doze određenog radioterapijskog centra pokazuju manje odstupanje od 5%, preporučuje se učešće na narednoj interkomparaciji (periodično nakon dve godine) radi kontinualne kontrole kvaliteta radioterapijskih procedura. Ukoliko je neka od prijavljenih vrednosti apsorbovane doze veća od granice odstupanja od 5%, radioterapijskom centru sa ovom vrednošću se ubrzo nakon proračuna isporučuje nova grupa dozimetara radi ponavljanja procedure. Kada ni druga grupa dozimetara ozračenih u radioterapijskom centru ne pokazuje zadovoljavajuće rezultate, neophodno je uzrok odstupanja otkloniti ekspertskom posetom, uz preporuku učešća te radioterapijske ustanove u programu poštanske dozimetrije nakon jedne godine. Najčešći uzroci odstupanja van zadatih granica jesu greške nastale usled nestabilnosti generatora zračenja i/ili usled nedovoljnog poznavanja i razumevanja radioterapijske procedure [7].

Na slici 2 su prikazani rezultati kontrole kvaliteta radioterapijskih procedura putem eksterne provere (eng. *audit*) poštanskom dozimetrijom sa pasivnim radiofotoluminiscentnim dozimetrima (RPLD), pri čemu je redosled radioterapijskih centara slučajan.



Slika 2. Rezultati IAEA/WHO kontrole kvaliteta eksternom proverom putem poštanske dozimetrije 2017. i 2018. godine. Prikazan redosled radioterapijskih centara je slučajan, pri čemu je vrednost označena sa 2018\* rezultat ponovljene provere.

Rezultati su predstavljeni u vidu odnosa referentne vrednosti apsorbovane doze u vodi očitane u dozimetrijskoj laboratoriji IAEA nakon ozračivanja u radioterapijskom centru ( $D_{IAEA}$ ) i prijavljene vrednosti apsorbovane doze u vodi od strane radioterapijskog centra ( $D_{RT}$ ). Rezultati eksterne provere poštanskom dozimetrijom iz 2017. godine se svi nalaze u okviru zadatih granica odstupanja od 5%, dok se jedan kvalitet zračenja u jednom radioterapijskom centru tokom 2018. godine našao van zadatih granica, sa vrednošću od 0,92. Prema proceduri eksterne provere novi RPL dozimetri su isporučeni radioterapijskom centru, i nakon ponovljene procedure ozračivanja se rezultat našao u propisanim granicama, sa vrednošću od 0,98. Uzrok nezadovoljavajućeg rezultata radioterapijskog centra u 2018. godini je bio kvar na uređaju, no rezultat ponovljenog ozračivanja je bio u propisanim granicama. Prema tome ekspertska poseta nije bila neophodna.

Rezultati provere doza u radioterapijskim centrima za 2019. godinu još uvek nisu dostupni.

#### 4. Zaključak

Kontrola kvaliteta putem eksterne provere poštanskom TL/RPL dozimetrijom je jedna od značajnih mera neophodnih za uspostavljanje i održavanje kvaliteta sprovođenja radioterapijskih procedura u bolnicama. Cilj ove metode jeste minimizacija verovatnoće pojave grešaka prilikom radioterapijskih tretiranja pacijenata, što je veoma važno, zbog primena velikih jačina doze prilikom korišćenja visokoenergetskih kvaliteta polja zračenja. U 2019. godini je broj radioterapijskih centara u Srbiji koji učestvuju u ovom programu porastao sa šest na osam.

#### 5. Literatura

- [1] <http://www-naweb.iaea.org/nahu/DMRP/tld.html>, pristupljeno 19.05.2019.
- [2] Đ. Lazarević, M. Živanović, N. Kržanović. Provera apsorbovanih doza u vodi u radioterapijskim ustanovama Srbije u 2016. godini. *Zbornik radova XXIX simpozijuma DZZ SCG*, 2017, 302-306.
- [3] J. Izewska. Introducing a new RPLD system for dosimetry audits in radiotherapy. IAEA, Vienna, 2016.
- [4] IAEA, Comprehensive audits of radiotherapy practices: a tool for quality improvement. IAEA, Vienna, 2007.
- [5] IAEA, *Absorbed dose determination in external beam radiotherapy*. An international code of practice for dosimetry based on standards of absorbed dose to water. Technical reports series No. 398. IAEA, Vienna, 2000.
- [6] IAEA, *Absorbed dose determination in photon and electron beams*. An international code of practice. Technical Reports Series No. 277. IAEA, Vienna, 1987.
- [7] J. Izewska, P. Bera, S. Vanitsky. IAEA/WHO postal dose audit service and high precision measurements for radiotherapy level dosimetry. *Radiat. Prot. Dosim.* 101(1-4), 2002, 387–392.

**DOSIMETRY AUDIT IN RADIOTHERAPY CENTERS IN SERBIA  
IN PERIOD FROM 2017 TO 2019**

**Nikola KRŽANOVIĆ<sup>1,2</sup>, Miloš ŽIVANOVIĆ<sup>2</sup>, Predrag BOŽOVIĆ<sup>1,2</sup>  
and Srboj Stanković<sup>2</sup>**

- 1) *University of Belgrade, School of Electrical Engineering, Belgrade, Serbia,  
[krzanovic@vinca.rs](mailto:krzanovic@vinca.rs), [bozovic@vinca.rs](mailto:bozovic@vinca.rs)*
- 2) *University of Belgrade, Institute of Nuclear Sciences Vinča, Belgrade, Serbia,  
[milosz@vinca.rs](mailto:milosz@vinca.rs), [srbas@vinca.rs](mailto:srbas@vinca.rs)*

**ABSTRACT**

Quality control in radiotherapy is of great importance in order to improve accuracy and reliability of radiotherapy procedures in hospitals. Minimization of the possible negative consequences of these procedures is achieved by reducing the probability of any random or systematic errors appearing, by determining the existing problems in the standard hospital procedures. One of the important methods for the radiotherapy facilities quality control is the postal thermoluminescent dosimetry programme, co-organized by International Atomic Energy Agency and the World Health Organization, in which approximately 1700 hospitals throughout the world are participating. Radiotherapy centers in Serbia also participate in this programme, which has been executed during 2017, 2018 and 2019. During this period the number of participating radiotherapy centers in Serbia has increased from six to eight. Radiophotoluminescent dosimeters have been irradiated in the high-energy X-ray fields generated by using linear accelerators.

## PROVJERA TAČNOSTI APSORBOVANIH DOZA U CENTRU ZA RADIOTERAPIJU INTERNATIONAL MEDICAL CENTERS BANJA LUKA

**Milomir MILAKOVIĆ, Goran KOLAREVIĆ, Dražan JAROŠ,  
Tatjana IGNIĆ i Bojan PAVIČAR**

*International Medical Centers Banja Luka, Banja Luka, Bosna i Hercegovina,  
milomir.milakovic@affidea.com, goran.kolarevic@affidea.com,  
drazan.jaros@affidea.com, tatjana.ignic@affidea.com, bojan.pavicar@affidea.com*

### SADRŽAJ

*Istorijat: International Medical Centers Banja Luka od samog otvaranja 2010. godine učestvuje u programu IAEA/WHO Postal Dose Audit Service zajedno sa ostalim radioterapijskim centrima u Bosni i Hercegovini.*

*Cilj: Cilj ovog programa je nezavisna revizija tačnosti apsorbovane doze visokoenergetskih fotonskih snopova isporučene u tkivo pacijenata tokom radioterapijskih tretmana. Tačnost apsorbovane doze može značajno uticati na ishod terapijskog tretmana.*

*Materijal i metode: Revizija je vršena ozračivanjem TLD/RPLD dozimetara visokoenergetskim fotonskim snopovima koji su dobijeni terapijskim linearnim akceleratorima. Dozimetre kao i njihovo očitavanje obezbjedili su IAEA i WHO. Rezultati su prihvatljivi ako su unutar relativnog odstupanja od  $\pm 5\%$ .*

*Rezultati: Centar za radioterapiju IMC Banja Luka ima tri linearna akceleratora Varian Clinac DHX sa kojima je u ovom programu do sada učestvovao pet puta. Svi dosadašnji rezultati ovog programa pokazali su da su odstupanja u okviru prihvatljivih granica iz čega se može zaključiti da se dozimetrijski protokol sprovodi ispravno i u skladu sa međunarodnim standardima.*

### 1. Uvod

Nezavisne dozimetrijske revizije su efikasan način da se provjeri da li je kvalitet dozimetrijske prakse u centru za radioterapiju adekvatan za postizanje ciljeva liječenja tumora. Ovo je posebno važno jer je radioterapija potencijalno visoko rizična procedura. Jedan od rizika za pacijenta koji je podvrgnut zračenju je uticaj neadekvatne kliničke dozimetrije na lokalnu kontrolu tumora, smrtnost tokom tretmana i toksičnost, stoga utiču na opstanak i kvalitet života pacijenta. Dozimetrijske revizije pomažu u identifikaciji problema i pružaju podršku u njihovom rješavanju. Revizije su poboljšale tačnost dozimetrije u mnogim radioterapijskim centrima tokom vremena, i pomogli su u uspostavljanju i održavanju adekvatne prakse medicinske fizike [1].

Program IAEA zajedno sa Svjetskom zdravstvenom organizacijom (WHO), *Postal Dose Quality Audit*, vrši revizije teleterapijskih snopova pomoću termoluminescentne dozimetrije (TLD) kako bi se potvrdila njihova kalibracija u centrima koji sprovode radioterapiju u zemljama u razvoju. Ovaj program se sprovodi od 1969. godine i ima za cilj poboljšanje tačnosti i konzistentnost kliničke dozimetrije širom svijeta. Tokom ovog



perioda od 37 godina, IAEA/WHO TLD program je verifikovao kalibraciju više od 6200 fotonskih snopova u približno 1500 radioterapijskih centara [2].

Ovaj program se održava svake dvije godine za radioterapijske centre u Bosni i Hercegovini i učešće je dobrovoljno i besplatno, a odnosi se samo na teletrapijske snopove isporučene iz linearnih akceleratora ili kobalt mašina.

Centar za radioterapiju International Medical Centers Banja Luka ima tri linearna akceleratora Varian Clinac DHX sa kojima u ovom programu učestvuje od samog otvaranja 2010. godine, što je pet puta do sada.

## 2. Materijal i metodologija

Svaki učesnik u programu dobija od IAEA kodirani paket od tri dozimetrijska sistema za svaki snop koji je prijavljen, dva za ozračivanje i jedan za prikupljanje okolnog zračenja, akrilni držač sa postoljem u koji se postavljaju dozimetri, uputstvo za sprovođenje procedure ozračivanja dozimetara i odštampanu verziju blanko izvještaja o podacima za korišćenu mjernu opremu i metodu za proračun doze u vodi [3].

### 2.1. Dozimetri

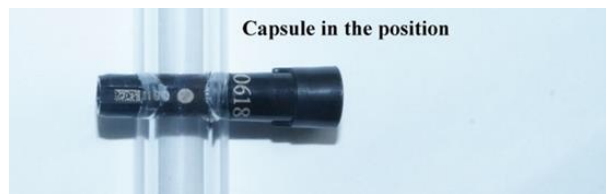
U ovom programu korišteni su termoluminescentni dozimetri (TLD) koji su u obliku cilindra napravljenog od polietilena ispunjenog litijum-fluorid prahom (LiF) i koji su vodootporni [3, 4]. Ovi dozimetri su korišteni do 2017. godine nakon čega su zamijenjeni novim dozimetrijskim sistemom zasnovanom na radiofotoluminescentnim dozimetrima (RPLD). Ovi dozimetri su u obliku staklenih šipki dugačkih 12 mm postavljenih u vodootporna kapsula od polietilena. Svaki dozimetar ima jedinstveni identifikacioni broj (ID) ugraviran na jednom kraju. RPLD kapsule takođe imaju identifikacione brojeve koji odgovaraju identifikacionim brojevima koji su urezani na staklu. Dužina aktivnog dijela dozimetra je 6 mm asimetrično locirana kako bi se izbjegla gravure ID na staklu. Sredina aktivne zapremine je označena sa tačkom na RPLD kapsuli [5].



**Slika 1. RPLD: zaštitna plastična kapsula sa ID brojem i staklena šipka.**

Staklene šipke moraju se stalno držati u zaštitnim kapsulama (slika 1) kako bi se izbjeglo izlaganje dozimetra prljavštini i vlažnosti i ne treba ih dirati golim prstima. U slučaju otvaranja, staklene šipke moraju biti vraćene u odgovarajuće kapsule sa ID brojevima ugraviranim na staklu prema poklopcu kako bi se osiguralo da je aktivna zapremina centrirana kao što je označeno tačkom na kapsuli (slika 1). Postupak ozračivanja za RPLD je u suštini isti kao i za TLD, ali RPLD kapsula ima nešto drugačiji oblik i dimenzije u odnosu na TLD. RPLD moraju biti precizno pozicionirani u cijevi držača, a tačka na RPLD kapsuli olakšava pozicioniranje (slika 2). Novi standardni IAEA držač je uključen u paket dozimetra koji ima otvor koji odgovara dimenzijama RPLD kapsula. Stakleni dozimetri se mogu ponovo koristiti nakon

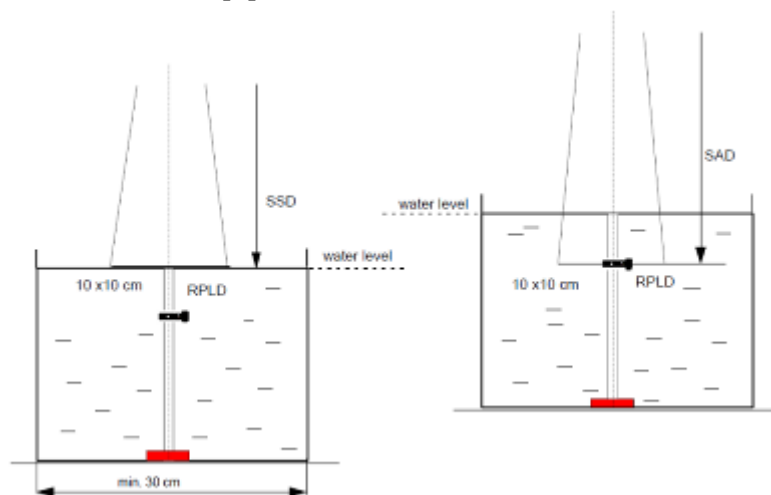
žarenja, ali su veoma skupi u odnosu na TLD. Da bi se koristilo ponovnom upotrebom, od presudne je važnosti da se RPLD-ovi obrađuju pažljivo [5].



**Slika 2. RPLD kapsula u odgovarajućem položaju za ozračivanje u držaču standarda IAEA.**

## 2.2. Isporuka doze

Prema, gore navedenom uputstvu, dozimetre je potrebno ozračiti dozom od 2 Gy u vodi na dubini 10 cm sa veličinom polja 10 cm x 10 cm sa SSD ili SAD postavkom zavisno koja se koristi klinički, slika 3 [6].



**Slika 3. Postavke za ozračivanje dozimetara.**

Ovo je doza kojom su ozračena dva dozimetra, odnosno, koju je korisnik naveo u izvještaju i ona se naziva  $D_{User}$ . Da bi se dobio što tačniji rezultat, najbolje bi bilo prije ozračivanja dozimetra izmjeriti „beam output“ faktor i procentnu dubinsku dozu (PDD), zatim izračunati broj monitorskih jedinica da bi se isporučila doza od 2 Gy na dubinu od 10 cm na kojoj se nalazi dozimetar. Ovako ozračene dozimetre potrebno je u određenom vremenskom roku poslati u IAEA laboratoriju za očitavanje dozimetra. Srednja vrijednost očitavanja ova dva dozimetra u izvještaju se naziva „IAEA mean dose“ ili  $D_{TLD}$ .

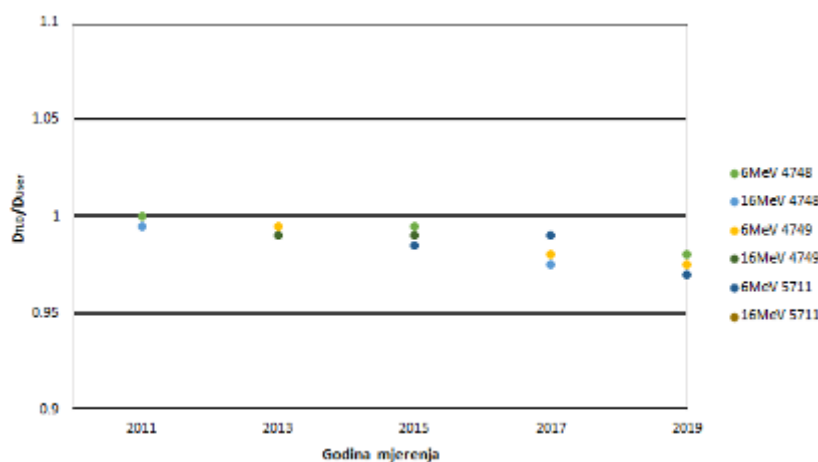
## 3. Rezultati i diskusija

Na grafiku prikazanom na slici 4 prikazani su rezultati IAEA/WHO revizije doze tretmanskim linernim akceleratora u IMC Banja Luka koje su rađene od 2011. do 2019. godine, svake druge godine. Tačke na grafiku prikazuju odnose srednjih vrijednosti očitanih doza u IAEA laboratoriji ( $D_{TLD}$ ) i vrijednosti prijavljenih doza od strane korisnika ( $D_{User}$ ).

Ako je odnos  $D_{TLD}/D_{User}$  unutar ograničenja prihvatljivosti od  $\pm 5\%$ , sljedeće učešće se preporučuje nakon perioda od dvije godine. Institucije sa rezultatima izvan granice prihvatljivosti od  $\pm 5\%$  dobijaju drugi, naknadni set dozimetara za hitno ponavljanje zračenja. Ako drugi rezultat revizije opet nije prihvatljiv, preporučuje se posjeta eksperata kako bi se otklonila neusklađenost, a sljedeće učešće se preporučuje nakon jedne godine. IAEA/WHO osoblje i nacionalni koordinatori revizije, čuvaju povjerljivost rezultata ovog programa revizije, i oni se inače ne objavljuju bez pismene dozvole svakog pojedinog centra za radioterapiju [7].

Vidimo da je odnos  $D_{TLD}/D_{User}$  za sve linearne akceleratora, na svakoj reviziji bio unutar  $\pm 5\%$ . Isto tako, možemo vidjeti da se odstupanje povećava kako se povećava starost linearnih akceleratora što može uticati na stabilnost u njihovom radu. Tako je 2011. godine odstupanje bilo 0 i 0,05% da bi se 2019. godine povećalo na 3%.

Ovdje se može napomenuti da je i dozimetrijska oprema koja se koristi za kalibraciju linearnih akceleratora nabavljena u isto vrijeme kad i sami akceleratori.



Slika 4. Rezultati IAEA/WHO revizije doze u IMC Banja Luka.

#### 4. Zaključak

Program IAEA/WHO Postal Dose Audit Service za reviziju visokoenergetskih radioterapijskih fotonskih snopova pokazao se veoma efikasnim u otklanjanju grešaka koje se dešavaju pri sprovođenju dozimetrijskog protokola što je dovelo do značajnog smanjenja akcidenata u radioterapiji širom svijeta.

Centar za radioterapiju IMC Banja Luka sa svoja tri linearne akceleratora Varian Clinac DHX u ovom programu do sada je učestvovao pet puta. Svi dosadašnji rezultati ovog programa pokazali su da su odstupanja u okviru prihvatljivih granica iz čega se može zaključiti da se dozimetrijski protokol sprovodi ispravno i u skladu sa međunarodnim standardima.

#### 5. Literatura

- [1] J. Izewska, W. Lechner, P. Wesolowska. Global availability of dosimetry audits in radiotherapy: The IAEA dosimetry audit networks database. *Phys. Imag. Radiat. Oncol.* 5, 2018, 1–4.
- [2] Comprehensive Audits of Radiotherapy Practices: A Tool for Quality

- Improvement, International Atomic Energy Agency (IAEA), Vienna, 2007.
- [3] Đ. Lazarević, S. Stanković, M. Živanović. Provjera doza u radioterapijskim ustanovama Srbije u 2013. godini. *Zbornik radova XXVII simpozijuma DZZ SCG*, 2-4. Oktobar 2013, Vrnjačka Banja, 2013, 246 - 250.
- [4] J. Izewska, P. Andreo. The IAEA/WHO TLD postal programme for radiotherapy hospitals. *Radiother. Oncol.* 54, 2000, 65 – 72.
- [5] IAEA Laboratory Seibersdorf, Introducing a new RPLD system for dosimetry audits in radiotherapy, Austria, 2017.
- [6] IAEA Laboratory Seibersdorf, IAEA/WHO POSTAL DOSE QUALITY AUDIT for Co-60 and Megavoltage X-ray Beams INSTRUCTION SHEET, Austria, 2017.
- [7] J. Izewska. Principles of operation of the IAEA/WHO postal dose audit service for radiotherapy centres, IAEA Laboratories at Siebersdorf, Austria, 2016.

**CHECKING THE ACCURACY OF THE ABSORBED DOSES IN  
THE CENTER FOR RADIOTHERAPY INTERNATIONAL  
MEDICAL CENTERS BANJA LUKA**

**Milomir MILAKOVIĆ, Goran KOLAREVIĆ, Dražan JAROŠ,  
Tatjana IGNIĆ and Bojan PAVIČAR**

*International Medical Centers Banja Luka, Banja Luka, Bosna i Hercegovina,  
[milomir.milakovic@affidea.com](mailto:milomir.milakovic@affidea.com), [goran.kolarevic@affidea.com](mailto:goran.kolarevic@affidea.com),  
[drazan.jaros@affidea.com](mailto:drazan.jaros@affidea.com), [tatjana.ignic@affidea.com](mailto:tatjana.ignic@affidea.com), [bojan.pavicar@affidea.com](mailto:bojan.pavicar@affidea.com)*

**ABSTRACT**

**History:** Since its inception in 2010, International Medical Centers Banja Luka has been participating in the IAEA/WHO Postal Dose Audit Service program together with other radiotherapy centers in Bosnia and Herzegovina.

**Objective:** The aim of this program is to independently review the accuracy of the absorbed dose of high-energy photon beams delivered to the tissue of patients during radiotherapy treatments. The accuracy of the absorbed dose can significantly affect the outcome of the therapeutic treatment.

**Material and methods:** The audit was carried out by irradiating TLD/RPLD dosimeters with high-energy photon beams obtained by therapeutic linear accelerators. Dosimeters as well as their readings were provided by IAEA and WHO. The results are acceptable if within the relative deviation of  $\pm 5\%$ .

**Results:** Center for radiotherapy IMC Banja Luka has three linear accelerators Varian Clinac DHX with which it has participated in this program five times. Until now all results of this program have shown that deviations are within the acceptable limits from which it can be concluded that the dosimetric protocol is implemented correctly and in accordance with international standards.

## REPORT OF EURADOS ACTIVITY OF WG12 IN INTERVENTIONAL RADIOLOGY PROCEDURES

**Ferrari PAOLO<sup>1</sup>, Becker FRANK<sup>2</sup>, Jovanovic ZORAN<sup>3</sup>, Khan SHAHED<sup>4</sup>,  
Bakhanova ELENA<sup>5</sup>, Principi SARA<sup>6</sup>, Krstic DRAGANA<sup>3</sup>,  
Pierotti LUISA<sup>7</sup>, Mariotti FRANCESCA<sup>1</sup>, Faj DARIO<sup>8</sup>, Turk TAJANA<sup>8,9</sup>,  
Nikezic DRAGOSLAV<sup>3</sup> and Bertolini MARCO<sup>10</sup>**

- 1) ENEA – IRP, Radiation Protection Institute, Bologna, Italy, [paolo.ferrari@enea.it](mailto:paolo.ferrari@enea.it)
- 2) Karlsruhe Institute of Technology, Institute for Nuclear Waste Disposal, Eggenstein-Leopoldshafen, Germany, [frank.becker@kit.edu](mailto:frank.becker@kit.edu)
- 3) Faculty of Science, University of Kragujevac, Kragujevac, Serbia, [z.jovanovic@kg.ac.rs](mailto:z.jovanovic@kg.ac.rs), [nikezic@kg.ac.rs](mailto:nikezic@kg.ac.rs), [dragana@kg.ac.rs](mailto:dragana@kg.ac.rs)
- 4) Department of Physics, University of Surrey, Guildford, Surrey, UK, [s.khan.rcs@gmail.com](mailto:s.khan.rcs@gmail.com)
- 5) National Research Center for Radiation Medicine, Kyiv, Ukraine, [elena.bakhanova@gmail.com](mailto:elena.bakhanova@gmail.com)
- 6) Universitat Politècnica de Catalunya Avda. Diagonal, Barcelona, Spain, [sara.principi@upc.edu](mailto:sara.principi@upc.edu)
- 7) AO SP S.Orsola-Malpighi Hospital, Bologna, Italy, [luisa.pierotti@aosp.bo.it](mailto:luisa.pierotti@aosp.bo.it)
- 8) University of Osijek UNIOS Faculty of Medicine, Osijek, Croatia, [dario.faj@fdmz.hr](mailto:dario.faj@fdmz.hr)
- 9) University Hospital of Osijek, Osijek, Croatia, [turk.tajana@gmail.com](mailto:turk.tajana@gmail.com)
- 10) AUSL Reggio Emilia Hospital IRCCS, Reggio Emilia, Italy, [Marco.Bertolini@ausl.re.it](mailto:Marco.Bertolini@ausl.re.it)

### ABSTRACT

*Interventional radiology and cardiology are widespread employed techniques for diagnosis and treatment of several pathologies because they avoid the majority of the side-effects associated with surgical treatments, but are known to increase the radiation exposure to patient and operators. In recent years many studies treated the exposure of the operators performing procedures in radiology and cardiology. In the present work, the exposure condition of the interventional radiology medical staff is modelled through anthropomorphic phantoms and Monte Carlo simulations. The ratio of the operational quantity  $H_p(10)$  to Kerma Area Product (KAP) is evaluated through the simulation of a personal dosimeter above the protective apron and normalized to the simulated KAP value. For the same operator the effective dose is calculated too. Those values can be employed for double dosimetry effective dose algorithm testing, for dosimetric characterization of a interventional room or to give a rough estimate of the personal dose equivalent received by an individual assisting the procedure, when a direct dosimetry is not available.*

## 1. Introduction

Interventional radiology and cardiology are widespread used techniques for diagnosis and treatment of various heart, vascular and hepatobiliary pathologies, for tumor therapy (embolization procedures) and pain management (vertebroplasty). Being minimally invasive, they avoid the majority of the side-effects associated with surgical treatments but are known to increase the radiation exposure to patient and operators [1]. In recent years, many studies have explored the exposure of the operators performing interventional procedures. This was mostly done for the interventional cardiology, where usually the long duration of the procedure could determine high exposure for the medical personnel. In interventional radiology (PTC- Percutaneous transhepatic cholangiography, PTBD- Percutaneous transhepatic biliary drainage and/or stenting, PTA- Percutaneous Transluminal Angioplasty, TIPS-Transjugular Intrahepatic Portosystemic Shunt, DSA- Digital subtraction angiography etc...) exposures can be significant as well, in particular when shielding is not employed [2,3]. For this reason improving the compliance of operators towards radioprotection strategies is needed [4], and a special attention should be devoted to the unprotected parts of the body (e.g. eye lens and head).

The aim of this work is modeling the exposure conditions for the interventional radiologists for some selected procedures using Monte Carlo simulations, reproducing the response of individual dosimeters worn on the protective apron, in terms of personal dose equivalent, estimating the effective dose for the operator, and evaluating the dose received by the eye lens and the brain.

## 2. Material and methods

EURADOS Working Group 12 has already employed anthropomorphic models in interventional radiology dosimetric studies in past years [5,6,7]. In this work we employed the same geometry, the operator is standing up, near the patient (both having the dimensions of the *standard man*, 176 cm and 73 kg), but a third anthropomorphic phantom, representing the second radiologist, has been added at the right hand of the first operator. Indeed, for both operators, the description of operator's eyeballs was modified and a small volume at the eye lens position was inserted. The operator's brain (a simple ellipsoid) was subdivided into sections to better investigate the local exposure conditions of this organ. The simulated operators wore a 0.5 mm lead apron and a thyroid protection collar of the same thickness.

The first operator is placed on the right side of the patient near the patient's abdomen (next to the patient's liver), with the hands almost in the X-ray field (quite common situation in these procedures) and the second operator is about 70 cm to his right hand (figure 1). The simulations were distributed among the members of the group using different Monte Carlo codes and version: MCNP4B [8], MCNPX [9], MCNP6[10], PENELOPE [11] and different photon libraries [mcplib22, mcplib84, EPDL97].



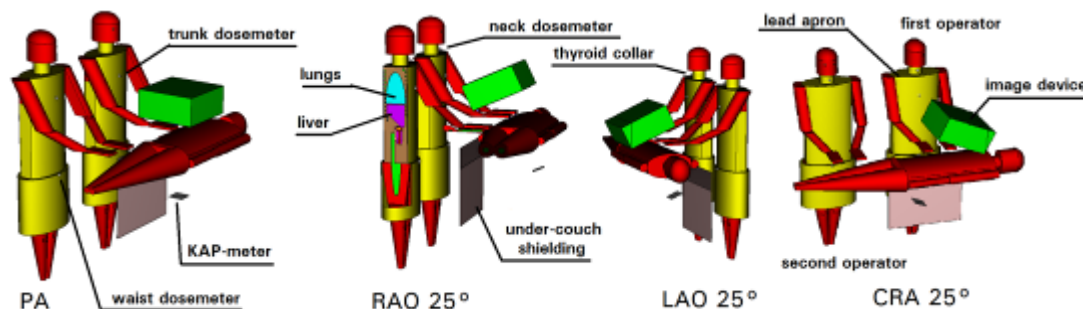


Figure 1. geometries of the simulated scenarios for the four considered projections.

### 2.1. Characteristic of the simulated scenario

**Projections** - Because the aim of the study was to reproduce interventional procedures such as PTC, PTBD or TIPS, a reduced number of X-ray beam projections was needed. In interventional radiology procedures Postero-Anterior projection (PA) is predominant, if not the only, projection in the majority of situations. However, in order to complete the analysis, three additional X-ray beam projections were added: Right-Anterior Oblique 25°, RAO 25°, Left-Anterior Oblique 25°, LAO 25°, and Cranio-Caudal 25°, CRA 25°.

**Shielding** - Only the under-couch shielding was considered in the reference scenario; some shielding, as simple layer of lead of the given thickness, has been simulated for the comparison with measurements.

**X-ray source** - The X-ray beam has been simulated as a point source emitting a cone of photon, of fixed aperture, on the patient. In order to reproduce the square field of modern digital equipment, an ideal filter was inserted between the source and the simulated KAP (Kerma AreaProduct)-meter. This filter kills all the photons outside its central square aperture (i.e.  $\text{imp:p} = 1$  in the center and  $\text{imp:p} = 0$  outside the aperture in MCNP syntax). X-ray beam spectra vary in terms of kV and additional Al and Cu filtration (see Table 1).

**KAP-Meter** - The KAP-meter was designed as a simple thin parallelepiped filled with air, positioned between the source and the patient, rotating together with the source and the image device (an image intensifier modeled as a second parallelepiped but shielded in order to absorb the leaking radiation, as it is in the reality). The simulated entrance KAP value was used to normalize all the calculated quantities for each beam-projection combination.

**C-arm distances** - The source to skin distance (SSD) was set to about 60 cm and the distance between the source and the image device (SID) was about 90 cm. These distances were kept constant for all irradiation conditions and are fairly representative of routine practice.

**AEC** - At the entrance of the image device, where the radiation exiting from the patient should be detected, a second thin air-filled layer (here named IDEK: image device entrance kerma) is used for the normalization among projections. This should mimic the presence of the Automatic Exposure Control (AEC). IDEK value was used to normalize the calculated quantities to the PA condition (chosen as the reference projection) when different projections have been compared.

**Dosimeters** - In order to simulate the measurement during medical procedure, spherical scoring volumes, filled by air, were simulated at various positions on the operator's



protective apron. Fluences were converted to  $H_p(10)$  employing  $H_p(10)/\phi$  conversion coefficients (ICRU 1996) (DE/DF card in MCNP syntax).

**Apron transmission factor** – In order to compute the radiation transmission factor of the simulated apron, an additional sphere was simulated inside the operator trunk at the same height of the sphere simulating the over apron dosimeter. The apron transmission factor was calculated as the ratio of the inner and outer spheres absorbed doses.

**Table 1. Simulated beam qualities. Beam N.1 is the reference case.**

Beam number	Beam kV	Al filtration (mm)	Cu filtration (mm)	Calculated mean energy (keV)
1	90	3	0.2	54.8
2	70	3	0	40.2
3	70	3	0.4	50.2
4	80	3	0.4	54.8
5	80	4	0	45.4
6	100	4	0.6	65.0
7	100	5	0	53.2
8	110	3	0.2	60.9
9	110	3	0.9	71.2
10	110	4	0	54.7

### 3. Simulation of $H_p(10)$

In Figure 2 the simulated values of  $H_p(10)$ /KAP conversion coefficients at the breast level, over the apron, are reported for the first (1<sup>st</sup> op) and second operator (2<sup>nd</sup> op) for the beam quality 1 of Table 1, without additional shielding (i.e. for the *reference case*). The conversion coefficients are of the order of  $10 \mu\text{Sv}/\text{Gy}\cdot\text{cm}^2$  and  $3 \mu\text{Sv}/\text{Gy}\cdot\text{cm}^2$  respectively for the first and the second operator. The only difference is given by the RAO  $25^\circ$  projection for the first operator. In this case, the image device acts as additional shielding for the radiologist (see figure 1) reducing the scattering field reaching the trunk.

In order to mimic the results obtained with a dosimeter put under the apron, the  $H_p(10)$ /KAP conversion coefficients were multiplied by the calculated apron transmission factor (Figure 3). The resulting attenuation of the dose equivalent of about two orders of magnitude is in agreement with the results calculated by Saldarriaga et al. [2018]. Considering the energy dependence, the  $H_p(10)$ /KAP conversion coefficients increase with the X-ray beam energy (Figure 4). Here only the PA data are reported. The influence of the energy spectrum on the results can be perceived considering the beams having the same mean energy (beams 1,4 and 10 of Table 1).

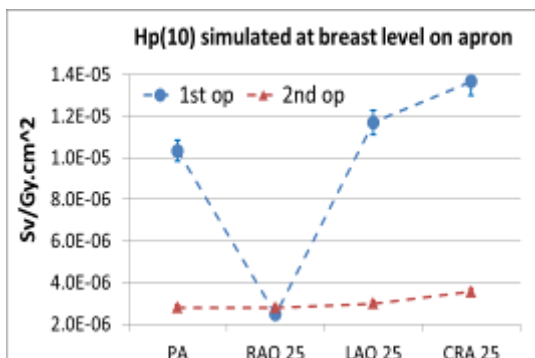


Figure 2. Over apron Hp(10) simulated for the four projections (normalized by KAP values in figures).

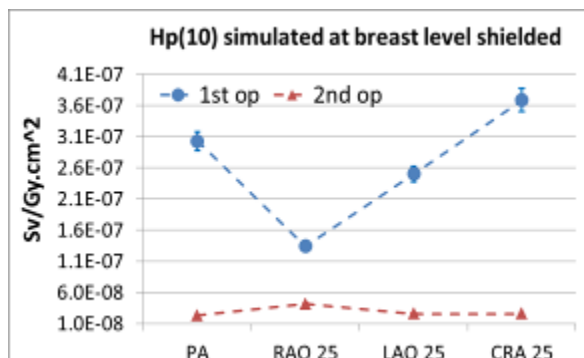


Figure 3. Apron shielded Hp(10) simulated for the four projections.

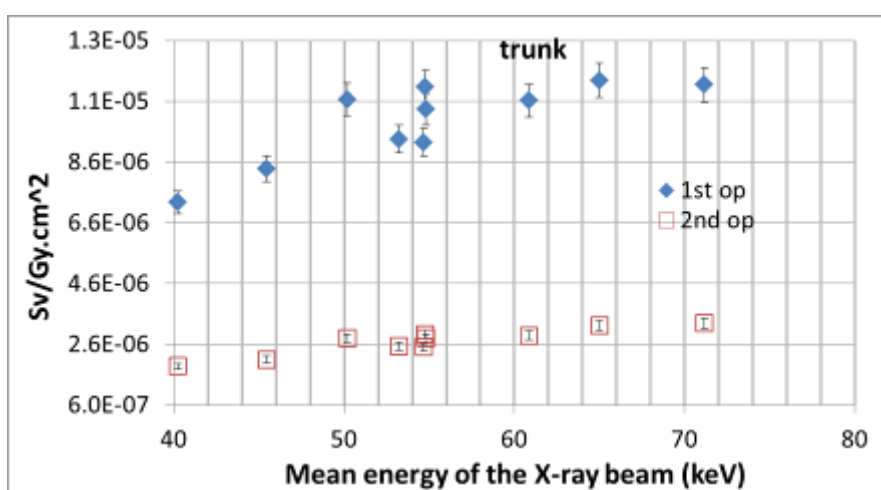


Figure 4. Hp(10) simulated at the breast level for the PA projection for the beam qualities of table 1.

In the same Figure 4 it is possible to see how the  $H_p(10)/KAP$  conversion coefficients differ between the two operators. This effect is caused by the variation of the photon fluence at different operator heights at different distances. As a matter of fact, the ratio between the photon fluence calculated for the second operator and the photon fluence for the first operator is 0.25, if one considers the dosimeter put at the breast level, and 0.87, for the dosimeter put at the neck level (for *reference case*).

#### 4. Discussion

Since the aim of this work was modeling the exposure condition of the interventional radiologists, one of the main points was establishing the accuracy of the values that can be calculated through Monte Carlo simulated scenarios.

If one considers the variability of these procedures and the variability of the doses, the evaluated data are coherent with what can be found in literature. The conversion coefficients for the first operator for the beam quality 1 is of the order of  $10 \mu\text{Sv}/\text{Gy}\cdot\text{cm}^2$  in absence of shielding, decreasing to  $0.8 \mu\text{Sv}/\text{Gy}\cdot\text{cm}^2$  and  $0.1 \mu\text{Sv}/\text{Gy}\cdot\text{cm}^2$  in case of 0.5 mm and 1 mm lead shielding respectively. The unshielded value is consistent with

the  $8.3 \mu\text{Sv}/\text{Gy}\cdot\text{cm}^2$  found by Leyton et al. employing PMMA plates and plastic phantoms [Leyton 2016]. The decreasing of a factor of 3 or 4 in the exposure, passing from the first to the second operator, is coherent with similar evaluations (Tsalafoutas 2008). About (male) *effective dose*, the E/KAP for the first operator varies from 0.03 to  $0.4 \mu\text{Sv}/\text{Gy}\cdot\text{cm}^2$  with the increase in the energy of the beam from. These estimates are coherent with the values of  $0.06 - 0.2 \mu\text{Sv}/\text{Gy}\cdot\text{cm}^2$  reported by Kim et al. [2012] for biliary procedures and TIPS. Indeed, it is possible to compare the results calculated by Santos et al [2018], that employed anthropomorphic voxel models, with the data for the second operator (the presence of the shielding excludes a direct comparison with the first operator).

## 5. Conclusions

In the present work a model for the simulation of the  $H_p(10)$  of the personnel working in interventional radiology is presented and validated. Within the limits of the rigidity of the simulated geometries, with respect the larger variability of the real condition, the comparison with hospital measurement showed a good agreement. The present model can be used to determine the effect of shielding, in the dosimetric characterization of a radiology room and to test algorithms for the double dosimetry for *effective dose* calculation in interventional procedures. When, for some reasons, direct dosimetry is not available,  $H_p(10)/\text{KAP}$  conversion coefficients can give a rough estimate of the *personal dose equivalent* received by an individual. That can be useful, for example, in case of personnel not normally exposed to the radiation, assisting the patient during the practice. Extensive simulations to investigate the doses to the operators lens of the eyes and to the operators' brain are planned for the future.

## 6. Acknowledgement

This work was supported by the European Radiation Dosimetry Group (EURADOS, WG12).

## 7. References

- [1] P. Covens, D. Berus, N. Buls, P. Clerinx, F. Vanhavere. Personal dose monitoring in hospitals: global assessment, critical applications and future needs. *Radiat. Prot. Dosim.* 124, 2007, 250–259.
- [2] J. Domienik, M. Brodecki, E. Carinou, L. Donadille, J. Jankowski, C. Koukorava, S. Krim, D. Nikodemova, N. Ruiz-Lopez, M. Sans-Merce', L. Struelens, F. Vanhavere. Extremity and eye lens doses in interventional radiology and cardiology procedures: first results of the ORAMED project. *Radiat. Prot. Dosimetry.* 144, 2011, 442–447.
- [3] P. Ferrari, G. Venturi, G. Gualdrini, P.L. Rossi, M. Mariselli, R. Zannoli. Evaluation of the dose to the patient and medical staff in interventional cardiology employing computational models. *Radiat. Prot. Dosim.* 141, 2010, 82-85.
- [4] A.M. Sailer, L. Vergoossen, L. Paulis, W.H. van Zwam, M. Das, J.E. Wildberger, C.R.L.P.N. Jeukens. Personalized Feedback on Staff Dose in Fluoroscopy-Guided

Interventions: A New Era in Radiation Dose Monitoring *Cardiovasc. Intervent. Radiol.* 40, 2017, 1756–1762.

- [5] E. Carinou, P. Ferrari, C. Koukorava, S. Krim, L. Struelens. Monte Carlo calculations on extremity and eye lens dosimetry for medical staff at interventional radiology procedures. *Radiat. Prot. Dosim.* 144(1-4), 2011, 492-496.
- [6] P. Ferrari, F. Becker, E. Carinou, V. Chumak, J. Farah, Z. Jovanovic, D. Krstic, A. Morgun, S. Principi, P. Teles. Monte Carlo study of the scattered radiation field near the eyes of the operator in interventional procedures *J. Radiol. Prot.* 36. 2016, 902–921.
- [7] C. Koukorava, E. Carinou, P. Ferrari, S. Krim, L. Struelens. Study of the parameters affecting operator doses in interventional radiology using Monte Carlo simulations. *Radiat.Meas.* 46(11), 2011, 1216-1222.
- [8] J.F. Briesmeister (Editor) 1997, MCNPTM - A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4B, LA-12625-M.
- [9] D.B. Pelowitz (editor) 2005 MCNPX User's manual. LA-CP-05-0369, Los Alamos Laboratoty, USA.
- [10] D.B. Pelowitz (editor) 2013 MCNP6 USER'S MANUAL Version 1.0 (LANL Los Alamos LA-CP-13-00634).
- [11] PENELOPE-2014 - A Code System for Monte Carlo Simulation of Electron and Photon Transport - Workshop Barcelona, Spain 29 June-3 July 2015 (NEA/NSC/DOC(2015)).

**ИЗВЈЕШТАЈ АКТИВНОСТИ ЕУРАДОС ГРУПЕ WG12 У  
ПОСТУПКУ ИНТЕРВЕНТНЕ РАДИОЛОГИЈЕ**

**Ferrari PAOLO<sup>1</sup>, Becker FRANK<sup>2</sup>, Jovanovic ZORAN<sup>3</sup>,  
Khan SHAHED<sup>4</sup>, Bakhanova ELENA<sup>5, 6</sup>, Principi SARA<sup>6</sup>,  
Krstic DRAGANA<sup>3</sup>, Pierotti LUISA<sup>7</sup>,  
Mariotti FRANCESCA<sup>1</sup>, Faj DARIO<sup>8</sup>, Turk TAJANA<sup>8,9</sup>,  
Nikezic DRAGOSLAV<sup>3</sup> i Bertolini, MARCO<sup>10</sup>**

- 1) *ENEA, Institut za radiološku zaštitu, Bolonja, Italija, [paolo.ferrari@enea.it](mailto:paolo.ferrari@enea.it)*
- 2) *KIT, Egenštajn-Leopoldhafen, Nemačka, [frank.becker@kit.edu](mailto:frank.becker@kit.edu)*
- 3) *Prirodnom matematički fakultet, Univerzitet u Kragujevcu, Kragujevac, Srbija, [z.jovanovic@kg.ac.rs](mailto:z.jovanovic@kg.ac.rs), [nikezic@kg.ac.rs](mailto:nikezic@kg.ac.rs), [dragana@kg.ac.rs](mailto:dragana@kg.ac.rs)*
- 4) *Departman za fiziku, Univerzitet Surrey, Guildford, Velika Britanija, [s.khan.rcs@gmail.com](mailto:s.khan.rcs@gmail.com)*
- 5) *Nacionalni istraživački centar za Radijacionu Medicinu, Kijev, Ukrajina, [elena.bakhanova@gmail.com](mailto:elena.bakhanova@gmail.com)*
- 6) *Univerzitet Politehnike Katalonija, Barselona, Španija, [sara.principi@upc.edu](mailto:sara.principi@upc.edu)*
- 7) *AOSP S.Orsola-Malpighi Bolnica, Bolonja, Italija, [luisa.pierotti@aosp.bo.it](mailto:luisa.pierotti@aosp.bo.it)*
- 8) *Medicinski fakultet Osijek, Univerzitet u Osijeku, Osijek, Hrvatska, [dario.faj@fdmz.hr](mailto:dario.faj@fdmz.hr)*
- 9) *Univerzitetska Bolnica Osijek, Osijek, Hrvatska, [turk.tajana@gmail.com](mailto:turk.tajana@gmail.com)*
- 10) *AUSL Reggio Emilia Bolnica, Reggio Emilia, Italy, [Marco.Bertolini@ausl.re.it](mailto:Marco.Bertolini@ausl.re.it)*

**САДРЖАЈ**

Интервентна радиологија и кардиологија су широко распрострањене технике дијагностике и лечења неколико патологија, јер избегавају већину нуспојава повезаних са хируршким третманима, али се зна да повећавају изложеност пацијената и оператора јонизујућем зрачењу. Последњих година, многе студије су третирале изложеност оператора који обављају поступке из радиологије и кардиологије. У овом раду, симулирана је изложеност медицинског особља у интервентној радиологији помоћу антропоморфних фантома применом Монте Карло симулација. Однос величине  $H_p(10)$  и КАП (Kerma Area Product) процењује се симулацијом личног дозиметра изнад заштите и нормализује на симулирану вредност КАП-а. За истог оператора се рачуна и ефективна доза. Те вредности могу се користити за испитивање алгоритма двоструке дозиметријске ефективне дозе, за дозиметријску карактеристику интервентне просторије или за грубу процену личног дозног еквивалента коју је примио појединац, а који помаже при процедури када директна дозиметрија није доступна.

## REZULTATI MEĐULABORATORIJSKOG POREĐENJA LIČNOG EKVIVALENTA DOZE $H_p(10)$

**Benard Berišaj, Aleksandra Milatović i Nikola Svrkota**

*Centar za ekotoksikološka ispitivanja, Podgorica, Crna Gora, [beniber@t-com.me](mailto:beniber@t-com.me),  
[aleksandra.milatovic@ceti.co.me](mailto:aleksandra.milatovic@ceti.co.me), [nikola.svrkota@ceti.co.me](mailto:nikola.svrkota@ceti.co.me)*

### SADRŽAJ

*U radu su prikazani rezultati međulaboratorijskog poređenja za vrijednosti  $H_p(10)$ , organizovanog od strane EURADOS-a. Tokom 2018. godine Centar za ekotoksikološka ispitivanja doo Podgorica (CETI) učestvovao je u međulaboratorijskom ispitivanju dozimetara za cijelo tijelo, koji su ozračeni u poljima N-60, W-110 i N-150 za X, te S-Cs i S-Co za gama, kao i u miksovanom polju X i gama zračenja (N-150 i Cs-137). Mjerenja su obavljena pomoću dozimetrijskog sistema Harshaw 4500 TLD manual reader. Ukupno je poslato je 34 dozimetra za cijelo tijelo od kojih je 22 ozračeno. Opseg doza bio je od 0,80 mSv, za kvalitet zračenja S-Cs, do 300 mSv, za kvalitet S-Co.*

### 1. Uvod

Centar za ekotoksikološka ispitivanja doo Podgorica učestvuje redovno u međulaboratorijskim poređenjima ličnog ekvivalenta doze  $H_p(10)$  od 2010. godine kada je Društvo za zaštitu od zračenja Srbije i Crne Gore pokrenulo inicijativu za organizaciju međulaboratorijske interkomparacije iz oblasti individualnog monitoringa [1].

EURADOS je 2018. godine organizovao međulaboratorijsko poređenje, koje je okupilo 101 instituciju (121 dozimetrijska sistema) iz 40 zemalja. Korišćeno je 4114 dozimetara, a cijeli proces trajao je godinu dana, od februara 2018. do februara 2019. godine. Od 121 dozimetrijska sistema njih 82 (68 %) su bili Termoluminiscentni (TL), 18 (15%) Optički stimulirani luminiscentni (OSL), 9 (7%) film dozimetrijskih sistema i 12 (10%) ostalih [2]. Međulaboratorijski test se odnosio na dvije mjerne veličine  $H_p(10)$  i  $H_p(0.07)$ , ali se Jedinica za dozimetrijska mjerenja u Centru za ekotoksikološka ispitivanja (CETI) prijavila samo za mjerenje  $H_p(10)$ .

Mjernu opremu koja se koristi za očitavanje dozimetara u CETI čini TLD Harshaw čitač (model 4500) vezan za PC. Program the Windows Radiation Evolution and Mangement System (WinREMS) kontroliše sve radne operacije TLD čitača, što podrazumijeva čuvanje svih radnih parametara, kao i prikazivanje krivih isijanja nakon očitavanja dozimetara. Sam čitač sastoji se od dvije fotomultiplikacione cijevi sa kliznim kućištem, sa dvije planšete i sistemom za grijanje pomoću gasa ( $N_2$  ili vazduh) [3]. Lični ekvivalent doze se dobija preko formule:

$$H_p(d) = \frac{Q \cdot ECC}{RCF} \quad (1)$$

gdje su  $H_p(d)$  lični ekvivalent doze,  $Q$ -naelektrisanje na izlazu fotomultiplikatora, ECC-koeficijent kalibracije svakog pojedinačnog dozimetara, RCF – koeficijent kalibracije čitača. Za određivanje RCF koeficijenata, kalibracioni dozimetri se ozračuju kalibracionim izvorima u Metrološkoj sekundarnoj standardnoj dozimetrijskoj laboratoriji (SSDL).

## 2. Rezultati i diskusija

Od ukupno 34 poslata dozimetra 22 je bilo ozračeno. Ozračivanje je vršeno u poljima N-60, W-110 i N-150 za X, te S-Cs i S-Co za gama, kao i u miksovanom polju X i gama zračenja (N-150 i Cs-137). U polju kvaliteta N-60 ozračivanje je vršeno pod uglovima  $0^\circ$  i  $60^\circ$ , za kvalitet N-150 pod uglom od  $60^\circ$ , dok su u ostalim poljima ozračivanja vršena pod uglom od  $0^\circ$ . Dozimetri, njih 12, koji nisu ozračeni služili su kao fonski. Vrijednosti  $H_p(10)$  fonskih dozimetara prikazane su u tabeli 1.

**Tabela 1. Izmjerena vrijednost  $H_p(10)$  za fonske dozimetre.**

Redni broj dozimetra	Identifikacioni broj dozimetra	Izmjerena vrijednost $H_p(10)$ (mSv)
1	4452	0,47
7	4178	0,48
10	1678	0,44
12	3643	0,54
13	1475	0,44
15	1265	0,47
21	2792	0,45
23	1307	0,45
27	3529	0,56
28	4149	0,50
30	1488	0,50
33	2217	0,47
	<b>Xsr</b>	<b>0,48</b>
	<b>SD</b>	<b>0,04</b>
	<b>Rsd (%)</b>	<b>8,33</b>

U tabeli 2 prikazani su rezultati mjerenja  $H_p(10)$  ozračenih dozimetara, referentna vrijednost i odnos referentne vrijednosti i prijavljenih rezultata. Iz tabele 2 se vidi da je slaganje sa referentnom vrijednošću za kvalitet N-150 pri uglu ozračivanja  $60^\circ$  veoma dobro, kao i za polje W-110 i ugao  $0^\circ$ . Takođe, mjerenja koja se odnose na kvalitet N-60 i ugao  $0^\circ$  imaju veoma dobro slaganje sa referentnom vrijednošću, dok se za isti kvalitet ozračivanja pod uglom od  $60^\circ$  odnos između referentne i izmjerene vrijednosti kreće do 1,38. Pored toga, odnos dozimetara kojima se vršilo mjerenje iznosi 1,24 i predstavlja drugo najveće neslaganje među dozimetrima, nakon dozimetara kojima se mjerio  $H_p(10)$  u polju kobalta-60 (odnos među njima je 1,26). Odnos izmjerenih vrijednosti između ostalih dozimetara kreće se od 1,02 (N-60 za  $0^\circ$ ) do 1,18 (S-Cs za  $0^\circ$ ).



Tabela 2. Izmjerena vrijednost Hp(10) i referentna vrijednost.

Identifikacioni broj dozimetra	Kvalitet snopa	Izmjerena vrijednost Hp(10) (mSv)	Referentna vrijednost Hp(10) (mSv)	Odnos izmjerene i referentne vrijednosti R
1411	N-60 za 0°	1,74	1,73	1,00
1360	N-60 za 0°	1,78	1,73	1,03
1419	N-60 za 60°	2,39	1,73	1,38
631	N-60 za 60°	1,93	1,73	1,11
1629	W-110 za 0°	4,41	5,00	0,88
3735	W-110 za 0°	4,61	5,00	0,92
1325	N-150 za 60°	1,47	1,51	0,98
1633	N-150 za 60°	1,54	1,51	1,02
1440	S-Cs za 0°	0,53	0,80	0,66
1927	S-Cs za 0°	0,54	0,80	0,68
743	S-Cs za 0°	3,27	5,20	0,63
1551	S-Cs za 0°	3,64	5,20	0,70
3138	S-Cs za 0°	3,86	5,20	0,74
1400	S-Cs za 0°	3,87	5,20	0,74
1105	S-Co za 0°	2,64	4,70	0,56
4106	S-Co za 0°	3,32	4,70	0,71
2388	S-Co za 0°	34,08	50,00	0,68
1169	S-Co za 0°	31,52	50,00	0,63
3253	S-Co za 0°	215,00	300,00	0,72
1561	S-Co za 0°	219,00	300,00	0,73
1754	N-150/Cs-137	3,21	5,50	0,58
1484	N-150/Cs-137	3,69	5,50	0,67

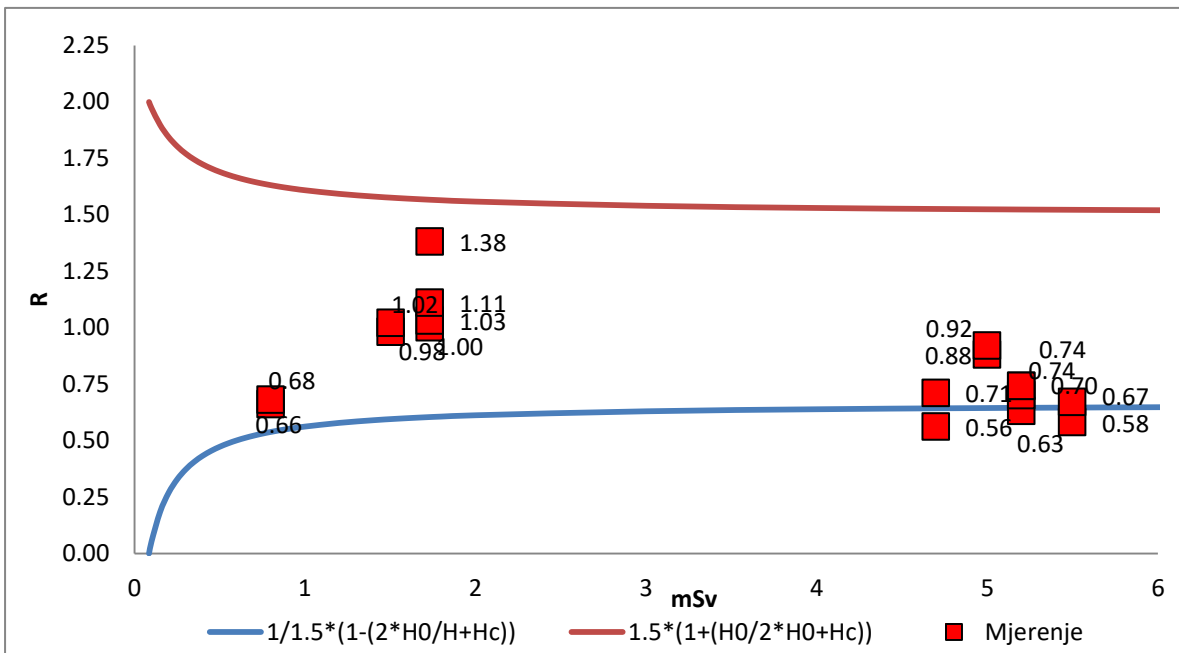
Rezultati za 4 mjerenja u poljima S-Cs za 0°, S-Co za 0° i N-150/Cs-137 su van opsega (outlier). Kao što je poznato uslovi koje je potrebno ispuniti dati su izrazima [4]:

$$R_{UL} = \frac{1}{1.5} \times \left(1 - \frac{2 \times H_0}{H_0 + H_C}\right), \quad (2)$$

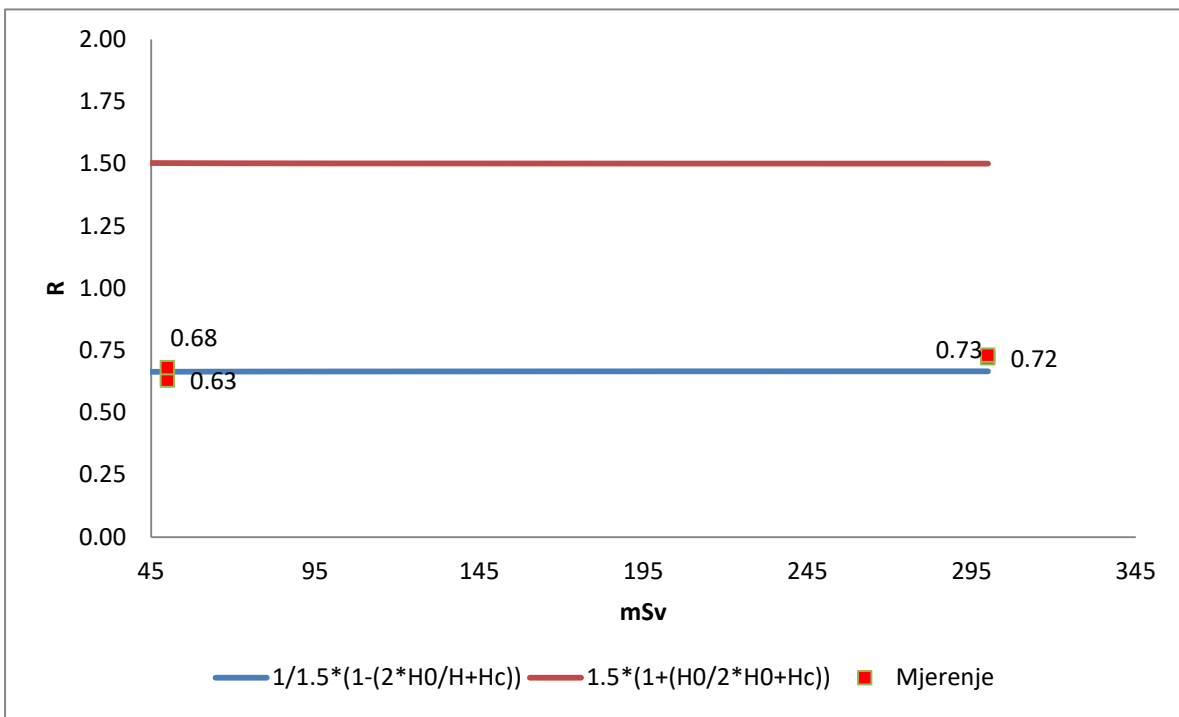
$$R_{LL} = \begin{cases} 0 & H_C < H_0 \\ 1.5 \times \left(1 + \frac{H_0}{2 \times H_0 + H_C}\right) & H_C \geq H_0 \end{cases} \quad (3)$$

gdje je  $H_0 = 0,085$  mSv.

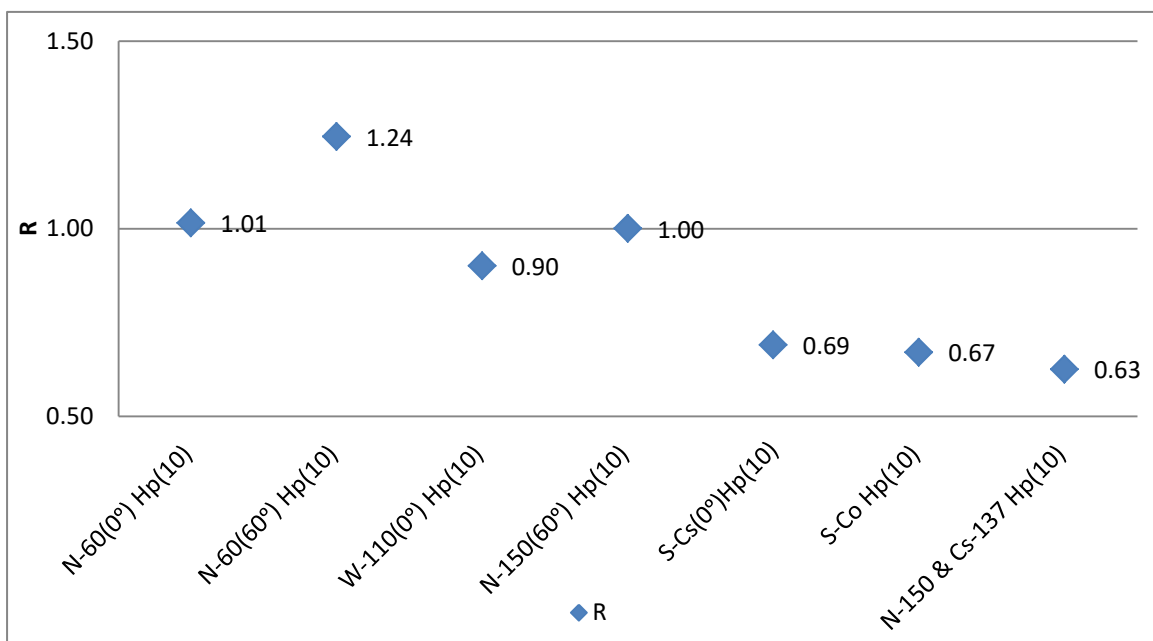
Na slikama 1, 2 i 3 prikazani su rezultati na opsegu doza od 0,80 mSv do 6 mSv, od 50 mSv do 300 mSv i odnos referentne vrijednosti i srednje izmjerene vrijednosti za pojedine kvalitete.



Slika 1. Prikaz rezultata – prvi dio do 6 mSv.



Slika 2. Prikaz rezultata – drugi dio, od 50 mSv do 300 mSv.



**Slika 3. Odnos referentne vrijednosti i srednje izmjerene vrijednosti za pojedine kvalitete.**

Veoma dobri rezultati dobijeni su za polja ozračivanja N-60/0°, W-110/0°, N-150/60°, kao i za N-60/60°. Lošiji rezultati, koji podcjenjuju referentnu vrijednost se javljaju prilikom mjerenja u polju  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$  i miks-polju N-150 +  $^{137}\text{Cs}$ . Jasno se vidi da je kalibracioni koeficijent čitača (RCF) uzrok zbog koga su dobijeni manji rezultati od očekivanih.

### 3. Zaključak

Od 22 dozimetra njih 4 nisu zadovoljili kriterijum (outlier), što predstavlja 18%. Maksimalno relativno precjenjivanje referentne vrijednosti iznosi 1,38, a podcjenjivanje 0,56. Srednja vrijednost odnosa referentne vrijednosti i izmjerene vrijednosti R iznosi 0,81 i pokazuje da su prijavljeni rezultati generalno niži u odnosu na referentnu vrijednost za 20%.

Kalibracioni faktor čitača RCF za polja cezijuma 137, kobalta 60, kao i miksovanog polja cezijuma i N-150 je niži za oko 30%. Neophodno je izvršiti novu kalibraciju sistema. Veoma dobri rezultati su dobijeni za kvalitete polja X zračenja N-60, N-150 i W-110, gdje se R pojedinačnih rezultata kreće od 0,88 (za W-110 za 0°) do 1,11 (N-60 za 60°).

### 4. Literatura

- [1] O. Ciraj-Bjelac, M. Antić, J. Kaljević, O. Marnković, N. Svrkota, D. Vučić, M. Vukčević, M. Kovačević. Interkomparacija merenja personalnog doznog ekvivalenta Hp(10) u poljima fotonskog zračenja u Srbiji i Crnoj Gori. *Zbornik radova XXVI Simpozijum DZZ SCG*, 12-14. oktobar 2011, Tara, 2011, 194 – 199.
- [2] EURADOS, European Radiation Dosimetry Group. A. Boziari, L. Blois, H. Stadtmann, M. Figel. *Presentations*. <http://www.eurados.org/en/Actions/presentations/IC2018>.

- [3] *Model 4500 Manual TLD Reader with WinREMS<sup>TM</sup> Operator's Manual*, Publication No 4500-W-O0602-004, Saint Gobain Crystals&Detectors, Radiation Measurement Products, USA.
- [4] International Atomic Energy Agency. Occupational Radiation Protection, IAEA Safety Standards Series No. GSG-7, IAEA, Vienna, 2018.

## RESULTS OF THE INTERLABORATORY COMPARISON OF PERSONAL EQUIVALENT DOSE $H_p(10)$

**Benard Berishaj, Aleksandra Milatovic and Nikola Svrkota**

*Center for Ecotoxicological Research, Podgorica, Montenegro*

*[beniber@t-com.me](mailto:beniber@t-com.me), [aleksandra.milatovic@ceti.co.me](mailto:aleksandra.milatovic@ceti.co.me), [nikola.svrkota@ceti.co.me](mailto:nikola.svrkota@ceti.co.me)*

### ABSTRACT

The paper presents the results of the interlaboratory comparison for  $H_p$  values (10), organized by EURADOS. During the year 2018, the Center for Ecotoxicological Research Podgorica (CETI) participated in interlaboratory comparison of whole body dosimeters irradiated in fields N-60, W-110 and N-150 for X, and S-Cs and S-Co for gamma, as well as in the mixed X and gamma radiation fields (N-150 and Cs-137). The measurements were performed using a Harshaw 4500 TLD manual reader. A total of 34 whole body dosimeters were sent, of which 22 were irradiated. The dose range was from 0.80 mSv, for S-Cs radiation quality, up to 300 mSv, for S-Co quality.

## EURAMET DOSETRACE PROJECT AND SUPPLEMENTARY COMPARISON

Miloš ŽIVANOVIĆ<sup>1</sup>, Oliver HUPE<sup>2</sup>, Amra ŠABETA<sup>3</sup>,  
Nikola KRŽANOVIĆ<sup>1</sup> and Vedrana MAKARIĆ<sup>3</sup>

- 1) Vinca Institute of Nuclear Sciences (VINS), University of Belgrade, Belgrade, Serbia, [milosz@vinca.rs](mailto:milosz@vinca.rs), [krzanovic@vinca.rs](mailto:krzanovic@vinca.rs)
- 2) Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Braunschweig, Germany, [oliver.hupe@ptb.de](mailto:oliver.hupe@ptb.de)
- 3) Institute of Metrology of Bosnia and Herzegovina (IMBiH), Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, [amra.sabeta@met.gov.ba](mailto:amra.sabeta@met.gov.ba), [vedrana.makaric@met.gov.ba](mailto:vedrana.makaric@met.gov.ba)

### ABSTRACT

*Accurate and traceable measurements of operational quantities are required for adequate radiation protection. National Measurement Institutes (NMI) and Designated Institutes (DI) are responsible for disseminating the SI unit sievert and for calibrating user equipment. However, in many emerging European countries, calibration and measurement capabilities for operational quantities are limited or nonexistent. The main objective of DOSEtrace project is to improve these capabilities and for the participants to achieve the expanded measurement uncertainty of less than 5% ( $k = 2$ ). Within the project, a Supplementary comparison of calibration factors in terms of ambient dose equivalent will be conducted. This comparison will help to validate the capabilities that the partners developed during and before the project and will help emerging institutes gain international recognition. The comparison will cover both radionuclide and x-ray radiation qualities according to ISO 4037-1.*

### 1. Introduction

Appropriate calibration and use of dosimeters is of key importance for radiation protection. Radiation protection dosimeters are calibrated in terms of operational quantities – personal, ambient and directional dose equivalent [1]. The calibrations are performed in dosimetry laboratories, which need to provide traceability to primary standards of Primary Standards Dosimetry Laboratories (PSDL) and therefore to the SI system of units. International measurement system is established in order to provide traceability from end user measurements through Secondary Standards Dosimetry Laboratories (SSDL) to PSDLs. This system is supported by International Committee of Weights and Measures (CIPM) Mutual Recognition Arrangement (MRA), Regional Metrology Organizations (RMO), but also by the SSDL network organized by International Atomic Energy Agency (IAEA) and World Health Organization (WHO). National Metrology Institutes (NMI) and Designated Institutes (DI) are signatories of CIPM MRA, are members of RMOs and are responsible for disseminating SI units within respective countries. Most of the European countries are members of EURAMET RMO [2, 3, 4].

In Europe, there is a significant number of Primary Standards Dosimetry Laboratories, as well as the International Bureau of Weights and Measures (BIPM) laboratory and the IAEA Dosimetry Laboratory. Most of the countries have at least one SSDL [4, 5]. However, capacity for calibrations in terms of operational quantities is not well established in many smaller NMIs and DIs. This is also reflected in BIPM database, where only 14 NMIs and DIs from EURAMET have published Calibration and Measurement Capabilities (CMC) for any of the operational quantities [4]. Furthermore, only three supplementary comparisons for operational quantities have been conducted so far by EURAMET, and none by the other RMOs [6, 7, 8].

17RPT01 DOSEtrace – Research capabilities for radiation protection dosimeters, is a metrological project aiming to improve the capabilities for calibrations in terms of operational quantities within European countries. This is a project from 2017 research potential EMPIR call. The project started in 2018 and involves 12 NMIs and DIs, as well as one university. The project is planned to last 36 months [9].

## 2. DOSEtrace project

Main goal of DOSEtrace project is improving calibration and measurement capabilities for operational quantities within European countries. First step towards achieving this goal was surveying the current status and training needs of project participants and other European NMIs, DIs and other relevant institutions. The results of the survey are being used to organize several training courses in order to facilitate dissemination of knowledge, to improve technical competence and to help emerging institutes to establish or improve capabilities. Several events took part in the first half of the project, including “Metrology and Calibration in Radiation Protection” course in Instituto Superior Tecnico (IST), Lisbon and Hands on Training in Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Braunschweig [9].

The goal for the newly developed and improved capabilities is to keep the combined uncertainty below 5% ( $k = 2$ ). The new capabilities are validated by organizing an intercomparison, which started in February 2019. Even though only one operational radiation protection quantity was chosen for the comparison, it can be used to validate all operational quantities, because the same equipment is used, the same radiation qualities, the same procedure to determine the corresponding conversion coefficients and the same general calibration procedure. Finally, successful development and validation of the new capabilities will be followed by submission of CMCs to the Key Comparison Data Base (KCDB) of BIPM. All partners will be required to develop long term strategies, to maintain and improve capabilities [9].

Meeting the main goal of the project will help ionizing radiation metrology community within European countries but will also improve the confidence in measurements by technical services and other end users and reduce the overall measurement uncertainty in the whole measurement chain. This will benefit the whole community, from occupationally exposed workers to general public.

The project will also help European countries to implement the requirements set by EU Council Directive 2013/59/EURATOM, which is laying down basic safety standards for protection against the dangers arising from exposure to ionizing radiation [10].

Another project goal is to develop and test a secondary standard for eye lens dosimetry, because currently there are none available. This would enable conducting comparisons

in terms of  $H_p(3)$ , and also calibration of eye lens dosimeters by direct comparison with secondary standard.

### 3. DOSEtrace supplementary comparison

Having in mind the lack of supplementary comparisons for operational quantities in Europe and the whole world, it was decided during the planning phase of DOSEtrace project that it was necessary to organize such comparison. The goal of the comparison was to validate the capabilities of the project partners that are developed or improved during the project, but also to train partners to organize comparisons on international level. The quantity for the comparison was chosen having in mind several criteria:

- need for the calibrations in respective countries
- existing and planned capabilities of project partners
- availability of the suitable transfer instrument (i.e. secondary standard for operational quantity)
- existing supplementary comparisons

According to the mentioned criteria, it was decided to choose ambient dose equivalent,  $H^*(10)$ . Only one comparison of this type was previously conducted, and it covered two radiation qualities – N-60 and S-Cs [6]. The last one at different dose rates to cover the challenges of the calibration of large radiation protection devices.

DOSEtrace supplementary comparison started in February 2019 and is planned to finish by the end of 2020. During this time, 13 laboratories will take part in the comparison. Comparison is organized by following EURAMET guide [11].

A Seibersdorf HS01 chamber was selected as the transfer chamber. The chamber is of spherical shape and has a nominal volume of 1 litre [12]. It is shown in Figure 1. Participants will use their own electrometers with the transfer chamber. Stability of the transfer chamber will be checked by performing periodic calibrations in all 5 radiation qualities.



**Figure 1. HS01 S/N 112, Secondary standard chamber for  $H^*(10)$   
(Photo credit Bildstelle PTB).**

In total, 5  $\gamma$ -ray and X-ray radiation qualities, 3 mandatory and 2 additional ones, were selected for the purposes of the comparison:

- N-40 (mandatory)
- N-100 (mandatory)



- N-200 (additional)
- S-Cs (mandatory)
- S-Co (additional)

All radiation qualities are defined in ISO 4037-1 standard [13].

The partners will report their results in the provided templates, including measurement uncertainty budgets. Template for measurement uncertainty is provided in table 1. Measurement uncertainty will be expressed according to relevant international guides and standards [14].

**Table 1. Model uncertainty budget.**

Reference $H^*10$ measurements				
Source of uncertainty	Type A uncertainty $u_{i,A}$	Type B uncertainty $u_{i,B}$	$u_{i,A}^2 + u_{i,B}^2$	Comment
Calibration coefficient of the national/reference standard				
Collected charge/ionization current				
Air density correction				
Source to chamber distance				
Conversion coefficient				
Other sources of uncertainty				
<b>Combined uncertainty, <math>H^*(10)</math></b>				
Transfer chamber measurements				
Source of uncertainty	$u_{i,A}$	$u_{i,B}$	$u_{i,A}^2 + u_{i,B}^2$	Comment
Collected charge/ionization current ( $Q/I$ )				
Air density correction				
Source to chamber distance				
Other sources of uncertainty				
<b>Combined uncertainty, <math>Q/I</math></b>				
<b>Combined uncertainty, <math>N_H</math></b>	$u = \sqrt{\sum_i (u_{i,A}^2 + u_{i,B}^2)} =$			

### 4. Conclusion

Research within DOSEtrace project will focus on improving calibration and measurement capabilities of European NMIs and DIs, specifically for operational quantities used in radiation protection. Main goals are development and validation of the capabilities, submitting CMCs to KCDB and developing individual strategies. An  $H_p(3)$  secondary standard will also be built within the project.

### 5. Acknowledgement

The research presented in this paper was realized within 17RPT01 DOSEtrace project. This project has received funding from the EMPIR programme co-financed by the Participating States and from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme.

### 6. References

- [1] Quantities and Units in Radiation Protection Dosimetry, ICRU Report 51, ICRU, 1993.
- [2] Mutual recognition of national measurement standards and of calibration and measurement certificates issued by national metrology institutes, CIPM, Paris, 1999 (partially revised in 2003).
- [3] [SSDL network charter, 2<sup>nd</sup> edition, IAEA, Vienna, 2018.
- [4] The BIPM key comparison database, <https://kcdb.bipm.org/>, accessed on 2.5.2019.
- [5] The IAEA/WHO Network of Secondary Standards Dosimetry Laboratories, <https://ssdl.iaea.org/>, accessed on 2.5.2019.
- [6] O. Hupe, N.A.C. Díaz. EURAMET supplementary comparison of ambient dose equivalent  $H^*(10)$  in  $^{137}\text{Cs}$  and ISO Narrow Beam Series N-60 x-ray beams at low dose rates. *Metrologia* 55, Technical Supplement, 2018, 1-132.
- [7] U. Ankerhold, W. Tiefenböck, J. Witzani, P. Ambrosi. EUROMET.RI(I)-S1: personal dose equivalent comparison between the BEV and the PTB. *Metrologia* 39, Technical Supplement, 2002, 1-13.
- [8] U. Ankerhold, O. Hupe. EURAMET supplementary comparison of the personal dose equivalent quantity for photon radiation: EURAMET.RI(I)-S5. *Metrologia* 49, Technical Supplement, 2012, 1-169.
- [9] DOSEtrace - Research capabilities for radiation protection dosimeters, [https://www.euramet.org/research-innovation/search-research-projects/details/?eurametCtcp\\_project\\_show%5Bproject%5D=1554](https://www.euramet.org/research-innovation/search-research-projects/details/?eurametCtcp_project_show%5Bproject%5D=1554) and <http://dosetrace-empir.eu>, accessed on 12.5.2019.
- [10] Council Directive 2013/59/Euratom, laying down basic safety standards for protection against the dangers arising from exposure to ionising radiation. European Council, *Official Journal of European Union* L31, 2014, 1-73.
- [11] EURAMET Guide No. 4, EURAMET Guide on Comparisons, Version 1.0 (05/2016), EURAMET, Braunschweig, 2016.

- [12] K. E. Duftschmid, J. Hizo, Ch. Strachotinsky. A secondary standard ionisation chamber for the direct measurement of ambient dose equivalent  $H^*(10)$ . *Radiat. Prot. Dosim.* 40(1), 1992, 35–38.
- [13] ISO 4037-1:2019, X and gamma reference radiation fields for calibrating dosimeters and doserate meters and for determining their response as a function of photon energy - Part 1: Radiation characteristics and production methods, ISO, Geneva, 2019.
- [14] JCGM 100:2008, Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM 1995), JCGM, 2008.

## EURAMET DOSETRACE PROJEKAT I DODATNA INTERKOMPARACIJA

**Miloš ŽIVANOVIĆ<sup>1</sup>, Oliver HUPE<sup>2</sup>, Amra ŠABETA<sup>3</sup>,  
Nikola KRŽANOVIĆ<sup>1</sup> i Vedrana MAKARIĆ<sup>3</sup>**

- 1) *Institut za nuklearne nauke Vinča (VINS), Univerzitet u Beogradu, Beograd, Srbija,*  
[milosz@vinca.rs](mailto:milosz@vinca.rs), [krzanovic@vinca.rs](mailto:krzanovic@vinca.rs)
- 2) *Fizičko-tehnička državna ustanova (PTB), Braunšvajg, Nemačka,*  
[oliver.hupe@ptb.de](mailto:oliver.hupe@ptb.de)
- 3) *Institut za mjeriteljstvo Bosne i Hercegovine (IMBiH), Sarajevo, Bosna i Hercegovina,*  
[amra.sabeta@met.gov.ba](mailto:amra.sabeta@met.gov.ba), [vedrana.makaric@met.gov.ba](mailto:vedrana.makaric@met.gov.ba)

### SADRŽAJ

Tačna i sledljiva merenja operativnih veličina su neophodna za adekvatnu zaštitu od zračenja. Nacionalni metrološki instituti i Imenovani instituti su zaduženi za diseminaciju SI jedinice Sivert i za etaloniranje korisničke opreme. Ipak, u velikom broju Evropskih zemalja, mogućnosti etaloniranja za operativne veličine su nedovoljno razvijene ili nepostojeće. Glavni cilj DOSEtrace projekta je unapređenje ovih mogućnosti, kao i smanjenje proširene merne nesigurnosti učesnika projekta ispod 5 % ( $k = 2$ ). U okviru projekta će biti sprovedena Dodatna interkomparacija kalibracionih faktora za ambijentalni dozni ekvivalent. Ova interkomparacija će pomoći učesnicima projekta da validiraju merne mogućnosti razvijene pre i tokom projekta, a takođe će pomoći novim institutima da steknu međunarodno priznanje. U okviru intercomparacije, biće pokriveni kvaliteti zračenja radionuklida, kao i x-zračenja.

## UTICAJ VAZDUŠNE ŠUPLJINE NA RASPODELU DOZE U RADIJACIONOJ TERAPIJI FOTONSKIM SNOPI

Andrea KOJIĆ<sup>1</sup> i Miloš VICIĆ<sup>2</sup>

1) Institut za nuklearne nauke "Vinča", Univerzitet u Beogradu, Vinča, Srbija, [andrea.kojic@vinca.rs](mailto:andrea.kojic@vinca.rs)

2) Fizički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Beograd, Srbija, [mvicic@ff.bg.ac.rs](mailto:mvicic@ff.bg.ac.rs)

### SADRŽAJ

Sistemi za planiranje (TPS) u radioterapiji daju dobru procenu raspodele doze u homogenim sredinama, odnosno vrednosti koje su unutar preporučenih referentnih vrednosti [1-2]. Postavlja se pitanje uticaja nehomogenosti tkiva odnosno regija sa različitom elektronskom koncentracijom na raspodelu doze. U ovom radu prikazan je uticaj vazdušne šupljine na raspodelu doze duž centralne ose snopa. Ukazano je na pojavu sekundarnog nagomilavanja doze izvan regije vazdušne šupljine kao i na isporučenje niže doze unutar regije vazdušne šupljine [3]. Studija je sprovedena pomoću Monte Karlo simulacija u programskom paketu EGSnrc. U cilju optimizacije izlaganja pacijenata u radijacionoj terapiji, ove efekte bi trebalo uvrstiti u algoritme za proračun doze koje koriste sistemi za planiranje terapije.

### 1. Uvod

Jedan od programskih paketa koji koristi Monte Karlo simulacije je EGSnrc (engl. *Electron Gamma Shower, National Research Council of Canada*). EGSnrc simulira transport fotona i elektrona čije se energije kreću od 1 keV za fotone, odnosno nekoliko desetina keV za elektrone, do nekoliko stotina GeV za obe vrste čestica, u proizvoljnoj geometriji sačinjenoj od bilo kog elementa ili jedinjenja [4]. EGSnrc u sebi sadrži algoritme koji opisuju transport čestica, kao i efikasne preseke za razne fizičke procese (fotoelektrični efekat, Komptonovo rasejanje, zakočno zračenje, atomske relaksacije, kreacija parova itd.) koji se odvijaju prilikom prolaska radijacionog snopa kroz sredinu. EGSnrc u sebi sadrži programske kodove BEAMnrc i DOSXYZnrc. BEAMnrc služi za modeliranje izvora koji se koriste u terapiji zračenjem (<sup>60</sup>Co, generisani elektronski i fotonski snopovi i drugi). Takođe se pomoću BEAMnrc programskog koda može modelirati svaka pojedinačna komponenta linearnog akceleratora. DOSXYZnrc se koristi za dobijanje raspodele doze unutar fantoma. Raspodela doze je predstavljena 3D matricom koja je rezultat kombinacije raspodela doza na centralnoj osi i van nje. Na osnovu ove matrice može se dobiti PDD (engl. *Percentage Depth Dose*) kriva koja opisuje ponašanje apsorbovane doze duž centralne ose [5]. DOSXYZnrc ima mogućnost odabira različitih izvora za ozračivanje fantoma. Jedan od izvora je i fazna ravan („*phase-space*“) koja se učitava kao poseban fajl prethodno dobijen u programskom kodu BEAMnrc. Najniža energija sa kojom se vrši transport čestica naziva se „*cutoff*“ energija. Čestice koje imaju energiju nižu od definisane *cutoff* energije, prestaju da se prate u simulaciji.

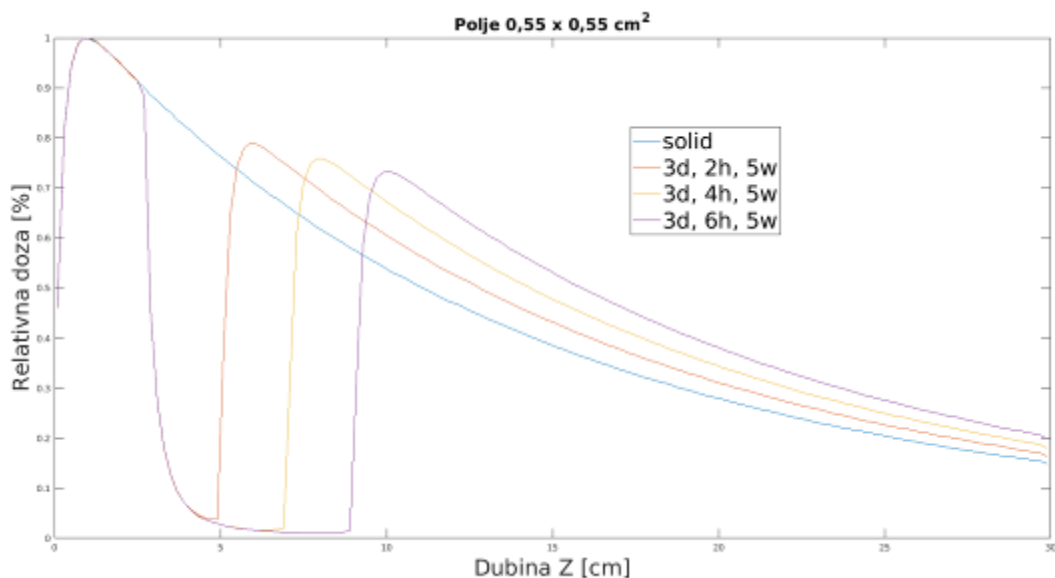
## 2. Metoda

Za dobijanje raspodele doze unutar pravougaonog fantoma koji je ozračen radijacionim snopom od 6 MV korišćen je korisnički kod DOSXYZnrc u okviru EGSnrc programskog paketa. Za potrebe ovog rada u DOSXYZnrc programskom kodu kao izvor zračenja korišćeni su fajlovi faznog prostora preuzeti iz onlajn baze podataka [6] Međunarodne agencije za atomsku energiju (IAEA – International Atomic Energy Agency). Preuzeti fajlovi faznog prostora (dobijeni u korisničkom kodu BEAMnrc) opisuju realistični linearni akcelerator Varian Clinac iX 6 MV, za veličine radijacionog polja:  $0,55 \times 0,55 \text{ cm}^2$ ,  $1,11 \times 1,11 \text{ cm}^2$ ,  $2 \times 2 \text{ cm}^2$ ,  $4 \times 4 \text{ cm}^2$ . Prilikom simulacije u obzir su uzeti relativistički spinski efekti, Komptonovo rasejanje, fotoelektrični efekat, atomske relaksacije, zakočno zračenje i kreacija parova. U simulaciji je korišćen vodeni fantom dimenzija  $50 \text{ cm} \times 50 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$  i gustine  $1,00 \text{ g/cm}^3$ , koji je podeljen na voksele različitih dimenzija. Ono što je u ovom radu od interesa su vokseli duž centralne z-ose, čije dimenzije po ovoj osi iznose 2 mm. Šupljina unutar fantoma je ispunjena vazduhom gustine  $1,2048 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$ , a njene dimenzije i položaj su varirani. Svi rezultati simulacija su obrađeni u softverskom okruženju MATLAB u kome su dobijene PDD krive koje su korišćene za dalju analizu rezultata. Broj istorija iznosi  $6,4 \times 10^8$  za sve simulacije. Broj recikliranja svake čestice iz izvora (fazne ravni), odnosno koliko puta je čestica korišćena prilikom svakog očitavanja, bio je podešen na 100. U simulaciji su korišćene standardne vrednosti *cutoff* energija od 0,7 MeV za elektrone i 0,01 MeV za fotone [7]. Nakon dostizanja *cutoff* energije deponovana energija čestice u lokalnom vokselu biva zabeležena.

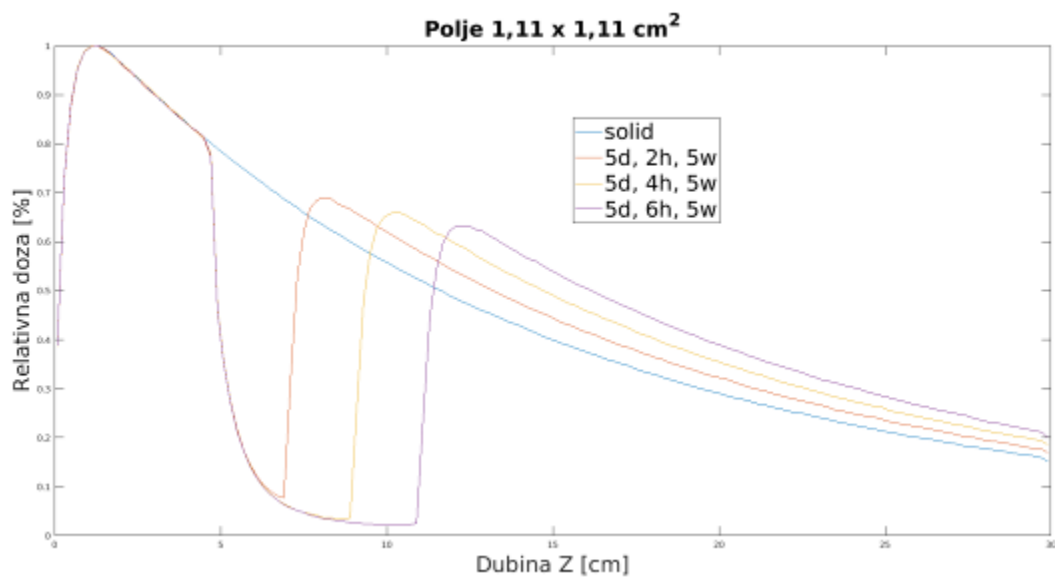
## 3. Rezultati i diskusija

Grafici PDD krivih prikazani su za različite veličine radijacionog polja:  $0,55 \times 0,55 \text{ cm}^2$ ,  $1,11 \times 1,11 \text{ cm}^2$ ,  $2 \times 2 \text{ cm}^2$ ,  $4 \times 4 \text{ cm}^2$ . Vazdušne šupljine su pozicionirane na različitim dubinama ( $d$ ) u vodenom fantomu: 3 cm, 5 cm, 7 cm, 10 cm. Sve šupljine imaju istu površinu ( $w$ ) od  $5 \text{ cm}^2$ . Kriva označena kao *solid* predstavlja PDD krivu u slučaju kada je sredina homogena, odnosno kada u vodenom fantomu ne postoji vazдушna šupljina.

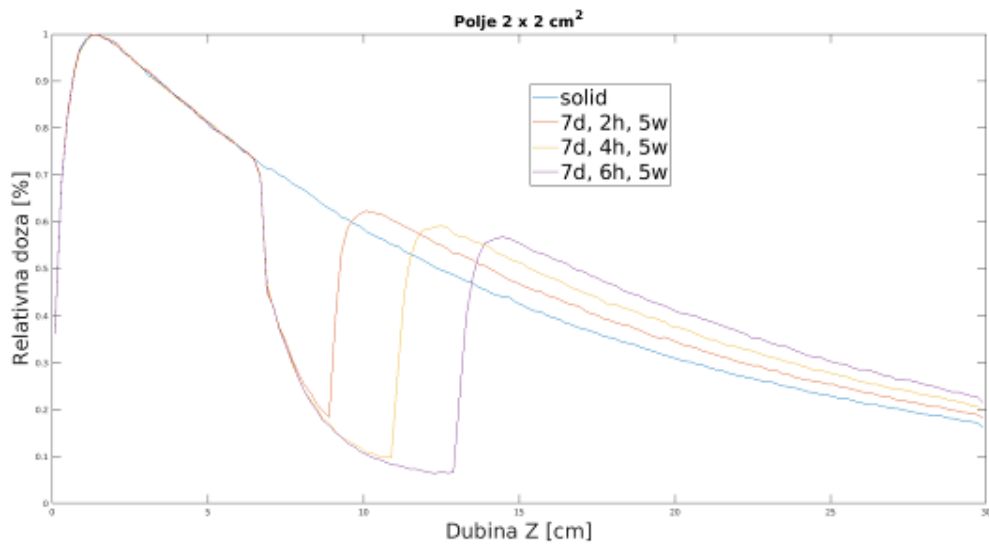
Sa grafika se uočava da doza naglo opada unutar vazdušne šupljine zbog značajnog nedostatka rasejanja u ovoj regiji, kao i da dolazi do sekundarnog nagomilavanje doze izvan vazdušne šupljine. Sekundarno nagomilavanje doze se objašnjava ponovo povećanom elektronskom koncentracijom u vodi u odnosu na vazduh i samim tim većim brojem rasejanja u toj regiji. Takođe, izvan granice vazduh – voda postoji i doprinos dozi od elektrona rasejanih u vazdušnoj šupljini zbog smanjene atenuacije primarnog snopa zračenja prolaskom kroz vazduh.



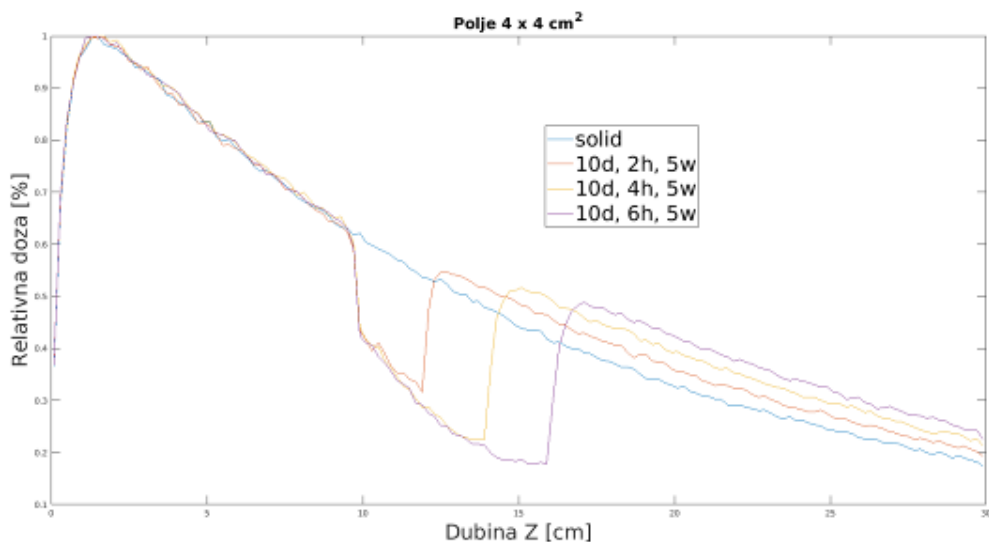
Grafik 1. PDD kriva za polje 0.55 x 0.55 cm<sup>2</sup>, i vazдушnu šupljinu pozicioniranu na 3 cm, površine 5 cm<sup>2</sup>, i variranih visina od 2 cm, 4 cm, 6 cm.



Grafik 2. PDD kriva za polje 1.11 x 1.11 cm<sup>2</sup>, i vazдушnu šupljinu pozicioniranu na 5 cm, površine 5 cm<sup>2</sup>, i variranih visina od 2 cm, 4 cm, 6 cm.



**График 3.** PDD kriva za polje 2 x 2 cm<sup>2</sup>, i vazдушnu šupljinu pozicioniranu na 7 cm, površine 5 cm<sup>2</sup>, i variranih visina od 2 cm, 4 cm, 6 cm.



**График 4.** PDD kriva za polje 4 x 4 cm<sup>2</sup>, i vazдушnu šupljinu pozicioniranu na 10 cm, površine 5 cm<sup>2</sup>, i variranih visina od 2 cm, 4 cm, 6 cm.

#### 4. Zaključak

Dobijeni rezultati ukazuju na postojanje sekundarnog nagomilavanja i na povećanje apsorbovane doze u regiji pozicioniranoj iza vazdušne šupljine. Ovakvi rezultati ukazuju na potencijalnu potrebu optimizacije TPS kod ozračivanja regija koje sadrže šupljinu (pluća, debelo crevo itd.). U cilju optimizacije izlaganja pacijenata, da ne bi došlo da isporučivanja doza koje se razlikuju od planiranih, potrebno je uzeti u obzir efekat koji vazdušne šupljine imaju na promenu apsorbovane doze u regiji iza šupljine.



### 5. Literatura

- [1] ICRU. International Commission on Radiation Units and Measurements. *Prescribing, Recording, and Reporting Photon Beam Therapy*. ICRU Report 50, and Report 62, Bethesda, MD USA, 1993.
- [2] Marta Bueno Vizcarra, *Absorbed dose assessment in the presence of tissue heterogeneities in external radiotherapy* (Doctoral dissertation), Institut de Tècniques Energètiques, Universitat Politècnica de Catalunya, 2013.
- [3] A. Kojić, *Sekundarno nagomilavanje doze zračenja u šupljim fantomima* (master rad), Fizički fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd 2018.
- [4] I. Kawrakow, E. Mainegra-Hing, D.W.O. Rogers, F. Tessier, B.R.B. Walters, *The EGSnrc Code System: Monte Carlo Simulation of Electron and Photon Transport*, Ionizing Radiation Standards, National Research Council of Canada, Ottawa, Canada, 2019.
- [5] Faiz M. Khan, *The Physics of Radiation Therapy – Fourth edition*, Lippincott Williams & Wilkins, a Wolters Kluwer business, 2010.
- [6] [https://www-nds.iaea.org/phsp/photon/Varian\\_Clinac\\_iX\\_6MV/](https://www-nds.iaea.org/phsp/photon/Varian_Clinac_iX_6MV/), poslednji put pristupano 16.05.2019.
- [7] B. Walters, I. Kawrakow and D.W.O. Rogers, *DOSXYZnrc Users Manual*, Ionizing Radiation Standards, National Research Council of Canada, Ottawa, Canada, 2019.

## INFLUENCE OF AIR CAVITY ON DOSE DISTRIBUTION IN PHOTON BEAM RADIATION THERAPY

Andrea KOJIĆ<sup>1</sup> and Miloš VIĆIĆ<sup>2</sup>

1) Vinca Institute of Nuclear Sciences, University of Belgrade, Vinca, Serbia,  
[andrea.kojic@vinca.rs](mailto:andrea.kojic@vinca.rs)

2) Faculty of Physics, University of Belgrade, Belgrade, Serbia,  
[mvicic@ff.bg.ac.rs](mailto:mvicic@ff.bg.ac.rs)

### ABSTRACT

Treatment planning systems (TPS) accurately assess dose distribution in homogeneous medium. Inhomogeneities, due to varying electron densities of organs, should be accounted for in dose distribution in order to accurately deliver dose to the patient. In this paper, the influence of an air cavity on dose distribution along the central axis of the beam was investigated using the EGSnrc Monte Carlo simulation package. Secondary build-up in absorbed dose was observed in the vicinity beyond the air cavity. Optimization of protection of patients in radiation therapy requires the TPS algorithms used to calculate the dose distribution, to include these effects.

## MONTE CARLO DOZIMETRIJA U BRAHITERAPIJI KANCERA CERVIKSA

Dragana KRSTIĆ<sup>1</sup>, Radovan ILIĆ<sup>2</sup>, Aleksandra JOVANOVIĆ<sup>3</sup>,  
Marija Ž. JEREMIĆ<sup>3</sup>, Dragoslav NIKEZIĆ<sup>1</sup>,  
Nebojša NIKOLIĆ<sup>3</sup> i Jasmina MIHAJLOVIĆ<sup>3</sup>

- 1) Univerzitet u Kragujevcu, Prirodno Matematički fakultet, Kragujevac, Srbija, [dragana@kg.ac.rs](mailto:dragana@kg.ac.rs), [nikezic@kg.ac.rs](mailto:nikezic@kg.ac.rs)
- 2) Institut za nuklearne nauke Vinča, Beograd, Srbija, [rasacale@gmail.com](mailto:rasacale@gmail.com)
- 3) Kliničko Bolnički Centar, Kragujevac, Srbija, [aleks.jovanovic1993@gmail.com](mailto:aleks.jovanovic1993@gmail.com), [marijafiz@yahoo.com](mailto:marijafiz@yahoo.com), [nebojsanikolic84@gmail.com](mailto:nebojsanikolic84@gmail.com), [jasmina.mihajlovic@gmail.com](mailto:jasmina.mihajlovic@gmail.com),

### SADRŽAJ

*U radu je prikazano poređenje apsorbovanih doza u brahiterapijskim planovima i Monte Karlo simulacijama u brahiterapiji pacijentkinja sa karcinomom grlića materice. U Odeljenju za brahiterapiju u Kliničkom centru Kragujevac primenjuje se mikroSelektron za intrakavitarnu brahiterapiju u HDR režimu. Ovaj uređaj koristi minijaturni radioaktivni izvor <sup>192</sup>Ir u obliku cilindra, aktivnih dimenzija 0,6 mm × 3,5 mm, i visoke početne aktivnosti od 370 GBq.*

*Pre terapije, vrši se kompjutersko planiranje, koje predstavlja kompjutersku rekonstrukciju položaja vodiča izvora u pacijentu na osnovu dva radiografska snimka, i izodozno planiranje u odnosu na željene dozimetrijske tačke. Osnovni podaci planiranja su dnevna doza, koja iznosi 700 cGy i broj frakcija; dnevna doza se isporučuje se u tri frakcije jednom nedeljno.*

*Monte Karlo simulacije su obavljene korišćenjem MCNP6 softvera verzije 2.0 kako bi se procenila raspodela doze u materici i kritičnim organima od rizika (bešika i debelo crevo). MCNP F6 tally (MeV/g) je izabran zbog lakog konvertovanja deponovane energije u apsorbovanu dozu. Za pripremu ulaznih datoteka koje simuliraju brahiterapiju korišćeni su matematički ORNL i voksel fantomi.*

*Upoređivanjem izmerenih i izračunatih vrednosti može se videti da su Monte Carlo tehnike moćno sredstvo za primenu u planiranju brahiterapije.*

### 1. Uvod

Termin brahiterapija znači „lečenje na kratkom rastojanju” (složenica od dve grčke reči: brachys – mali, kratak i therapeia – negovanje). Brahiterapija omogućava terapiju tumora bez hirurške intervencije. Sa stanovišta radioterapije i radiološke fizike predstavlja najcelishodniji vid radioterapije, jer ispunjava njen osnovni princip – koncentrisanje terapijske doze na metu (tumor) uz minimalno ozračivanje okolnih tkiva i organa [1].

Tokom godina, pa i decenija, brahiterapija je doživela revolucionarni razvoj. Danas se u brahiterapiji koristi preko dvadeset izotopa, ali se najčešće primenjuje samo šest: <sup>60</sup>Co, <sup>137</sup>Cs, <sup>192</sup>Ir, <sup>125</sup>I (kao gama emiteri), <sup>103</sup>Pd i <sup>90</sup>Sr (kao beta emiteri). Poslednjih godina se iridijum <sup>192</sup>Ir zamenjuje sa iterbijumom <sup>169</sup>Yb [2, 3]. Razlog je kraće vreme poluraspada

i niža energija gama zračenja (32,02 dana i 93 keV, respektivno). Za  $^{192}\text{Ir}$  vreme poluraspada i srednja energija fotona su 73,83 dana i 355 keV, respektivno. Da bi bio pogodan za korišćenje u brahiterapiji, radioaktivni izotop bi trebalo da emituje odgovarajuću vrstu i energiju zračenja, da ima pogodno vreme poluraspada, visoku specifičnu aktivnost (u zavisnosti od željene jačine terapijske doze) i mogućnost pakovanja u pogodan geometrijski oblik. U brahiterapiji se koriste različiti terapijski režimi zračenja, prema jačini doze zračenja u referentnoj zapremini: **LDR** (low dose rate, 0,4-2 Gy/h) - terapijski režim zračenja sa malom jačinom terapijske doze. Ovde se koriste izvori malih aktivnosti reda veličine nekoliko stotina MBq do oko 1000 MBq. **MDR** (medium dose rate, 2-12 Gy/h) je terapijski režim zračenja sa srednjom jačinom terapijske doze. **HDR** (high dose rate, >12 Gy/h) predstavlja terapijski režim zračenja sa visokom jačinom terapijske doze, gde se koriste izvori aktivnosti od nekoliko hiljada MBq do oko 0,3 TBq. Tretmani ovim režimom ušli su u široku upotrebu tokom poslednje dve decenije, posebno u terapiji ginekoloških tumora.

Od 1990. godine, pored ova tri osnovna brahiterapijska režima zračenja, koristi se i **PSLDR** (pulse simulated low dose rate) ili **PDR** (pulse dose rate) - režim pulsno simulirane niske jačine terapijske doze.

U brahiterapiji se uglavnom koriste zatvoreni izvori zračenja [4]. To su radioaktivni materijali smešteni u kapsule od materijala otpornih na koroziju (čelik, aluminijum, legure plemenitih metala, staklo, plastika itd.) i dejstvo spoljašnjih sila, te u normalnim uslovima rada ne može doći do kontaminacije iz izvora zračenja.

Kod klasične brahiterapije ne može doći do pojave indukovane radioaktivnosti, jer ne postoje izotopski izvori gama i beta zračenja dovoljno visoke energije koja bi omogućila bilo kakve fotonuklearne reakcije sa elementima koji ulaze u sastav tkiva. To znači da nakon ove terapije pacijenti ne predstavljaju izvore zračenja.

## 2. Materijal i metode

Na odeljenju brahiterapije u Kliničkom centru Kragujevac koristi se microSelectron afterloading uređaj (slika 1) za intrakavitarnu brahiterapiju u HDR režimu.

Ovaj uređaj koristi minijaturni radioaktivni izvor  $^{192}\text{Ir}$  u obliku valjka, aktivnih dimenzija oko 0,6 mm × 3,5 mm i visoke početne aktivnosti od oko 370 GBq. Izvor se nalazi na vrhu čelične sajle, koja u isto vreme predstavlja nosač izvora. Pre terapije, vrši se kompjutersko planiranje, koje predstavlja kompjutersku rekonstrukciju položaja vodiča izvora u pacijentu na osnovu dva radiografska snimka za dve geometrije, AP i LAT (slika 2), i izodozno planiranje u odnosu na željene dozimetrijske tačke. Izodozno planiranje zavisi od oblika i veličine tumora, broja aplikovanih vodiča izvora, izbora dozimetrijskog sistema, itd. Odgovarajuća izodozna raspodela na nivou tumora ostvaruje se pozicioniranjem radioaktivnog izvora u unapred zadate pozicije (maksimalno 48 pozicija pri koraku od 2 mm) u određenom vremenskom intervalu. Podaci o terapiji se sa sistema za planiranje prenose na kontrolnu konzolu uređaja komunikacionim kanalom. Pre početka terapije, sistem vrši proveru prohodnosti vodiča izvora pozicioniranjem neaktivnog „simulacionog izvora“, istih geometrijskih karakteristika kao i izvor zračenja, u najudaljeniju planiranu poziciju.



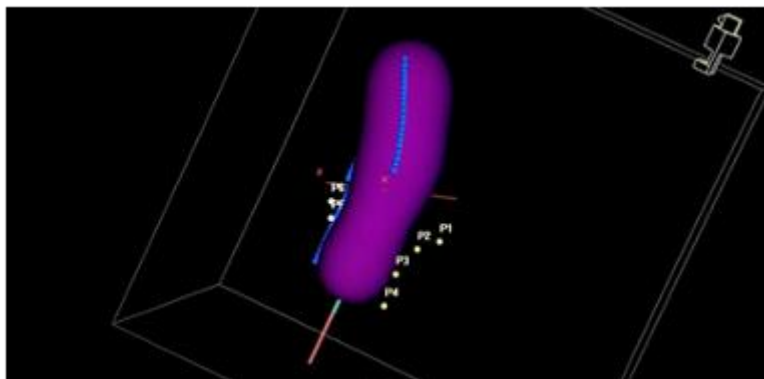
**Slika 1. MicroSelectron brahiterapijski uređaj (opšti izgled).**



**Slika 2. Rekonstrukcija niza.**

U slučajevima kada se tumor nalazi duboko u materici, koristi se kombinacija jednog aplikatora i intrauterusne sonde, i to tako da formiraju jedan *niz*. Na slici 3 prikazana je izodozna raspodela za niz.

U tzv. pacijentnim tačkama (tačke u organima od rizika) proverava se koliku dozu primaju organi od rizika (rektum i bešika). Na kraju se radi preskripcija, odnosno upisuje se doza (u cGy) u tumoru po jednoj frakciji, kao i broj frakcija. Na taj način dobija se brahiterapijski plan. Osnovni podaci planiranja su dnevna doza, koja iznosi 700 cGy i broj frakcija; dnevna doza se isporučuje se u tri frakcije jednom nedeljno.



Slika 3. 2D brahiterapijski plan – izodozna raspodela za niz.

### 3. Rezultati i diskusija

U ovom radu implementiran je Monte Carlo MCNP6 softver [5] za brahiterapiju. Isti scenario je korišćen u smislu geometrije pacijenta i radioaktivnog izvora kao u realnom slučaju. Odredjene su tačne pozicije izvora i tačaka pacijenta gde se izračunava apsorbirana doza. Pacijent je predstavljen pomoću dva tipa fantoma: ORNL [6] matematički ženski fantom i referentni kompjuterski ženski fantom (RCP-AF) [7].

ORNL ženski fantom predstavlja 15-godišnji ORNL fantom; grudi, jajnici i materica su modifikovani da bi bili prikladni za odraslu osobu ženskog pola. U ORNL fantomu postoje tri vrste tkiva: skeletno, plućno i meko tkivo, sa odgovornim elementarnim sastavom i gustinom. Glavni organi i organi ostatka ORNL fantoma predstavljeni su jednačinama analitičke geometrije. Uterus je elipsoid, koji je presečen ravni i može se prikazati pomoću sledećih jednačina:

$$\left(\frac{x}{a}\right)^2 + \left(\frac{y-y_0}{b}\right)^2 + \left(\frac{z-z_0}{c}\right)^2 \leq 1, \quad y \geq 1 \quad (1)$$

Za odraslog fantoma ženskog pola vrednosti parametara  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $y_0$ ,  $z_0$  i  $y_1$  (u cm) su: 2,47; 5,61; 1,55; -1,96; 12,62 i -4,77, respektivno; zapremina uterusa je  $76 \text{ cm}^3$ .

Input fajl za MCNP je kreiran za ORNL fantom ženskog pola.

Drugi korišćeni fantom je referentni kompjuterski ženski fantom (RCP-AF) kao što je opisano u publikaciji ICRP 110 (ICRP publikacija 110, 2009), sa masom i gustinom organa i tkiva datim u ovoj publikaciji. Ovi referentni računski modeli su digitalne trodimenzionalne reprezentacije stvarnog ljudskog tela, koje se zasnivaju na kompjuterskoj tomografiji stvarnih osoba, čija je anatomija opisana pomoću malih zapreminskih elemenata-voxela. Dimenzije jednog voxela su  $0,1775 \times 0,1775 \times 0,484 \text{ cm}^3$ , a ukupan broj voksela je 14 255 124 za RCP-AF fantom.

Pretpostavljeno je da je radioaktivan izvor  $^{192}\text{Ir}$  lokalizovan u uterusu, tako da se pomera u koracima po 2 mm i ostaje u planiranim položajima tačno odredjeni interval vremena. Kreirana su dva input fajl za MCNP, za ORNL fantom ženskog pola i RCP-AF voksel fantom.

U MCNP input fajlu primenjen je f6 tally (rezultat izlaza), koji daje deponovanu energiju po jedinici mase, u jedinicama  $\text{MeV/g per particle}$ . Formula [4] za računanje konverzionih koeficijenata može se predstaviti u obliku:

$$CC_{BT} = f \cdot 6,1602 \cdot 10^{-8} \cdot \eta \quad (2)$$

gde je  $\eta$  prinos, tj. broj emitovanih čestica po raspadu. Konverzioni koeficijenti za brahiterapiju se izražavaju u jedinicama  $cGy/(Bq \cdot s)$ .

Rezultati za svaku tačku i za sve pozicije izvora su sumirani i predstavljaju konverziona koeficijente apsorbirane doze u pacijentnim tačkama za brahiterapiju (u  $cGy/(Bq \cdot s)$ ).

Srednje vrednosti konverzionih koeficijenata za ORNL i RCP-AF voxel fantom su  $3,97 \cdot 10^{-10}$  i  $3,83 \cdot 10^{-10}$ , odakle se može zaključiti da se razlikuju za oko 3,5%.

Na osnovu dobijenih rezultata može se zaključiti da se konverzioni koeficijenti mogu koristiti kao korisno sredstvo u izračunavanju apsorbiranih doza u procesu brahiterapije, ako se pomnože poznatom aktivnošću primenjenog radioaktivnog izvora i vremenom zadržavanja izvora u određenim tačkama u odgovarajućim organima.

#### 4. Zaključak

U ovom radu je primenjen Monte Carlo metod za brahiterapiju u terapiji raka grlića materice. Izvršeno je poredjenje rezultata u terapiji konkretnih pacijenata sa vrednostima dobijenim u Monte Carlo simulacijama za matematički i vokselizovani fantom. Rezultati dobijeni korišćenjem Monte Carlo MCNP6 softvera su konverzioni koeficijenti, koji predstavljaju vrednosti apsorbirane doze po jedinici aktivnosti u jedinici vremena (u jedinicama  $cGy/(Bq \cdot s)$ ).

Ukupna apsorbirana doza se dobija množenjem sa aktivnošću izvora i vremenom zadržavanja izvora u pojedinačnim tačkama u odgovarajućim organima. Voxel fantomi su realniji prikaz tela pacijenta, ali sa još uvek prisutnim ograničenjima. U toku je razvoj sledeće generacije mesh fantoma, kao unapređene verzije voxel fantoma.

#### 5. Zahvalnica

Ovaj rad je podržan od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije, u okviru projekata 171021 i 43011.

#### 6. Literatura

- [1] G. Luxton, G. Jozsef. Radial dose distribution, dose to water and dose constant for monoenergetic photon point sources from 10 keV to 2 MeV; EGS4 Monte Carlo model calculation. *Med. Phys.* 26, 1999, 2531–2538.
- [2] D. Granero, J. Perez-Calatayud, F. Ballester, A. Bos, J. Venselaar. Broad beam transmission data for new brachytherapy sources, Tm-170 and Yb-169. *Radiat. Prot. Dosim.* 118, 2006, 11–15.
- [3] M. J. Cazeca, D. C. Medich, J. J. Munro. Monte Carlo characterization of a new Yb-169 high dose rate source for brachytherapy application. *Med. Phys.* 37, 2010, 1129–1136.
- [4] M. J. Rivard, B. M. Coursey, L. A. DeWerd, W. F. Hanson, M. S. Huq, G. S. Ibbott, M. G. Mitch, R. Nath, J. F. Williamson. Update of AAPM Task Group No.43 Report: a revised AAPM protocol for brachytherapy dose calculations. *Med. Phys.* 31, 2004, 633–674.



- [5] MCNP6.2 *Monte Carlo N-Particle Transport Code System*; Version 6.2. Report LA-UR-17-29981. Los Alamos, 2018.
- [6] K. F. Eckerman, M. Cristy, J. C. Ryman. Oak Ridge National Laboratory, TN 37831. USA, 1996.
- [7] ICRP 110: Adult Reference Computational Phantoms. Realistic reference phantoms: An ICRP/ICRU joint effort, *Ann. ICRP* 39, 3-5, Elsevier, 2009.

### MONTE CARLO DOSIMETRY FOR BRACHYTHERAPY OF CERVICAL CANCER

**Dragana KRSTIĆ<sup>1</sup>, Radovan ILIĆ<sup>2</sup>, Aleksandra JOVANOVIĆ<sup>3</sup>,  
Dragoslav NIKEZIĆ<sup>1</sup>, Marija JEREMIĆ<sup>3</sup>,  
Nebojša NIKOLIĆ<sup>3</sup> and Jasmina MIHAJLOVIĆ<sup>3</sup>**

- 1) *University of Kragujevac, Faculty of Science, Serbia, [dragana@kg.ac.rs](mailto:dragana@kg.ac.rs), [nikezic@kg.ac.rs](mailto:nikezic@kg.ac.rs)*
- 2) *Vinča Institute for Nuclear Science, Belgrade, Serbia, [rasacale@gmail.com](mailto:rasacale@gmail.com)*
- 3) *Clinical Center Kragujevac, Serbia, [aleks.jovanovic1993@gmail.com](mailto:aleks.jovanovic1993@gmail.com), [marijafiz@yahoo.com](mailto:marijafiz@yahoo.com), [nebojsanikolic84@gmail.com](mailto:nebojsanikolic84@gmail.com), [jasmina.mihajlovic@gmail.com](mailto:jasmina.mihajlovic@gmail.com)*

#### ABSTRACT

This paper presents the comparison of absorbed doses in brachytherapy plans and Monte Carlo simulation for brachytherapy treatment of a female patient with cervix carcinoma. At the Department of Brachytherapy at the Clinical Center Kragujevac, the microSelectron after loading device is used for intracavitary brachytherapy in the HDR regime. This device uses a miniature radioactive source <sup>192</sup>Ir in the form of a cylinder, active dimensions of 0.6 mm × 3.5 mm, and a high initial activity of about 370 GBq.

Before therapy, computer planning is performed, which represents a computer reconstruction of the position of the source guide in the patient based on two radiographic images, and isodose planning in relation to the desired dosimetry points. Essential planning data are the daily dose and number of fractions. In this case, the daily dose is 700 cGy and is delivered in three fractions once a week. This means that the duration of this brachytherapy treatment will be a total of three weeks.

Monte Carlo simulations by using MCNP6 code version 2.0 were applied for brachytherapy treatment to estimate the dose distribution in uterus and several critical organs at risk (bladder and colon). The MCNP tally f6 (MeV/g) was chosen due to easy convert energy deposition to absorbed dose. The computational ORNL and voxel phantoms were used to prepare input files which simulate brachytherapy.

By comparing measured and calculated values, it can be seen that Monte Carlo techniques are a powerful tool for application in brachytherapy planning.



## MAPIRANJE DOZE NA POVRŠINI KOŽE U INTERVENTNOJ KARDIOLOGIJI

Marko KRAJINOVIĆ<sup>1,2</sup> i Olivera CIRAJ-BJELAC<sup>1,2</sup>

1) Univerzitet u Beogradu, Institut za nuklearne nauke „Vinča“, Beograd, Srbija, [marko.krajinovic@vinca.rs](mailto:marko.krajinovic@vinca.rs)

2) Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, Beograd, Srbija, [ociraj@vinca.rs](mailto:ociraj@vinca.rs)

### SADRŽAJ

*Interventne kardiološke procedure su često povezane sa relativno visokim dozama i sa dugim vremenom izlaganja zračenju, što često rezultuje visokom apsorbovanom dozom kože. Cilj ovog rada je da se razvije aplikacija za mapiranje maksimalne doze kože u interventnim kardiološkim procedurama. Maksimalna doza na površini kože je izračunata pomoću informacija iz DICOM fajlova generisanih nakon kardioloških procedura. Izračunate maksimalne doze su validirane pomoću XR-RV3 Gafchromic filmova koji su postavljeni ispod pacijenta tokom svake procedure. Srednja devijacija između izmerenih i izračunatih maksimalnih doza je  $8,7\% \pm 26,3\%$ . Simulirana dozna mapa pacijenta je pokazala dobro poklapanje sa XR-RV3 Gafchromic filovima. Aplikacija za mapiranje doze kože prikazana u ovom radu je elegantno rešenje i pogodna alternativa za XR-RV3 Gafchromic filmove.*

### 1. Uvod

Kontinualni razvoj i implementacija sofisticiranih katetera i stentova u interventnoj kardiologiji (IC, eng. *Interventional Cardiology*) dovodi do složenijih i dugotrajnih procedura, ali i do povećanja doza za pacijente. Vremenom su kod određenog broja pacijenata registrovane radijacione povrede kože čime je nastala potreba za optimizovanom i personalizovanom dozimetrijom za pacijente. Do nedavno su merenja doze pomoću pasivnih dozimetara bila jedini način da se precizno proceni maksimalna doza na površini kože (PSD, eng. *Peak Skin Dose*) pacijenta. Međutim, s obzirom na to da su ovakva merenja složena, dugotrajna, nepraktična i skupa, bilo je neophodno osmisliti i razviti jednostavniji i praktičniji način za procenu PSD. Ubrzo su razvijena automatska *online* i *offline* rešenja za izračunavanje doze na površini kože pacijenta kao i *online* parametri koji omogućavaju procenu doze za pacijente (proizvod kereme u vazduhu i površine, kerma u vazduhu u interventnoj referentnoj tački) [1, 2, 3]. Sva pomenuta rešenja se baziraju na transferu podatka iz rendgen aparata ili iz DICOM (eng. *Digital Imaging and Communication in Medicine*) RDSR (eng. *Radiation Dose Structured Report*), ili na podacima sačuvanim u zaglavlju (eng. *header*) DICOM fajlova nakon procedure [4].

U ovom radu je prikazano softversko rešenje za mapiranje doze na površini kože pacijenta pomoću informacija iz DICOM fajlova generisanih nakon perkutane koronarne intervencije (PCI, eng. *Percutaneous Coronary Intervention*), koja predstavlja visokodoznu proceduru u interventnoj kardiologiji. U realnim kliničkim uslovima je izmerena maksimalna doza na površini kože pacijenta pomoću radiohromnih filmova

velikog formata tokom PCI. Na kraju su analizirani uporedni rezultati dobijeni softverski i pomoću radiohromnih filmova.

## 2. Materijali i metode

### 2.1. Populacija pacijenata

Populacija pacijentata koja je bila uključena u studiju su oni kod kojih je izvesno bilo da će biti podvrgnuti visokodoznim PCI procedurama na odeljenju za kateterizaciju srca Kliničkog centra Srbije. Ukupno je analizirano 10 PCI procedura.

### 2.2. Fluoroskopski sistem

Procedure su izvršene na dva identična Siemens Axiom Artis dFA digitalna fluoroskopska sistema koja se nalaze u dve sale (sala D i F) za kateterizaciju srca. Osnovne karakteristike sistema su: generator snage 80 kW, napon i struja cevi 50-125 kV i 10-800 mA respektivno, ravan panel detektor, filtracija aparata od 4 mm Al, sa dodatnom filtracijom od Cu (0 mm do 0,3 mm). Brzina frejmova od 7,5 f/s je korišćena tokom svih procedura.

### 2.3. Etaloniranje fluoroskopskih mašina

Etaloniranje dozimetara intergrisanih u rendgen-aparate za fluoroskopiju u dozimetrijskoj veličini kerma u vazduhu u interventnoj referentnoj tački,  $K_{a,r}$ , izvršena je u skladu sa standardnom procedurom za sisteme sa rendgenskom cevi ispod nosača pacijenta [5]. Poluprovodnički dozimetar R-100 Barracuda (RTI Electronic, Molndal, Sweden) korišćen je kao referentni standard za određivanje kerme u vazduhu.

### 2.4. Merenje doze na površini kože

Doza na površini kože je merena korišćenjem XR-RV3 Gafchromic filmova. Filmovi su postavljeni iznad podmetača, a ispod sterilnog čaršava na kome leži pacijent, tako da se film nalazi u gornjem delu torza pacijenta. Filmovi su bili orijentisani tako da je žuta strana okrenuta ka rendgenskoj cevi. Kalibracija filmova je izvršena u Laboratoriji za metrologiju u Institutu za nuklearne nauke „Vinča“ na opsegu od 0 do 5 Gy kao u radu Farah et al. [6].

### 2.5. Aplikacija za mapiranje doze

Mapiranje doze je ostvareno pomoću podataka (javno dostupnih i privatnih) sadržanih u zaglavljima DICOM fajlova i pomoću podataka na kraju doznog izveštaja koji sumira ukupnu vrednost  $K_{a,r}$  za celu proceduru. Gornji deo tela pacijenta je modeliran kao kvadrat dimenzije 320x320 piksela. Korišćenjem podataka iz DICOM zaglavlja moguće je naći poziciju rendgenske cevi i detektora nakon čega ostaje samo da se nađe presek između ravni pacijenta i zrakova koji idu ka detektoru.

Nakon određivanja piksela koji se nalazi unutar snopa X-zračenja, pristupilo se računanju doze. Doza je izračunata na osnovu jednačine 1 [7]. U ovoj jednačini  $K_{a,r}$  predstavlja kermu u vazduhu u interventnoj referentnoj tački,  $d_{izvor-IRP}$  rastojanje od izvora do interventne referentne tačke,  $d_{izvor-pacijent}$  rastojanje od izvora do piksela pacijenta,  $CF$  kalibracioni faktor za  $K_{a,r}$ ,  $BSF$  faktor rasejanog zračenja unazad,  $MAEC$  odnos masenih koeficijenata apsorpcije energije kože i vazduha, a  $T$  je korekcionni faktor za atenuaciju snopa usled prisustva stola i podmetača.

$$Doza = K_{a,r} \times \left( \frac{d_{izvor-IRP}}{d_{izvor-pacijent}} \right)^2 \times CF \times BSF \times MAEC \times T \quad (1)$$

BSF vrednosti su izračunate u zavisnosti od kvaliteta snopa i veličine polja korišćenjem podataka dobijenih u radu *Benmakhlouf et al.* [8]. Veličina *MAEC* je preuzeta iz baze NIST (eng. *National Institute of Standards and Technology*) [9]. Koža je modelirana kao meko tkivo (ICRU četiri-komponente). Korekcionni faktor za atenuaciju snopa zbog prisustva stola i podmetača, *T*, utiče osetno na primarni snop i uzeta je konzervativna vrednost 0,8 za svaku ekspoziciju. Pošto ne postoje geometrijski i dozimetrijski podaci o svakoj fluoroskopskoj ekspoziciji, njen doprinos je podjednako raspoređen na svim lokacijama, pa se svakoj fluorografskoj dozi dodaje i doprinos ukupne fluoroskopske doze koja se deli sa ukupnim brojem fluorografija.

Aplikacija za mapiranje doze na površini kože pacijenta je napravljena u programskom jeziku Python. Biblioteka Tkinter je korišćena za pravljenje grafičkog interfejsa aplikacije. Aplikacija ima jednostavan dizajna sa namerom za laku upotrebu. Korisnik samo treba da odabere DICOM fajlove generisane nakon završene procedure i da unese kumulativnu dozu (ukupnu kermu u vazduhu u interventnoj referentnoj tački) nakon čega se dobija 2D mapa pacijenta u boji, gde svaka boja predstavlja određenu dozu.

### 3. Rezultati

#### 3.1. Aplikacija za mapiranje doze

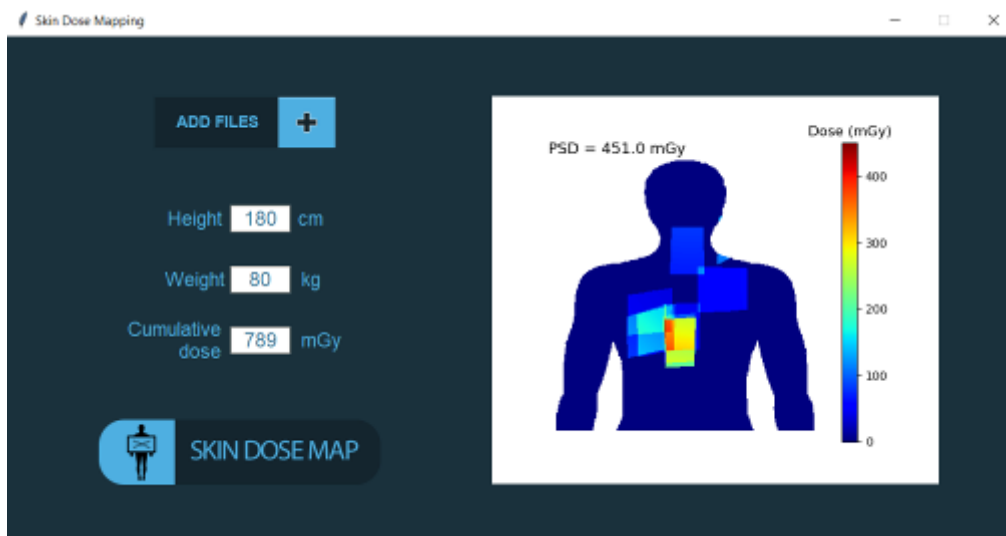
Grafički interfejs razvijene aplikacije je prikazan na Slici 1. Kako bi se dobila dozna mapa neophodno je izvršiti sledeće korake:

- Izabrati DICOM fajlove pritiskom na dugme “ADD FILES”,
- Uneti visinu i težinu pacijenta u cilju dobijanja realnije predstave pacijenta,
- Uneti kumulativnu dozu.

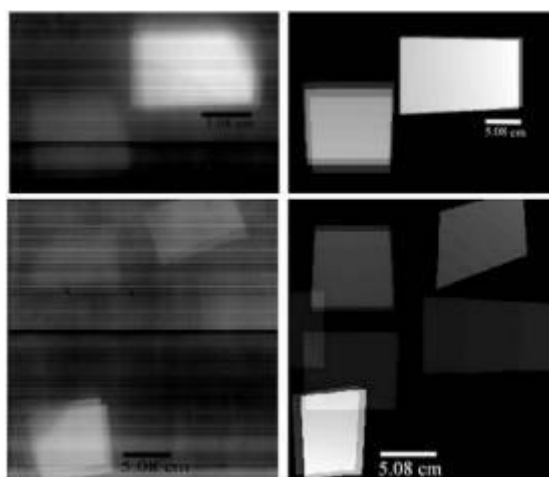
Nakon unošenja neophodnih parametara, pritiskom na dugme “SKIN DOSE MAP” program pristupa proračunu doze i relativno brzo (par sekundi za 20 DICOM fajlova) generiše doznu mapu u desnom delu aplikacije. Skala boja je prikazana pored dozne mape u cilju lakše identifikacije regije od interesa. Vrednost PSD je prikazana u gornjem levom delu mape.

#### 3.2. Geometrijsko poređenje između XR-RV3 Gafchromic filmova i simulacije

Geometrijsko poređenje između XR-RV3 Gafchromic filmova i simulacije za dve različite procedure je prikazano na Slici 2. Jasno se vidi sličnost koja potvrđuje geometrijsku ispravnost modela. Treba napomenuti da skener koji je korišćen za geometrijsko poređenje nije korišćen prilikom kalibracije usled prisustva horizontalnih linija na skeniranoj slici.



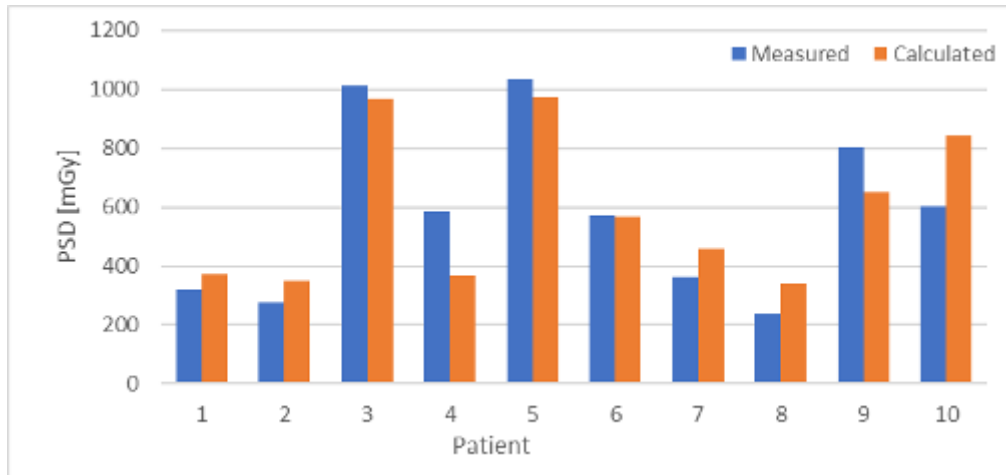
Slika 1. Aplikacija za mapiranje doze na površini kože.



Slika 2. Geometrijsko poređenje između XR-RV3 Gafchromic filmova (levo) i simulacije (desno).

### 3.3. Poređenje izmerene i izračunate doze

Na Slici 3. je prikazana razlika između izmerenih i izračunatih PSD vrednosti za sve pacijente. Kako bi se verifikovala aplikacija za svakog pacijenta je izračunata devijacija između izračunatih i izmerenih vrednosti PSD. Uzimajući u obzir sve procedure, devijacije između izmerenih i izračunatih vrednosti PSD se kreću u opsegu između -37,1% i 43,9%, dok je srednja devijacija  $8,7\% \pm 26,3\%$ .



Slika 3. Razlika između izmerenih i izračunatih PSD vrednosti za sve pacijente.

#### 4. Diskusija

Originalna aplikacija prikazana u ovom radu za mapiranje doze na površini kože pacijenta predstavlja praktičan i efikasan način određivanja maksimalne doze pacijenta u interventnoj kardiologiji. Uzimajući u obzir sve procedure, devijacije između izmerenih i izračunatih vrednosti PSD se kreću u opsegu između -37,1% i 43,9%, dok je srednja devijacija  $8,7\% \pm 26,3\%$ .

U nastavku su opisani glavni nedostaci korišćene metodologije, softvera i DICOM standarda u pogledu mapiranja doze na površini kože i određivanja maksimalne doze. Zaglavlje DICOM fajla ne sadrži podatke o pomeranju stola na kome leži pacijent u 3D prostoru, pa je pretpostavka da se sto ne pomera u lateralnom i longitudinalnom smeru, a da je visina stola konstanta. Nedostatak ovih informacija ima za posledicu da ne može da se odredi tačna mapa doze na površini kože, već je pretpostavka da se doza akumulira u jednoj regiji, a u stvarnosti može biti u više različitih regija. 3D predstava pacijenta, za razliku od 2D predstave kao u softveru, predstavlja realniju situaciju tokom procenu doze, i može doći do izražaja pri većim angulacijama, kada je bočni deo pacijenta izložen zračenju. Veličina pacijenta kao i tačna pozicija pacijenta na stolu mogu dodatno učiniti procenu doze preciznijom.

#### 5. Zaključak

Ovaj rad predstavlja originalnu razvijenu aplikaciju za mapiranje doze u IC. Aplikacija koristi standardizovane DICOM fajlove kako bi se generisala dozna mapa i predstavlja elegantno rešenje i pogodnu alternativu za XR-RV3 Gafchromic filmove. Cilj daljeg istraživanja je implementacija DICOM RDSR i generisanje doznih mapa na 3D ljudskim modelima.

#### 6. Zahvalnica

Ovaj rad je finansijski podržan od strane Ministarstva za prosvetu, nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije, u okviru projekta broj III 43009.

### 7. Literatura

- [1] Y. Khodadadegan, M. Zhang, W. Pavlicek, R.G. Paden, B. Chong, B.A. Schueler, K.A. Fetterly, S.G. Langer, T. Wu. Automatic Monitoring of Localized Skin Dose with Fluoroscopic and Interventional Procedures. *J. Digit. Imaging*, Vol 24, No 4 (August), 2011, 626-639.
- [2] J. Greffier, C. Van Ngoc Ty, G. Bonniaud, G. Moliner, B. Ledermann, L. Schmutz, L. Cornillet, G. Cayla, J.P. Beregi, F. Pereira. Assessment of peak skin dose in interventional cardiology: A comparison between Gafchromic film and dosimetric software em.dose. *Phys. Medica* 38, 2017, 16–22.
- [3] C. Bordier, R. Klausz, L. Desponds. Patient dose map indications on interventional x-ray systems and validation with gafchromic XR-RV3 film. *Radiat. Prot. Dosim.* 163(3), 2015, 306–318.
- [4] DICOM standard. Dostupan na: <http://dicom.nema.org>.
- [5] Implementation of the International Code of Practice on dosimetry in diagnostic radiology. — Vienna : International Atomic Energy Agency, 2011.
- [6] J. Farah A. Trianni O. Ciraj-Bjelac I. Clairand C. De Angelis S. Delle Canne L. Hadid C. Huet H. Jarvinen A. Negri L. Novák M. Pinto T. Siiskonen M. J. Waryn Ž. Knežević. Characterization of XR-RV3 GafChromic® films in standard laboratory and in clinical conditions and means to evaluate uncertainties and reduce errors. *Med Phys.* 42(7), 2015, 4211-4226.
- [7] A. Kyle Jones, Alexander S. Pasciak. Calculating the peak skin dose resulting from fluoroscopically guided interventions. Part I: Methods. *J Appl Clin Med Phys.*, Vol. 12 No 4, 2011, 3670.
- [8] H. Benmakhlouf, H. Bouchard, A. Fransson, P. Andreo. Backscatter factors and mass energy-absorption coefficient ratios for diagnostic radiology dosimetry. *Phys Med Biol.* 56(22), 2011, 7179-204.
- [9] Tabele masenih koeficijenata apsorpcije energije. Dostupno na: <https://www.nist.gov/pml/x-ray-mass-attenuation-coefficients>.

## SKIN DOSE MAPPING IN INTERVENTIONAL CARDIOLOGY

**Marko KRAJINOVIC<sup>1,2</sup> and Olivera CIRAJ-BJELAC<sup>1,2</sup>**

1) *University of Belgrade, Vinča Institute of Nuclear Sciences, Belgrade, Serbia,*  
*[marko.krajinovic@vinca.rs](mailto:marko.krajinovic@vinca.rs)*

2) *University of Belgrade, School of Electrical Engineering, Belgrade, Serbia,*  
*[ociraj@vinca.rs](mailto:ociraj@vinca.rs)*

### ABSTRACT

Interventional Cardiology (IC) procedures are frequently associated with relatively high dose rates and prolonged irradiation times, which often results in very high absorbed skin doses. Objective of this work is to develop skin dose mapping application for Peak Skin Dose (PSD) estimation in Interventional Cardiology procedures. PSD was calculated using necessary information from Digital Imaging and Communications in Medicine (DICOM) headers generated after cardiac procedures. Calculated PSDs were validated using XR-RV3 Gafchromic films placed under the patient's back during each procedure. The mean deviation between measured and calculated PSD was  $8.7\% \pm 26.3\%$ . Simulated skin dose map showed good matching with XR-RV3 Gafchromic film. Skin dose mapping application presented in this paper is elegant solution and suitable alternative to XR-RV3 Gafchromic film.





**БИОЛОШКИ ЕФЕКТИ  
ЈОНИЗУЈУЋИХ ЗРАЧЕЊА**



### **BIOLOŠKI EFEKTI ZRAČENJA, RADIOTOKSIKOLOGIJA, MEDICINSKI NADZOR - PREGLEDNI RAD**

**Jelena PAJIĆ i Slađana VUKOVIĆ**

*Institut za medicinu rada Srbije „Dr Dragomir Karajović“, Beograd, Srbija,  
[jelena.pajic@institutkarajovic.rs](mailto:jelena.pajic@institutkarajovic.rs), [sladjana.vukovic@institutkarajovic.rs](mailto:sladjana.vukovic@institutkarajovic.rs)*

#### **SADRŽAJ**

*Oblast zaštite od jonizujućih zračenja posvećena biološkim efektima aktuelna je od prvog simpozijuma, održanog 1963., sve do danas. Iako je na početku tematika bila nova i istraživači suočeni sa brojnim izazovima, zalaganjem, znanjem i odličnim idejama doprineli su da se u okviru ove sesije objavi veliki broj zanimljivih radova. Još od prvog simpozijuma se u ovoj sesiji može videti trend izdvajanja medicinske zaštite (zdravstvenog nadzora), radiotoksikologije i bioloških efekata zračenja na humanom, životinjskom i biljnom materijalu. S obzirom na činjenicu da su se genetika i radiobiologija razvijale paralelno, i da je metoda kultivacije limfocita periferne krvi (osnov dicentrik testa) objavljena 1960., prvu deceniju simpozijuma obeležio je veći broj radova iz oblasti radiotoksikologije, dok kasnije uočavamo porast broja radova iz radiobiologije, biomonitoringa i različitih eksperimentalnih radova iz oblasti genetike, molekularne genetike i biohemije. Paralelno raste i broj radova koji govore o zdravstvenom nadzoru, obuhvatajući i rezultate radiobioloških ispitivanja.*

#### **1. Uvod**

Oblast zaštite od jonizujućih zračenja posvećena biološkim efektima, aktuelna je od prvog simpozijuma, održanog 1963. godine, sve do danas. Još od samog početka se u ovoj sesiji može videti trend izdvajanja medicinske zaštite (zdravstvenog nadzora), radiotoksikologije i radova koji proučavaju i prikazuju biološke efekte zračenja na humanom, životinjskom i biljnom materijalu. S obzirom na činjenicu da su se genetika i radiobiologija razvijale paralelno, i da je metoda kultivacije limfocita periferne krvi (osnov dicentrik testa) objavljena 1960. godine, prvu deceniju simpozijuma obeležio je veći broj radova iz oblasti radiotoksikologije, dok kasnije uočavamo porast broja radova iz radiobiologije, biomonitoringa i različitih eksperimentalnih radova iz oblasti genetike, molekularne genetike i biohemije. Paralelno raste i broj radova koji govore o zdravstvenom nadzoru, obuhvatajući i rezultate radiobioloških ispitivanja.

#### **2. Pregled radova po godinama**

##### **1963.**

Iako je na početku tematika bila nova i istraživači suočeni sa brojnim izazovima, zalaganjem, znanjem i odličnim idejama doprineli su da se u okviru ove sesije objavi

veliki broj zanimljivih radova. Posebno se, u oblasti radiobiologije, po istraživačkom značaju, izdvaja rad „Djelovanje X-zračenja na metabolizam nukleinskih kiselina u L-stanicama“ autora Brdar, Miletić i Drakulić [1] jer obrađuje, za to vreme, krajnje nove i aktuelne teme-delovanje zračenja na procese replikacije i transkripcije i senzitivnost molekula DNK u različitim delovima ćelijskog ciklusa. Drugi, takođe značajan rad nosi naslov „Hromozomske promene u belim krvnim ćelijama periferne krvi kod osoba akcidentalno ozračenih velikim dozama jonizirajućih zračenja“ autora Đorđević i Pendić [1], koji prikazuje prve rezultate hromozomskih promena kod osoba ozračenih tokom akcidenta u Institutu za nuklearne nauke „Vinča“ 1958. godine. Naročit značaj ovog rada ogleda se u činjenici da se počeci hromozomske dozimetrije vezuju za 1960. godinu, kada je prvi put zvanično publikovana metoda kultivacije limfocita periferne krvi [2], (koja se ne odnosi samo na biodozimetriju, ali predstavlja osnov dicentrik testa), i da je, prema dostupnim podacima, ovo prvi ikada publikovan rad ove tematike kod nas. Pored ovog, u okviru iste sesije, publikovano je još nekoliko radova koji se odnose na medicinski aspekt akcidenta u Vinči, u kojima se razmatra problematika parcijalne i ekspozicije celog tela (akutni radijacioni sindrom) sa akcentom na delovanju službi zaštite od zračenja u akcidentalnim situacijama (Đukić, Tomin, Pendić „Nuklearni akcidenti-medicinski aspekti“; Đukić, Pendić „Problemi kontaminacije i dekontaminacije ljudstva u laboratorijskim uslovima rada“) [1]. Od radova iz oblasti radiotoksikologije naročito se ističe „Polonijum u urinu rudara kao merilo ekspozicije radonu“, autora Đurić, Panov, Kilibarda, Novak, Vukotić [1] i nekoliko radova koji se bave internom kontaminacijom  $^{137}\text{Cs}$  i opštim preoblemima interne kontaminacije. Na ovom simpozijumu objavljeno je čak 19 radova koji su uključili eksperimente sa ozračenim životinjama, a među radovima na temu zdravstvenog nadzora naročito se ističu „Uran u mokraći radnika izloženih uranovim jedinjenjima“ i „Analiza medicinskih pregleda radnika zaposlenih u rudniku urana u Kalni“, autora Karajović, Panov, Kilibarda; „Akutni radijacioni sindrom: dijagnoza i lečenje“ autora Plećaš i Pendić i „Hematološki standardi i njihov značaj za kontrolu ljudstva profesionalno izloženog jonizujućim zračenjima“ autora Veljković, Tomin, Pendić, Đukić, kao najznačajniji za uspostavljanje standarda u rutinskoj praksi radiološke zdravstvene zaštite.

### **1969.**

Četvrti po redu simpozijum (na drugom, održanom 1965. i trećem, održanom 1967. godine, nisu razmatrane teme povezane sa radiobiologijom) obeležila su 24 rada iz oblasti bioloških efekata jonizujućih zračenja, od toga 17 iz radiotoksikologije, posvećenih mahom proučavanju delovanja stroncijuma na žive sisteme. U medicinskoj zaštiti prvi put se objavljuje rad koji pominje obavezu i značaj oftalmološkog pregleda profesionalno izloženih lica „Rezultati sistematskih pregleda organa vida u osoba hronično izloženih dejstvu X zračenja“ autora Savić, Jeremić [3], dok se ostalih 5 radova iz ove oblasti bavi praćenjem zdravstvenog stanja profesionalno izloženih lica i problematikom zdravstvene zaštite u akcidentalnim situacijama.

### **1970. /1972.**

Od 24 objavljena rada [4,5], (13 objavljenih 1970. i 11 objavljenih 1972.), 14 je iz oblasti radiotoksikologije – 6 publikovanih 1970. godine, dok je 8 publikovano 1972. godine.

### **1973.**

U delu koji se odnosi na radiobiologiju objavljeno je 6 radova, od kojih je, u populaciono-genetičkom smislu, značajan rad "Procjena godišnje genetski signifikantne doze od dijagnostičke primjene rendgen aparata u SFRJ" autora Jokić, Žarković, Marjanac, koji se bavi problematikom genetički značajne doze prilikom nekih vrsta medicinskih izlaganja. U okviru zdravstvenog nadzora izdvaja se rad autora Jeremić, Kilibarda, Panov, Marković, Savić "Zdravstveno stanje lica akcidentalno ozračenih visokim dozama neutronskog i gama zračenja na nultom reaktoru u Vinči, petnaest godina posle ozračenja" koji iscrpno prikazuje zdravstveno stanje petoro ozračenih u akcidentu u INN "Vinča 15 godina nakon akcidenta [6]. Kao i prethodnih godina i 1973. uočavamo najveći broj objavljenih radova iz oblasti radiotoksikologije – 14.

### **1975.**

Ovaj simpozijum obeležilo je najviše radiobioloških radova (7), 2 iz oblasti zdravstvenog nadzora i 4 iz radiotoksikologije [7].

### **1977.**

Među radovima iz radiobiologije naročito je značajan rad "Prevenција radiološke ekspozicije u trudnoći" autora Hadžibegović i saradnici, koji se bavi fetalnim radijacionim rizikom kroz detaljno praćenje zdravstvenog stanja i krajnjeg ishoda trudnoće izloženih trudnica, dok se u oblasti zdravstvenog nadzora ističe rad autora Trajković, Veljković, Barjaktarović koji prati razlike u hematološkim, citomorfološkim, citogenetičkim i imunološkim parametrima između kontrolne grupe i profesionalno izloženih lica [8].

### **1979.**

Na desetom simpozijumu objavljeno je najviše radova iz oblasti zdravstvenog nadzora – 7, od kojih se rad "Štetno dejstvo optičkog zračenja na organ vida" autora Savić i Popović, bavi delovanjem infracrvenih i UV zraka na oči prilikom profesionalne ekspozicije. Među radiobiološkim istraživanjima od 5 objavljenih radova, posebno je značajan rad autora Milojević i Radovanović koji se bavi matematičkim modelom kancerogenih oboljenja i radijacionim rizikom, rad autora Horvat i Račić koji prikazuje pojavu hromozomskih poremećaja prilikom izlaganja  $^{192}\text{Ir}$  i dva rada koja se bave biološkim delovanjem mikrotalasnog zračenja i radijacionim rizikom [9].

### **1981.**

Godine 1981. objavljeno je ukupno 15 radova, od toga 10 iz radiotoksikologije, koji pretežno razmatraju problematiku vezanu za stroncijum, polonijum i cezijum. U okviru medicinskog nadzora objavljen je jedan rad koji se bavi kapilaroskopskim nalazima profesionalno ekspanovanih lica autora Višnjić, Jeremić i Panov i jedan koji razmatra incidence kardiovaskularnih oboljenja lica zaposlenih u nuklearnim reaktorima, autora Besarabić i Aleksić [10].

### **1983.**

Sesija sa simpozijuma održanog 1983. godine je sadržala ukupno 29 radova, 3 iz oblasti zdravstvenog nadzora - od toga jedan pregledni rad vezan za zdravstvenu zaštitu i nuklearnu aktivnost (Deanović, Petrović "Kako naše zdravstvo prati izgradnju nuklearnih elektrana"), dok se devet publikacija bavi citogenetičkim promenama pod

uticajem različitih kvaliteta zračenja. Naročito su zanimljivi radovi autora Levanat, Deanović “Promjene aktivnosti nekih enzima u serumu različito ozračenih štakora” – koji povezuje biohemijske promene sa ekspozicijom i “Uticaj jonizujućih zračenja visokih doza na mikrotubularni sistem *in vitro*” autora Gal, Trajković, Radovanović, koji proučava promene u mikrotubulama deobnog vretena kao mogući uzročnik hromozomskih poremećaja. Najveći doprinos sesiji dali su radiotoksikolozi sa čak 17 objavljenih radova [11].

### 1985.

U oblasti radiobioloških istraživanja na XIII simpozijumu prezentovano je 6 radova, od toga se publikacija autora Horgaš, Spaventi “Vrijednost SCE (sister chromatid exchange) tehnike u otkrivanju oštećenja kromosoma stanica izloženih ionizacijskom zračenju *in vivo*“ bavi fenomenom izmene sestrinskih hromatida, čiji se značaj u to vreme istraživao, sa ciljem uvođenja u rutinsku praksu. U oblasti zdravstvenog nadzora objavljeno je 9 radova; rad autora Pavlović, Milačić i Jeremić “Promene spirometrijskih vrednosti kod rudara koji su radili u jednom uranskom rudniku“ se bavi vrednostima spirometrije kod profesionalno izloženih lica, a rad autora Besarabić, Radotić “Anksioznost u uslovima profesionalnog ozračivanja“ psihijatrijskim tegobama i stanjima povezanim sa profesionalnim izlaganjem. Rad “Neke karakteristike morbiditeta radnika naftne industrije Vojvodine koji rade sa izvorima jonizirajućih zračenja” autora Mihajlov, prikazuje analize zdravstvenog stanja profesionalno izloženih lica u industriji, po izvršenim pregledima. I ovaj put, sa 14 eksperimentalnih radova, najveći doprinos sesiji dali su radiotoksikolozi [12].

Na istom simpozijumu, kao nezavisna sesija, održan je okrugli sto na temu “Ujednačavanje kriterijuma za priznavanje profesionalnih oboljenja nastalih kao posledica dejstva jonizujućih zračenja”. Grupa stručnjaka koja se bavila medicinskom zaštitom profesionalno izloženih lica iz Srbije, Hrvatske, Slovenije i Makedonije pokrenula je inicijativu i, u periodu 1984.-1985. godine, održala dva sastanka sa ciljem izrade orijentacionih kriterijuma za priznavanje oboljenja nastalih pod dejstvom jonizujućih zračenja. Polazeći od savremenih naučnih i stručnih saznanja i preporuka, sopstvenih i iskustava drugih stručnjaka, razmatrali su opšte i specifične uslove za radiosenzitivna tkiva i organe: krvotvorne organe, kožu, očno sočivo, kao i stohastičke efekte – maligna oboljenja, hromozomske aberacije i perifernu cirkulaciju. Pošto je ocenjeno da se radi o izuzetno značajnom stručnom i praktičnom problemu koji zavređuje pažnju većeg auditorijuma, odlučeno je da se polazni materijali sa sastanaka obrade i prezentuju na XIII Jugoslovenskom simpozijumu o radiološkoj zaštiti.

### 1987.

Simpozijum na kome je prezentovano 30 radova iz oblasti radiobiologije, medicinskog nadzora i radiotoksikologije, od kojih je, prvi put u okviru ove sesije, 7 vezano za izlaganje nejonizujućim zračenjima, održan je 1987. u Novom Sadu [13]. Među prezentovanim radovima naročito se ističu radovi vezani za analizu zdravstvenog stanja posle černobiljske nesreće, kao i publikacija koja opisuje promene na štitnoj žlezdi pod uticajem jonizujućih zračenja i rad koji se bavi populaciono genetičkim problemom indukovanih mutacija jonizujućim zračenjem i pojavom adaptacija. Rad Kubelka, Horvat, Lakovski “Profesionalna izloženost zračenju tokom redovnog servisa nuklearne elektrane” bavi se zdravstvenim nadzorom zaposlenih u nuklearnoj elektrani tokom redovnog servisa, uzimajući u obzir i biodozimetrijsku procenu apsorbirane doze.



Među, opet vrlo brojnim, radovima iz oblasti radiotoksikologije, tri se bave radioprotektorima. U oblasti nejonizujućih zračenja rad autora Milićević, AntoniĆ, Simonović “Opšte dejstvo ultrazvuka pri terapijskoj primeni” se bavi promenama u krvnoj lozi po izlaganju nejonizujućim zračenjima, a radovi “Djelovanje mikrovalnog zračenja na genom ljudskih limfocita” i “Genetski efekti laserskog zračenja” radiobiološkim efektima nejonizujućih zračenja, pri čemu prvi obrađuje promene analizom hromozomskih aberacija i mikronukleus testom. Rad autora Šarić i Goldini se bavi promenama vida u radu sa videoterminalima.

### 1988.

Na seminaru “Mjere zaštite i zdravstveni nadzor osoba koje koriste izvore zračenja u zdravstvu” održanom u Cavtatu 1988. objavljeno je nekoliko značajnih radova iz oblasti radiobiologije i zdravstvenog nadzora, koji su poslužili kao dobar osnov i preporuka za kasnije uspostavljenu regulativu u ovoj oblasti [14]. U publikaciji autora Stojanović iz INN “Vinča” opisuju se biološki efekti zračenja. Rad autora Marković “Radijacioni akcidenti” opisuje radijacione akcidente, dajući na kraju i iscrpnu formu izveštaja o akcidentu. U radu autora Panov, Čremošnik-Pajić “Zdravstveni nadzor lica koja rade u zoni jonizujućih zračenja” daju se referentne vrednosti elemenata krvne loze, uključujući i genetički status, kontraindikacije za rad u zoni jonizujućih zračenja, kao i preporuke prilikom ocene radne sposobnosti, dok se rad “Biodozimetrijska kontrola” autora Horvat Đ., bavi značajem biodozimetrije. Radovi “Biološki efekti nejonizujućih zračenja” autora Jeremić Miodraga i “Zaštita medicinskog osoblja od mikrotalasnog zračenja” autora Đorđević Z, obrađuju dejstva nejonizujućih zračenja.

### 1989.

Objavljeno je 9 radova iz oblasti radiobiologije, od toga rad autora Marković, Joksić, Panov, prikazuje hromozomski monitoring sproveden u opštoj populaciji Srbije nakon Černobilja, a rad autorki Budislave Marković i Gordane Joksić “Mogućnosti za procenu radijacionih oštećenja analizom mikronukleusa u humanim limfocitima CB metodom” prvi put u Srbiji obrađuje praćenje citogenetičkih radijacionih oštećenja CBMN testom. Iz oblasti zdravstvenog nadzora od ukupno 4 rada, dva obrađuju biohemijske parametre, a iz radiotoksikologije je objavljeno 11 radova, od kojih je rad autora Novak, Pantelić, Panov “Koncentracija  $^{134+137}\text{Cs}$  u urinu stanovništva SR Srbije posle havarije nuklearne elektrane u Černobilju” posvećen radiotoksikološkom monitoringu opšte populacije posle černobiljskog akcidenta [15].

### 1991.

Šesnaesti simpozijum su obeležili eksperimentalni radovi iz oblasti radiobioloških efekata X zračenja (“Učestalost hromozomskih aberacija i mikronukleusa u limfocitima periferne krvi nakon frakcionisanog *in vitro* ozračivanja izvorom X-zračenja” i “Korelacija između učestalosti mikronukleusa i hromozomskih aberacija nakon akutnog ozračivanja visokim dozama X-zračenja” autorke G. Joksić),  $\text{I}^{131}$  (Kašuba i saradnici “Utjecaj joda-131 na pojavu kromosomskih aberacija u ljudskim limfocitima periferne krvi *in vitro*”), studije biomonitoringa izloženih populacija (5 radova) i radovi koji proučavaju genotoksično dejstvo mikrotalasnog zračenja [16]. Rad “Korelacija između učestalosti mikronukleusa i hromozomskih aberacija nakon akutnog ozračivanja visokim dozama X-zračenja” utvrđuje korelaciju u formiranju mikronukleusa i hromozomskih biomarkera zračenja pri opsegu doza 1 – 8 Gy.

Iz oblasti medicinskog nadzora izdvajaju se rad autora Ermacora i saradnici “Zdravstveno stanje pomoraca profesionalno izloženih mikrovalnom zračenju” koji se bavi problematikom izloženosti pomoraca nejonizujućim zračenjima, “Citološki pregledi sputuma pri rudrjih v rudniku urana Žirovski vrh” koji prati citološke promene zaposlenih u rudniku Žirovski vrh (ekspozicija uranu), rad autora Mihajlov A. koji prati efekte izlaganja videoterminalima, rad grupe autora Milačić i saradnici koji prezentuje izloženost radnika nuklearne medicine i rad koji se bavi problemima sa vidom usled ekspozicije jonizujućim zračenjima.

### **1993.**

Objavljeno je 10 radova, od toga 6 iz radiobiologije, 3 iz zdravstvenog nadzora i 1 iz radiotoksikologije. Rad autora S. Babić obrađuje rezultate psiholoških testova profesionalno izloženih lica [17].

### **1995.**

Od ukupno 15 radova prezentovanih na osamnaestom simpozijumu, 11 je iz oblasti radiobiologije, a od toga se 4 bave problematikom oksidativnog stresa i njegovim uticajem na krajnje efekte ekspozicije [18].

### **1996.**

Na simpozijumu posvećenom deceniji černobiljskog akcidenta objavljeno je 6 radova koji se bave praćenjem zdravstvenog stanja u periodu posle akcidenta [19].

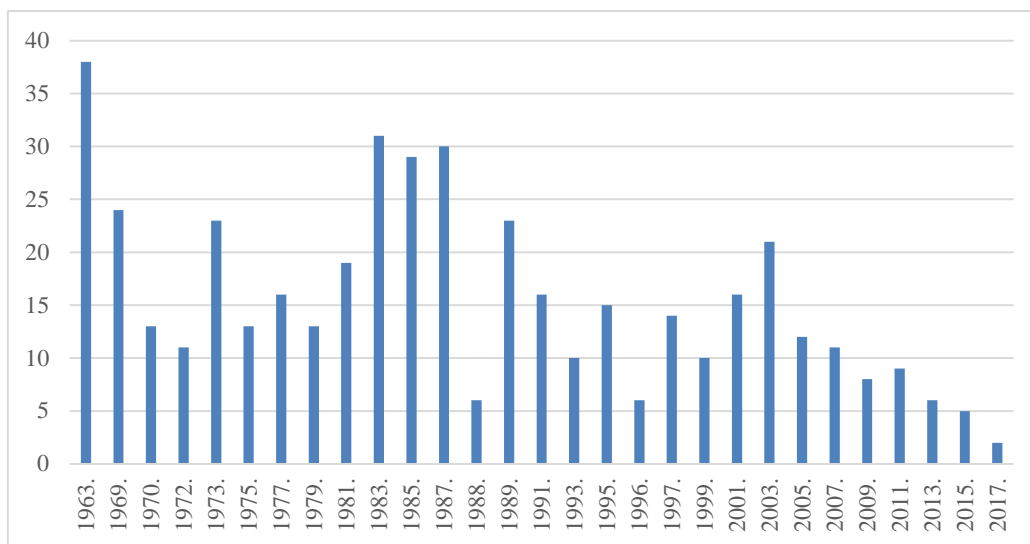
### **1997-2017.**

U periodu od 1997. uočava se trend porasta broja radova iz radiobiologije i medicinskog nadzora uz istovremeno manji broj radova iz radiotoksikologije. Tako je, od 1997–2017, objavljeno ukupno 74 radiobiološka rada (najviše 2003. godine – 16), 34 iz oblasti zdravstvene zaštite i 5 iz radiotoksikologije [20-30]. Među objavljenim radovima od značaja su oni koji su pratili zdravstveno stanje izložene populacije po završetku NATO bombardovanja [22, 23], kao i istraživački radovi koji su se bavili incidencom mikronukleusa i apoptotskim potencijalom limfocita [23], referentnim vrednostima mikronukleus testa u opštoj populaciji Srbije [29], korelacijom mikronukleusa i oksidativnih metabolita u profesionalno izloženoj populaciji [29], kao i rad koji objavljuje rezultate istraživanja inter-individualne varijabilnosti u odgovoru na dejstvo jonizujućih zračenja [30].

Pregled svih objavljenih radova dat je tabelarno i grafički. Tabela 1 i grafikon 1 prikazuju ukupan broj radova objavljenih u sesiji “Biološki efekti jonizujućih zračenja” u periodu od 1963. do danas, dok tabela 2 i grafikon 2 prikazuju odnos broja objavljenih radova iz radiobiologije, zdravstvenog nadzora i radiotoksikologije, po godinama.

**Tabela 1. Ukupan broj radova objavljenih u sesiji “Биолошки ефекти јонизујућих зрачења” na prethodnih 29 simpozijuma.**

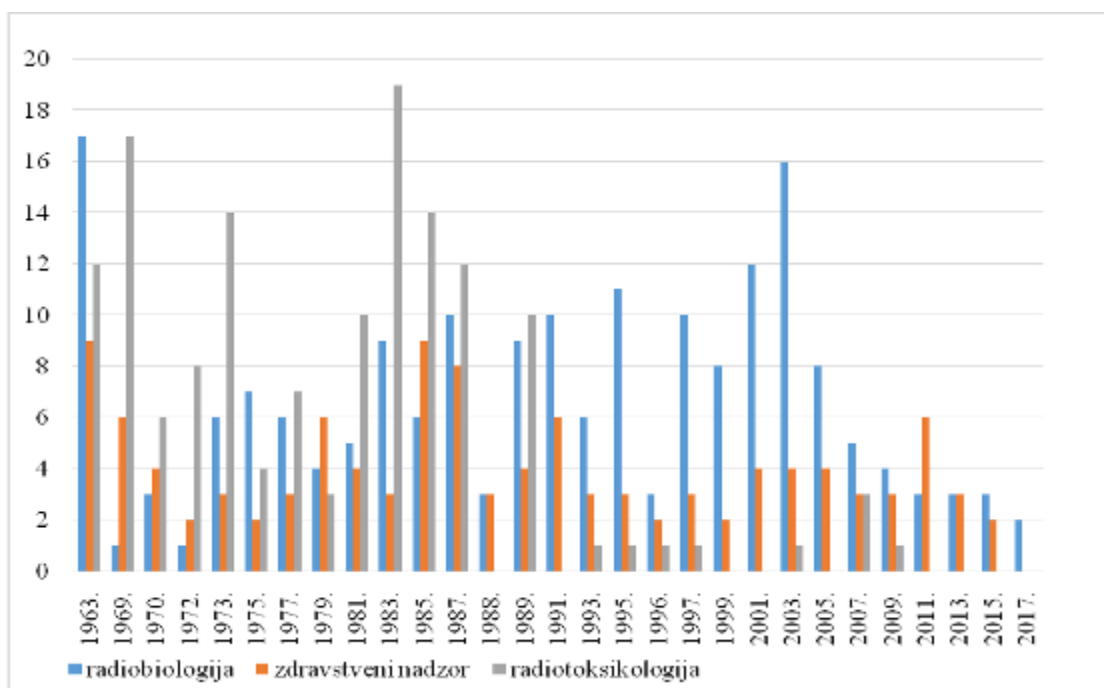
Godina	Broj radova	Godina	Broj radova
1963.	38	1991.	16
1969.	24	1993.	10
1970.	13	1995.	15
1972.	11	1996.	6
1973.	23	1997.	14
1975.	13	1999.	10
1977.	16	2001.	16
1979.	13	2003.	21
1981.	19	2005.	12
1983.	31	2007.	11
1985.	29	2009.	8
1987.	30	2011.	9
1988.	6	2013.	6
1989.	23	2015.	5
		2017.	2



**Slika 1. Ukupan broj radova objavljenih u sesiji “Биолошки ефекти јонизујућих зрачења” za period od 1963-2017. godine.**

**Tabela 2. Odnos broja objavljenih radova iz radiobiologije (RB), zdravstvenog nadzora (ZN) i radiotoksikologije (RTx), po godinama.**

Godina	RB	ZN	RTx	Godina	RB	ZN	RTx
1963.	17	9	12	1991.	10	6	0
1969.	1	6	17	1993.	6	3	1
1970.	3	4	6	1995.	11	3	1
1972.	1	2	8	1996.	3	2	1
1973.	6	3	14	1997.	10	3	1
1975.	7	2	4	1999.	8	2	0
1977.	6	3	7	2001.	12	4	0
1979.	4	6	3	2003.	16	4	1
1981.	5	4	10	2005.	8	4	0
1983.	9	3	19	2007.	5	3	3
1985.	6	9	14	2009.	4	3	1
1987.	10	8	12	2011.	3	6	0
1988.	3	3	0	2013.	3	3	0
1989.	9	4	10	2015.	3	2	0
				2017.	2	0	0



**Slika 2. Odnos broja objavljenih radova iz radiobiologije, zdravstvenog nadzora i radiotoksikologije, po godinama.**

### 3. Zaključak

Oblast koja se bavi biološkim efektima jonizujućih zračenja po idejama i istraživačkom potencijalu, dala je izuzetan doprinos radiološkoj zaštiti na ovim prostorima. Istraživači su u ovoj oblasti naročito bili suočeni sa izazovima, a s obzirom na činjenicu da su osnovna znanja i metodološke pristupe koristili iz drugih naučnih oblasti. Šezdesetih godina veliki deo eksperimentalnih istraživanja posvećen je uvođenju tek uspostavljene citogenetičke metodologije u cilju praćenja delovanja zračenja na genetički materijal. Sedamdesetih godina pažnja se posvećuje akutnoj i parcijalnoj ekspoziciji, praćenju zdravstvenog stanja i fetalnom radijacionom riziku. Ne zaboravlja se akcident u Vinči 1958. Brojna istraživanja posvećena praćenju zdravstvenog stanja akcidentalno ozračenih lica za rezultat su imala i publikovanje radova iz oblasti kontaminacije, dekontaminacije i uspostavljanja procedura za slučaj nuklearnog akcidenta. Pored donošenja kriterijuma za ocenu radne sposobnosti zaposlenih profesionalno izloženih zdravstvenih radnika, prve dve decenije posvećene su i praćenju zdravstvenih efekata ekspozicije radonu u uranskim i neuranskim rudnicima. Zajedno sa kliničkim, rađena su i eksperimentalna radiotoksikološka i radiobiološka istraživanja na laboratorijskim životinjama, radi potvrde kliničkih rezultata i identifikovanja radiosenzitivnih tkiva i organa i promena koje se na njima javljaju usled ekspozicije. Osamdesetih se uspostavljaju referentne vrednosti od značaja za praćenje zdravstvenog stanja u profesionalnoj ekspoziciji i utvrđivanje profesionalnih oboljenja (uključujući i novu delatnost u SFRJ – nuklearnu aktivnost), prati se interna kontaminacija, zdravstveno stanje posle černobiljskog akcidenta. Iako su devedesete bile krizne za nauku, istraživači su nastavili sa dobrom praksom. Obeležava se decenija černobiljske nesreće, implementiraju se novine u rutinskoj praksi zdravstvene zaštite. Poslednje dve decenije revidiraju se prethodno uspostavljene referentne vrednosti i ide se korak dalje, ka personalizovanom pristupu u radiološkoj zdravstvenoj zaštiti.

U prve tri decenije dominantna radiotoksikološka istraživanja, zamenio je veći broj publikacija iz oblasti radiobiologije i zdravstvenog nadzora u kasnijem periodu, uz istovremeno povećanje broja biomonitoring studija u odnosu na eksperimentalne radove. Imajući u vidu sve izazove sa kojima su bili suočeni naši prethodnici i one sa kojima se suočavamo danas, s pravom se možemo pohvaliti da smo bili i da jesmo deo svetske istraživačke elite.

### 4. Zahvalnica

Zahvaljujemo se svim izuzetnim naučnicima, istraživačima, entuzijastima, stručnjacima koji su nas naučili kako se srcem, znanjem i pameću uspostavljaju temelji dobre prakse i kako se istraživački duh održava u teškim vremenima. Čitajući njihove publikacije shvatamo kolika je sreća i zadovoljstvo učiti od najboljih.

### 5. Literatura

- [1] *Kratki sadržaji saopćenja I jugoslovenski simpozijum o radiološkoj zaštiti*, 8-12. oktobar 1963. Portorož, 1963.
- [2] P.S. Moorhead, P.C. Nowell, W.J. Mellman, D.M. Battips, D.A. Hungerford, Chromosome preparations of leukocytes cultured from human peripheral blood, *Exp. Cell Res.* 20, 1960, 613–616.

- [3] *Zbornik radova IV jugoslovenskog simpozijuma o radiološkoj zaštiti*, 28.-30. maj 1969. Baško Polje, 1969.
- [4] *Radovi V jugoslovenskog simpozijuma o radiološkoj zaštiti*, 6.-9. oktobar 1970. Bled, 1970.
- [5] *Radovi VI jugoslovenskog simpozijuma – zaštita od jonizujućih zračenja*, 25.-28. april 1972. Ohrid, 1972.
- [6] *Radovi VII jugoslovenskog simpozijuma zaštita od zračenja*, 22.-26. oktobar 1973. Kaštel Stari, 1973.
- [7] *Zbornik radova VIII simpozijuma Jugoslovenskog društva za zaštitu od zračenja*, 20.-23. maj 1975. Herceg Novi, 1975.
- [8] *Zbornik radova IX simpozijuma Jugoslovenskog društva za zaštitu od zračenja*, 31. maj-3. jun 1977. Jajce, 1977.
- [9] *Zbornik radova X simpozijuma Jugoslovenskog društva za zaštitu od zračenja*, 29. maj-1. jun 1979. Arandelovac, 1979.
- [10] *Zbornik del XI jugoslovenskega simpozija o zaštiti pred sevanji*, 21.-24. april 1981. Portorož, 1981.
- [11] *Zbornik na trudovi XII jugoslovenski simpozium za zaštita od zračenje*, 31. maj -3. jun 1983. Ohrid, 1983.
- [12] *Zbornik radova XIII jugoslavenski simpozij zaštite od zračenja*, 10.-13. jun 1985. Pula, 1985.
- [13] *Zbornik radova XIV jugoslovenski simpozijum za zaštitu od zračenja*, 08.-10. jun 1987. Novi Sad, 1987.
- [14] *Mjere zaštite i zdravstveni nadzor osoba koje koriste izvore zračenja u zdravstvu*, 13.-15. oktobar 1988. Cavtat, 1988.
- [15] *Zbornik radova XV jugoslovenski simpozijum za zaštitu od zračenja*, 06.-09. jun 1989. Priština, 1989.
- [16] *Zbornik radova XVI jugoslovenski simpozijum za zaštitu od zračenja*, 28.-31. maj 1991. Neum, 1991.
- [17] *Savremeni problemi u zaštiti od zračenja, Zbornik radova XVII jugoslovenski simpozijum za zaštitu od zračenja*, 25.-28. maj 1993. Vinča, 1993.
- [18] *Zbornik radova XVIII jugoslovenskog simpozijuma za zaštitu od zračenja*, 24.-26. maj 1995. Bečići, 1995.
- [19] *Zbornik radova Savetovanja „Černobilj, 10 godina posle“*, 04.-07. jun 1996. Budva, 1996.
- [20] *Zbornik radova XIX jugoslovenskog simpozijuma za zaštitu od zračenja*, 18.-20. jun 1997. Golubac, 1997.
- [21] *Zbornik radova XX simpozijum JDZZ*, 03.-05. novembar 1999. Tara, 1999.
- [22] *Zbornik radova XXI simpozijum JDZZ*, 10.-12. oktobar 2001. Kladovo, 2001.
- [23] *Zbornik radova XXII simpozijum JDZZ*, 29. septembar - 01. oktobar 2003.

Petrovac, 2003.

- [24] *Zbornik radova XXIII simpozijum DZZSCG*, 26.-28. septembar 2005. Donji Milanovac, 2005.
- [25] *Zbornik radova XXIV simpozijum DZZSCG*, 03.-05. oktobar 2007. Zlatibor, 2007.
- [26] *Zbornik radova XXV simpozijum DZZSCG*, 30. septembar - 02. oktobar 2009. Kopaonik, 2009.
- [27] *Zbornik radova XXVI simpozijum DZZSCG*, 12-14. Oktobar 2011. Tara, 2011.
- [28] *Zbornik radova XXVII simpozijum DZZ SCG*, 02.-04. oktobar 2013. Vrnjačka Banja, 2013.
- [29] *Zbornik radova XXVIII simpozijum DZZSCG*, 30. septembar - 02. oktobar 2015. Vršac, 2015.
- [30] *Zbornik radova XIX simpozijum DZZSCG*, 27.-29. septembar 2017. Srebrno jezero, 2017.

### **BIOLOGICAL EFFECTS OF IONIZING RADIATION, RADIOTOXICOLOGY-REVIEW**

**Jelena PAJIĆ and Sladana VUKOVIĆ**

*Serbian Institute of Occupational Health „Dr Dragomir Karajović“, Belgrade, Serbia,  
[jelena.pajic@institutkarajovic.rs](mailto:jelena.pajic@institutkarajovic.rs), [sladjana.vukovic@institutkarajovic.rs](mailto:sladjana.vukovic@institutkarajovic.rs)*

#### **ABSTRACT**

Radiation protection research dedicated to biological effects of ionizing radiation gain particular importance since the very beginning (1963.) and remained in focus until nowadays. Although research topics were challenging in the early years, creative researchers published numerous interesting papers. This session comprised of three related topics – medical surveillance, radiotoxicology and radiobiology research on humans, animals and plants. In proceedings from the first decade the most of the papers were related to radiotoxicology, since genetics and radiobiology research was still in early phase. It can be noticed that in later years more medical and radiobiology papers were published in comparison to radiotoxicology.



## PET DECENIJA RADIJACIONE CITOGENETIKE U SRBIJI

**Jelena PAJIĆ<sup>1</sup>, Boban RAKIĆ<sup>1</sup> i Aleksandar MILOVANOVIĆ<sup>1,2</sup>**

1) Institut za medicinu rada Srbije „Dr Dragomir Karajović“, Beograd, Srbija,  
[boban.rakic@institutkarajovic.rs](mailto:boban.rakic@institutkarajovic.rs), [jelena.pajic@institutkarajovic.rs](mailto:jelena.pajic@institutkarajovic.rs)

2) Univerzitet u Beogradu, Medicinski fakultet, Beograd, Srbija,  
[milalex@eunet.rs](mailto:milalex@eunet.rs)

### SADRŽAJ

*Humana genetika i radijaciona citogenetika su nastale i razvijale se paralelno. Humana genetika počinje publikovanjem otkrića broja humanih hromozoma (1956). Ubrzo su opisane i hromozomske promene nastale delovanjem zračenja. Radijaciona citogenetika u Srbiji datira upravo iz tog perioda. Krajem 1962. u Institutu za medicinu rada (tada Centar za profesionalne bolesti), zahvaljujući viziji prof. Dragomira Karajovića, osnovana je Laboratorija za radijacionu citogenetiku. Tokom višedecenijskog rada, u Laboratoriji je pregledano preko 50.000 lica profesionalno izloženih jonizujućim zračenjima. Paralelno su sprovedena istraživanja sa ciljem uspostavljanja i periodičnog preispitivanja referentnih vrednosti za opštu i profesionalno izloženu populaciju, ali i proučavanja novih genetičkih markera za primenu u rutinskoj praksi radiološke zdravstvene zaštite. Od 2012, Laboratorija je akreditovana za in vitro citogenetička bio-dozimetrijska ispitivanja humane krvi kao jedina medicinska laboratorija u Srbiji i jedna od tri akreditovane laboratorije u Evropi i pokazala da, nastavljajući dobru laboratorijsku praksu, sada na novom nivou obezbeđuje poverenje u kvalitet rezultata ispitivanja.*

### 1. Uvod

Humana citogenetika i radijaciona citogenetika su naučne discipline koje su nastale i razvijale se paralelno. Velika otkrića, uglavnom iz oblasti kliničke genetike, koriste se u genotoksikologiji. Smatra se da je humana genetika nastala 1956, kada je prvi put publikovano otkriće diploidnog broja humanog hromozomskog komplementa [1]. Tri godine kasnije, opisane su citogenetičke anomalije u osnovi Daunovog, Klinefelterovog i Tarnerovog sindroma, a odmah potom (1960.) i hromozomske promene povezane sa delovanjem zračenja na humani genom.

Iste 1960. godine Moorched i Novel objavljuju protokol izolovanja humanih hromozoma iz limfocita periferne krvi [2]. Radijaciona citogenetika u Srbiji datira upravo iz tog perioda. Krajem 1962. godine, zahvaljujući viziji prof. Dragomira Karajovića, u sklopu Zavoda za radiološku zdravstvenu zaštitu osnovana je eksperimentalna laboratorija (2 biologa, 1 laborant, 1 doktor veterinarske medicine) u kojoj je prva uvedena metoda bila ispitivanje rezistencije leukocita kod pacova ozračenih niskim dozama X zraka, sa ciljem da se napravi eksperimentalni model profesionalne ekspozicije zračenju.

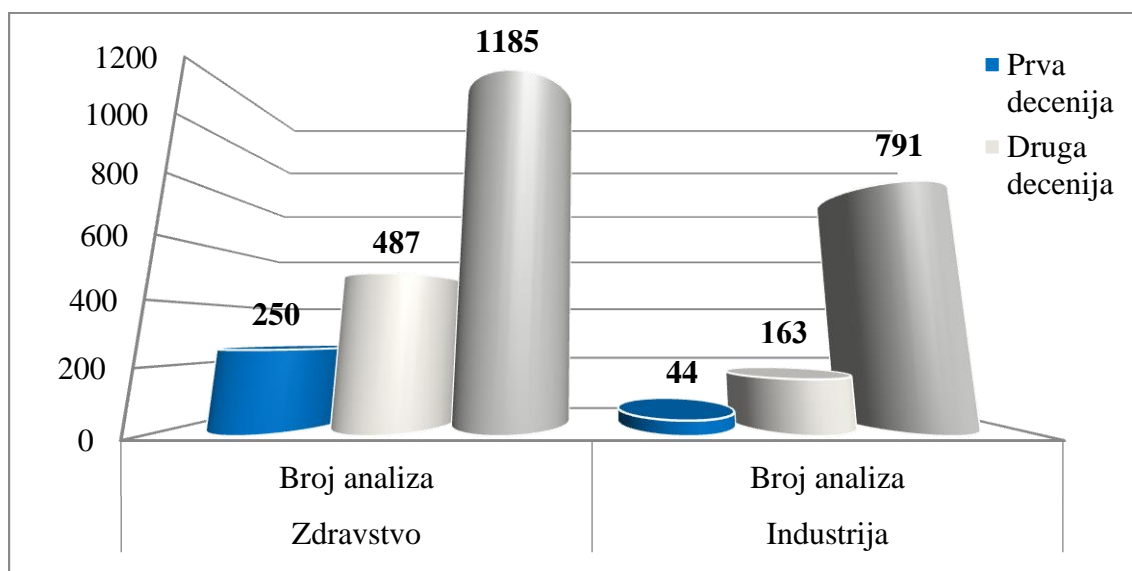
Sredinom 60-tih godina u svetu se uvodi biološka dozimetrija, zasnovana na analizi strukturnih hromozomskih aberacija-dicentričnih hromozoma, a 1963. prof. Miloš Kilibarda i Budislava Marković, biolog, uvode kod nas metodu izolovanja humanih hromozoma iz periferne krvi, prema Moorched-u sa ciljem da je primene u proceni profesionalne ekspozicije. U sledećoj deceniji u svetu su usledila poboljšavanja metoda do momenta kada dicentrik test postaje rutinska komponenta programa radiološke zaštite zemalja članica Međunarodne agencije za atomsku energiju (MAAE).

Nadalje se analiza hromozomskih aberacija usavršavala, pri čemu su istraživanja jonizujućeg zračenja finansirana preko projekata koje je raspisivala Zajednica za naučno istraživački rad Republike Srbije.

Rezultate ovih istraživanja je svake godine ocenjivala odgovarajuća Komisija za naučno-istraživački rad Medicinskog fakulteta, a 1973. godine, posle odbranjenog magistarskog rada Budislave Marković iz ove oblasti [3], stekli su se uslovi da uvedenu metodu Zavod za socijalno osiguranje prihvati kao najpouzdaniji test koji će lekaru specijalisti medicine rada služiti za procenu radne sposobnosti lica koja profesionalno rade u zoni jonizujućeg zračenja.

### 2. Pregled rezultata citogenetičkih analiza

U prvoj deceniji u laboratoriji Zavoda za radiološku zdravstvenu zaštitu urađene su 294 analize, u drugoj 650, a u trećoj 1976 analiza. Od pomenutog broja analiza u prvoj deceniji urađeno je 250 za zaposlene u zdravstvu i 44 za osobe eksponovane izvorima jonizujućih zračenja (JZ) u industriji. U narednim decenijama se povećavao i broj analiza i procentualna zastupljenost zaposlenih u industriji u ukupnom uzorku ispitivanih osoba, te već u drugoj deceniji od ukupno 650 analiza, 487 je urađeno za zdravstvo, a 163 za industriju, dok je u trećoj 1185 za zdravstvo, a 791 za industriju. Grafikon 1 prikazuje broj urađenih citogenetičkih analiza u periodu od 1962-1992. razvrstanih prema delatnostima (zdravstvo i industrija).



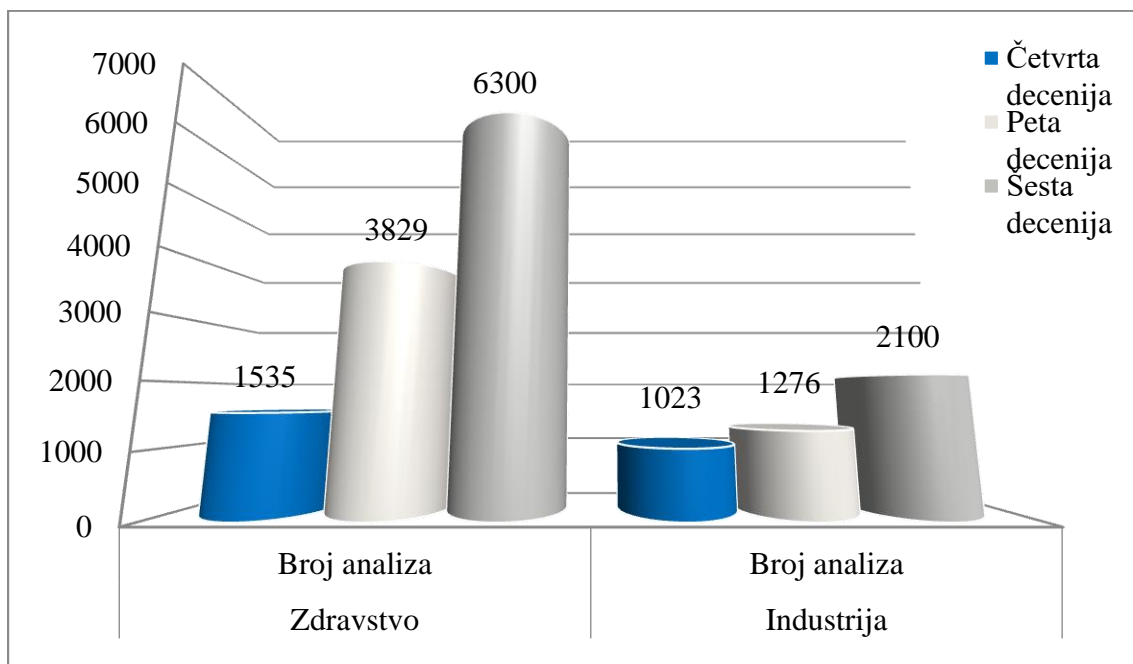
**Grafikon 1. Broj urađenih citogenetičkih analiza u periodu od 1962-1992. razvrstanih prema delatnostima (zdravstvo i industrija).**

Na polovini treće decenije rada laboratorije, 1985. godine, Michael Fenech je objavio prvi protokol za metodu Cytochalasine Block MicroNucleus Test [4]. Metoda je naučnoj zajednici bila poznata i ranije, ali tek uvođenjem citohalazin blok tehnike, metoda se standardizuje za širu upotrebu u genotoksikologiji. Tri godine kasnije, drugi biolog Laboratorije, mr Gordana Joksić, odlazi na usavršavanje u Centar za genotoksikologiju i hemijsku mutagenezu, pri Medicinskom fakultetu u Lajdenu (Holandija) (jedan od najvećih centara za genotoksikologiju i humanu genetiku u svetu), što je rezultiralo uvođenjem nove metode – CBMN test u rutinsku praksu Laboratorije. Ubrzo nakon toga, 1990. godine na Biološkom fakultetu Univerziteta u Beogradu odbranjena je doktorska disertacija Mr Gordane Joksić, pod nazivom “Komparativna studija incidence hromozomskih aberacija i mikronukleusa u humanim limfocitima u slučaju interne kontaminacije tricijumom” [5].

Po odlasku dr Joksić, u Laboratoriju se zapošljava doc Dubravka Jovičić, doktor bioloških nauka.

Broj analiza se u naredne 3 decenije povećavao, pa tako u četvrtoj, ukupan broj iznosi 2558, u petoj 5105 a u šestoj (do ovog trenutka) 8400.

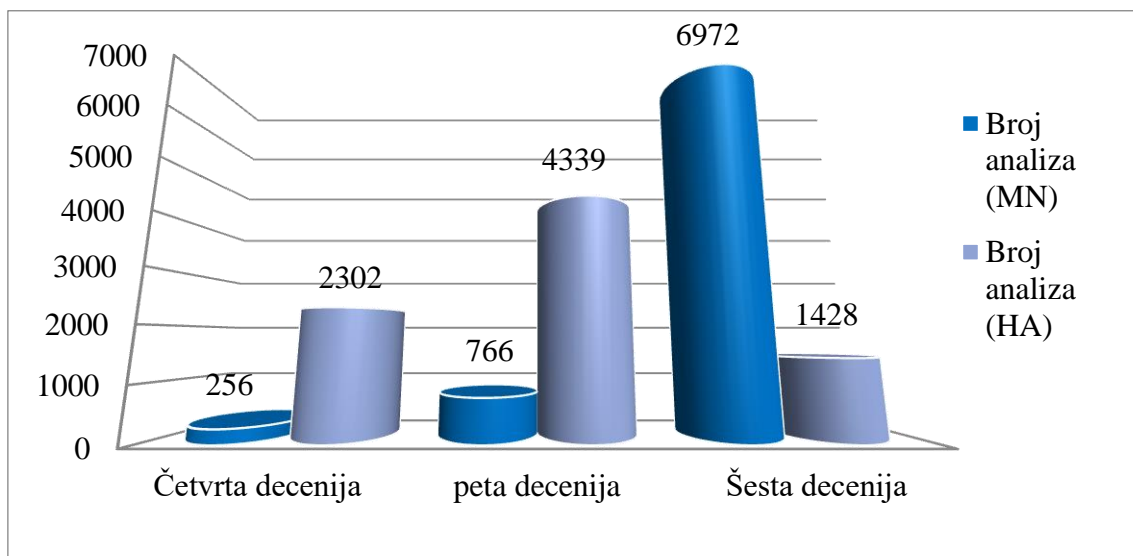
Od pomenutog broja analiza u četvrtoj deceniji urađeno je 1535 za zaposlene u zdravstvu i 1023 za osobe eksponovane izvorima JZ u industriji. U petoj deceniji je urađeno 3829 analiza za zdravstvo, 1276 za industriju, dok je u šestoj 6300 za zdravstvo, a 2100 za industriju. Grafikon 2 prikazuje broj urađenih citogenetičkih analiza u periodu od 1992. do danas, razvrstanih prema delatnostima (zdravstvo i industrija).



**Grafikon 2. Broj urađenih citogenetičkih analiza u periodu od 1992-2017. razvrstanih prema delatnostima (zdravstvo i industrija).**

Istovremeno se pored analize hromozomskih aberacija uvodio i mikronukleus test (MN). Značaj mikronukleus testa u rutinskoj praksi je iz decenije u deceniju rastao, što se uočava povećanjem broja analiza (od 256 u četvrtoj, preko 766 u petoj, da bi u šestoj

deceniji, promena regulative u oblasti zaštite od zračenja dala primat mikronukleus testu u biomonitoringu eksponovanih populacija i broj analiza se povećao kako u odnosu na prethodne decenije, tako i u odnosu na broj urađenih analiza hromozomskih aberacija u ovoj deceniji). Grafikon 3 prikazuje broj analiza od 1992-2017, razdvojenih prema vrsti citogenetičkog testa.



**Grafikon 3. Broj urađenih citogenetičkih analiza u periodu od 1992-2017. razdvojenih prema vrsti testa.**

U periodu od 2001-2011. godine uspostavljeni su i validovani kriterijumi analize MN HUMN projektom [6], dok je 2004. publikovan novi ISO standard za dicentrik test [7]. Godine 2007. Fenech objavljuje novi protokol za mikronukleus test, koji je fokusiran na citološke parametre, koji se prate paralelno sa genetičkim parametrima u ovom testu, čime ovaj test postaje Cytokinesis Block MicroNucleus (CBMN) Cytome test [8].

Konačno, 2011. godine izlazi nova publikacija MAAE i Svetske zdravstvene organizacije (SZO), koja objedinjuje i dopunjava sve pomenute referentne dokumente [9]. Saglasno svim novitetima, u okviru preventivnih lekarskih pregleda zaposlenih u zoni jonizujućih zračenja i biomonitoring studija opšte populacije Srbije, Laboratorija prikuplja i obrađuje podatke za uspostavljanje referentnih vrednosti hromozomskih aberacija-biomarkera delovanja zračenja i mikronukleusa za obe kategorije: pripadnike opšte populacije i profesionalno izložena lica.

Za opštu populaciju, za dicentrik test, nađen je prosečan broj od 1 dicentrika na 1000 metafaznih ćelija, a za CBMN test, referentne vrednosti su 0-15 MN/1000 BN ćelija, dok je prosečan broj MN 8,31 MN/1000 BN ćelija.

Za profesionalno izložena lica, referentne vrednosti CBMN testa su 0-25 MN/1000 BN ćelija, dok je prosečan broj MN je 15,15 MN/1000 BN ćelija. Time je pokazano da su svi rezultati u korelaciji sa svetskim.

### 3. Zaključak i diskusija

Tokom višedecenijskog rada, u Laboratoriji je pregledano preko 50.000 lica profesionalno izloženih jonizujućim zračenjima. Prateći trendove u oblasti

genotoksikologije, zaposleni su kontinuirano sprovodili istraživanja koja su za cilj imala kako uspostavljanje i periodično preispitivanje referentnih vrednosti za opštu i profesionalno izloženu populaciju, tako i uočavanje novih fenomena i promena genetičkog materijala koji bi našli primenu u rutinskoj praksi radiološke zdravstvene zaštite.

Od 2012. godine, Laboratorija za biodozimetriju i citogenetiku akreditovana je za *in vitro* citogenetička i biodozimetrijska ispitivanja humane krvi kao prva i jedina medicinska laboratorija u Srbiji i jedna od tri u Evropi i time pokazala da, nastavljajući dobru laboratorijsku praksu, sada na novom nivou obezbeđuje poverenje u kvalitet rezultata ispitivanja [21, 22]. Rezultati ovih opsežnih istraživanja su prezentovani kroz doktorske disertacije [5, 12], magistarske [3], specijalističke [10, 11] i radove publikovane u međunarodnim časopisima [12-22].

#### 4. Zahvalnica

Od srca se zahvaljujemo našim učiteljima – izuzetnim ljudima i istraživačima, koji su bili hrabri da započnu novo i mudri da održe uspostavljeno kada je bilo najteže; koji nikad nisu odustali od kvaliteta; od kojih smo imali čast i zadovoljstvo da naučimo sve što sada znamo.

#### 5. Literatura

- [1] J.H. Tjio, A. Levan, The chromosome number of man. *Hereditas* 42, 1956, 1–6.
- [2] P.S. Moorhead, P.C. Nowell, W.J. Mellman, D.M. Battips, D.A. Hungerford, Chromosome preparations of leukocytes cultured from human peripheral blood, *Exp. Cell Res.* 20, 1960, 613–616.
- [3] B. Kujović - Marković. Hromozomske aberacije kod lica profesionalno izloženih jonizujućim zračenjima. Magistarski rad, Farmaceutsko-biokemijski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Beograd, 1973.
- [4] M. Fenech, A.A. Morley. Measurement of micronuclei in lymphocytes, *Mutat. Res.* 147, 1985, 29–36.
- [5] G. Joksić. Komparativna studija incidence hromozomskih aberacija i mikronukleusa u humanim limfocitima u slučaju interne kontaminacije tricijumom. Doktorska disertacija, Biološki fakultet Univerziteta u Beogradu Beograd, 1985.
- [6] M. Fenech, W. P. Chang, M. Kirsch-Volders, et al. HUMN project: detailed description of the scoring criteria for the cytokinesis-block micronucleus assay using isolated human lymphocyte cultures. *Mutat Res* 534, 2003, 65–75.
- [7] SRPS ISO 19238:2011 Radiation protection — Performance criteria for service laboratories performing biological dosimetry by cytogenetics.
- [8] M. Fenech. Cytokinesis-block micronucleus cytome assay. Protocol. *NatProtoc* 2, 2007, 1084–104.
- [9] Cytogenetic Dosimetry Applications in Preparedness for and Response to Radiation Emergencies. IAEA-WHO -EPR, Vienna, 2011.
- [10] B. Rakić. Učestalost mikronukleusa u limfocitima periferne krvi opšte i populacije

profesionalno izložene jonizujućim zračenjima na teritoriji Srbije. Specijalistički rad. Biološki fakultet Univerziteta u Beogradu, 2013.

- [11] J. Pajić. Evaluacija citogenetičkih oštećenja kod osoba profesionalno izloženih hemijskim genotoksičnim agensima. Specijalistički rad. Biološki fakultet Univerziteta u Beogradu, 2013.
- [12] J. Pajić. Markeri genotoksičnosti u humanim limfocitima periferne krvi kao pokazatelji inter-individualne varijabilnosti u odgovoru na delovanje jonizujućeg zračenja. Doktorska disertacija. Medicinski fakultet Univerziteta u Beogradu, 2017.
- [13] J. Pajić, B. Rakić, O. Marinković, D. Jovičić, V. Prokić. Occupational exposure in nuclear medicine, *J. Occup. Environ. Hyg.* Vol. 8, No. 10, 2011, D101-D106.
- [14] E.A. Ainsbury...J. Pajić...K. Rothkamm. Review of retrospective dosimetry techniques for external ionizing radiation exposures. *Radiat. Prot. Dosim.* Vol. 147 No. 4, 2011, 573-592.
- [15] J. Pajić, B. Rakić, D. Jovičić, A. Milovanović. Construction of dose response calibration curves for dicentric and micronuclei for X radiation in a Serbian population. *Mutat. Res-Gen. Tox. En.* Vol. 773, 2014, 23-28.
- [16] J. Pajić, B. Rakić, B. Rovčanin, D. Jovičić, I. Novaković, A. Milovanovic, v. Pajic. Inter-individual variability in the response of human peripheral blood lymphocytes to ionizing radiation: comparison of the dicentric and micronucleus assays. *Radiat. Environ. Bioph.* Vol. 54, No. 3, 2015, 317-325.
- [17] J. Pajić, B. Rakić, D. Jovičić, A. Milovanović. A cytogenetic study of hospital workers occupationally exposed to radionuclides in Serbia: premature centromere division as novel biomarker of exposure? *Int. Arch. Occ. Env. Hea.* Vol. 89, No. 3, 2016, 477-484.
- [18] J. Pajić, D. Jovičić, A. Milovanović. Micronuclei as a marker for medical screening of subjects continuously occupationally exposed to low doses of ionizing radiation. *Biomarkers* Vol. 22, No. 5, 2017, 439-445.
- [19] J. Pajić, D. Jovičić, A. Milovanović. Cytogenetic surveillance of persons occupationally exposed to genotoxic chemicals. *Arch. Environ. Occup. H.* 2017, DOI: 10.1080/19338244.2017.1359144
- [20] J. Pajić, B. Rovčanin, D. Kekić, D. Jovičić, A. Milovanović. The influence of redox status on inter-individual variability in the response of human peripheral blood lymphocytes to ionizing radiation. *Int. J. Radiat. Biol.* Vol. 94, No. 6, 2018, 569-575.
- [21] U. Oestreicher ... J. Pajić...A. Wojcik. RENEB intercomparisons applying the conventional Dicentric Chromosome Assay (DCA). *Int. J. Radiat. Biol.* Vol. 93, No. 1, 2017, 20-29.
- [22] J. Depuydt... J. Pajić...A. Vral. RENEB intercomparison exercises analyzing micronuclei (Cytokinesis-block Micronucleus Assay). *Int. J. Radiat. Biol.* Vol. 93, No. 1, 2017, 36-47.



## FIVE DECADES OF RADIATION CYTOGENETICS IN SERBIA

**Jelena PAJIĆ<sup>1</sup>, Boban RAKIĆ and Aleksandar MILOVANOVIĆ<sup>1,2</sup>**

1) *Serbian Institute of Occupational Health „Dr Dragomir Karajović“, Belgrade, Serbia, [jelena.pajic@institutkarajovic.rs](mailto:jelena.pajic@institutkarajovic.rs); [boban.rakic@institutkarajovic.rs](mailto:boban.rakic@institutkarajovic.rs)*

2) *Belgrade University, School of medicine, Belgrade, Serbia, [milalex@eunet.rs](mailto:milalex@eunet.rs)*

### ABSTRACT

A parallelism exists between human cytogenetics and cytogenetic toxicology. The breakthroughs, mostly coming from and used in clinical genetics, are widely used in genetic toxicology. The birth of human cytogenetics occurred in 1956 when it was published that the diploid number of chromosomes in humans is 46. Chromosomal changes due to radiation were described shortly after this discover. Radiation cytogenetics in Serbia originates from that period. At the end of 1962, at the Serbian institute of Occupational Health, by the vision of prof. Dragomir Karajović, a Laboratory for Radiation Cytogenetics was established. During the several decades of work, the Laboratory has examined over 50,000 persons professionally exposed to ionizing radiation. Parallel studies were carried out with the aim of establishing and periodically reviewing the reference values for the general and professionally exposed population, as well as studying new genetic markers for use in routine practice of radiological health care. Since 2012, the Laboratory has been accredited for in vitro cytogenetic biodosimetric tests of human blood as the only medical laboratory in Serbia and one of three accredited laboratories in Europe and has shown that, continuing good laboratory practice, it now ensures confidence in the quality of test results at a new level.



## PROCENA PROFESIONALNE EKSPOZICIJE U RAZLIČITIM OBLASTIMA PRIMENE JONIZUJUĆIH ZRAČENJA U MEDICINI

**Sladana VUKOVIĆ, Milenko ĐUKIĆ, Jelena PAJIĆ,  
Boban RAKIĆ i Vedrana PROKIĆ**

*Institut za medicinu rada Srbije "Dr Dragomir Karajović", Beograd, Srbija,  
sladjana.vukovicimrs@gmail.com, djukicmilenko@gmail.com,  
jelena.pajic@institutkarajovic.rs, boban.rakic@institutkarajovic.rs,  
vedrana.prokic@institutkarajovic.rs*

### SADRŽAJ

*Procenjuje se da je ukupno 22,8 miliona radnika izloženo jonizujućim zračenjima, a procentualno najveći broj su radnici zaposleni u zdravstvu (75%). Najveći izvor profesionalne izloženosti u medicini su fluoroskopske procedure, uključujući interventne procedure. Cilj rada je da utvrdi da li postoje značajne razlike u intenzitetu ekspozicije pri različitoj medicinskoj primeni generatora jonizujućih zračenja. Studijom preseka obuhvaćen je 131 ispitanik muškog pola. Ispitanici su svrstani u četiri grupe: 33 interventna kardiologa, 31 viši radiološki tehničar na radioterapiji, 36 radioloških tehničara na radiodijagnostici i 31 ispitanik kontrolne grupe. Ispitanici su radili prosečno u zoni jonizujućih zračenja  $14,6 \pm 8,2$  godine (u intervalu 5-32). Procena profesionalne ekspozicije jonizujućim zračenjima kod ispitanika obavljena je na osnovu rezultata lične dozimetrijske kontrole i rezultata citogenetičkih analiza (mikronukleus testa i analize nestabilnih hromozomskih aberacija). Interventni kardiolozi imaju najkraći ekspozicioni radni staž ( $11,85 \pm 7,01$  god), ali primaju najviše godišnje efektivne doze ( $2,01 \pm 1,01$  mSv). Najduži ekspozicioni radni staž ( $16,64 \pm 8,29$  god), ali najmanje doze primaju viši radiološki tehničari na radiodijagnostici ( $0,50 \pm 0,11$  mSv). Između dve grupe viših radioloških tehničara nije utvrđena značajna razlika u primljenoj dozi. Prisustvo nestabilnih hromozomskih aberacija zabeleženo je kod tri interventna kardiologa i jednog višeg radiološkog tehničara na radioterapiji. Povećana učestalost mikronukleusa zabeležena je samo kod jednog interventnog kardiologa (30 mikronukleusa na 1000 analiziranih binuklearnih limfocita. Razlika između grupa analizirana je  $\chi^2$  testom, pri čemu nije nađena statistički značajna razlika ( $\chi^2=2,99$ ;  $p=0,393$ ). Međutim, utvrđena je statistički značajna razlika u prosečnom broju mikronukleusa ( $F=11,314$ ;  $p=0,000$ ). U eksponovanim grupama značajna razlika u broju mikronukleusa nađena je između interventnih kardiologa i ispitanika ostalih grupa, tj. viših radioloških tehničara na radioterapiji i viših radioloških tehničara na radiodijagnostici. Pearsonovim testom korelacije utvrđena je statistički značajna povezanost između primljene doze i broja mikronukleusa ( $r=0,361$ ;  $p<0,001$ ).*

## 1. Uvod

Procenjuje se da je ukupno 22,8 miliona radnika izloženo jonizujućim zračenjima. Od toga 13 miliona je izloženo prirodnim, a oko 9,8 miliona arteficialnim izvorima jonizujućih zračenja. Procentualno najveći broj radnika izložen jonizujućim zračenjima su radnici zaposleni u zdravstvu (75%). Zbog ubrzanog tehnološkog razvoja, primene visokodoznih rendgen tehnologija i sve većeg broja interventnih procedura, procenjen broj radnika izloženih u zdravstvu u 2002. godini iznosi 7,4 miliona sa prosečnom godišnjom efektivnom dozom od 0,5 mSv. I dalje najčešća medicinska procedura sa primenom jonizujućih zračenja je rendgenografija, a doze koje prima osoblje zavise pre svega od upotrebljene opreme. Veća mogućnost ekspozicije postoji prilikom upotrebe mobilnih uređaja, jer funkcionišu u neoklopljenom sistemu. Ekspozicija pri radu CT-a je obično niska. Uopšte gledajući, tehnike koje se koriste u konvencionalnoj radiografiji ne predstavljaju značajan izvor profesionalne izloženosti. Međutim radnici uključeni u interventne procedure primaju znatno veće efektivne doze, pri čemu doze za ekstremitete mogu doseći regulatorne granice doza. Nestabilne hromozomske aberacije (dicentrični hromozomi, ring hromozom i acentrični fragment) su pokazatelji svežeg ozračivanja. Dicentrični hromozom čini 75% svih nestabilnih hromozomskih aberacija i predstavlja biomarker delovanja jonizujućih zračenja [1].

## 2. Cilj rada

Cilj rada je da utvrdi da li postoje značajne razlike u intenzitetu ekspozicije pri različitoj medicinskoj primeni generatora jonizujućih zračenja.

## 3. Materijal i metod rada

Studijom preseka obuhvaćen je 131 ispitanik muškog pola. Ispitanici su svrstani u četiri grupe: 33 interventna kardiologa, 31 viši radiološki tehničar na radioterapiji, 36 viših radioloških tehničara na radiodijagnostici i 31 ispitanik kontrolne grupe. Prve tri grupe ispitanika su namanje 5 godina profesionalno izloženi jonizujućim zračenjima i za njih smo dobili podatak lične dozimetrijske kontrole o prosečnoj godišnjoj efektivnoj dozi od ovlašćenog dozimetrijskog servisa. Kod svih ispitanika urađene su citogenetičke analize (Dicentrik test i Mikronukleus test) u skladu sa preporukama Međunarodne agencije za atomsku energiju [2]. Deskripcija numeričkih obeležja urađena je klasičnim metodama deskriptivne statistike. Za evaluaciju značajnosti razlika u ispitivanim parametrima između grupa, korišćena je jednofaktorska i dvofaktorska analiza varijanse. Za statističku analizu podataka korišćen je softverski paket Statistical Package for Social Sciences (SPSS) verzija 17.0.

## 4. Rezultati i diskusija

Svi ispitanici su muškog pola, prosečne starosti  $41,8 \pm 8,9$  godina. Najmlađi je imao 26, a najstariji 62 godine. Ispitanici su radili prosečno  $15,2 \pm 9,2$  godine (u intervalu 1-37), a u zoni jonizujućih zračenja  $14,6 \pm 8,2$  godine (u intervalu 5-32). Rezultati su prikazani u tabeli 1.

**Tabela 1. Demografske karakteristike ispitanika.**

Obeležje	Interventni kardiolog	Viši radiološki tehničar na radioterapiji	Viši radiološki tehničar na radiodijagnostici	Kontrolna grupa
Uzrast (godine)	45,4 ± 8,3 (29-57)	40,9 ± 10,3 (26-62)	44,0 ± 7,8 (28-55)	36,0 ± 6,7 (28-57)
Ukupni radni staž (godine)	16,0 ± 8,0 (5-29)	17,3 ± 10,9 (5-37)	18,3 ± 8,3 (5-32)	8,6 ± 6,0 (1-30)
Ekspozicioni radni staž (godine)	11,8 ± 7,0 (5-28)	15,0 ± 8,8 (5-30)	16,6 ± 8,3 (5-32)	/

Kod svih ispitanika urađene su citogenetičke analize: Mikronukleus test i Dicentrik test. Utvrđena je prosečna vrednost broja mikronukeusa u binuklearnim limfocitima periferne krvi, kao i prisustvo/odsustvo nestabilnih hromozomskih aberacija (acentrični fragment, dicentrični hromozom, prstenasti hromozom). Rezultati citogenetičkih ispitivanja prikazani su u tabelama 2 i 3.

**Tabela 2. Prosečan broj mikronukleusa na 1000 binukleranih limfocita periferne krvi.**

Obeležje	Interventni kardiolog	Viši radiološki tehničar na radioterapiji	Viši radiološki tehničar na radiodijagnostici	Kontrolna grupa
Broj mikronukleusa	12 ± 6 (4-30)	9 ± 4 (2-19)	9 ± 3 (3-16)	6 ± 3 (2-13)

**Tabela 3. Učestalost nestabilnih hromozomskih aberacija analiziranih na 200 metafaznih ćelija.**

Obeležje	Interventni kardiolog	Viši radiološki tehničar na radioterapiji	Viši radiološki tehničar na radiodijagnostici	Kontrolna grupa
Acentrični fragment	3	1	/	/
Dicentrični hromozom	1	/	/	/
Prstenasti hromozom	/	/	/	/

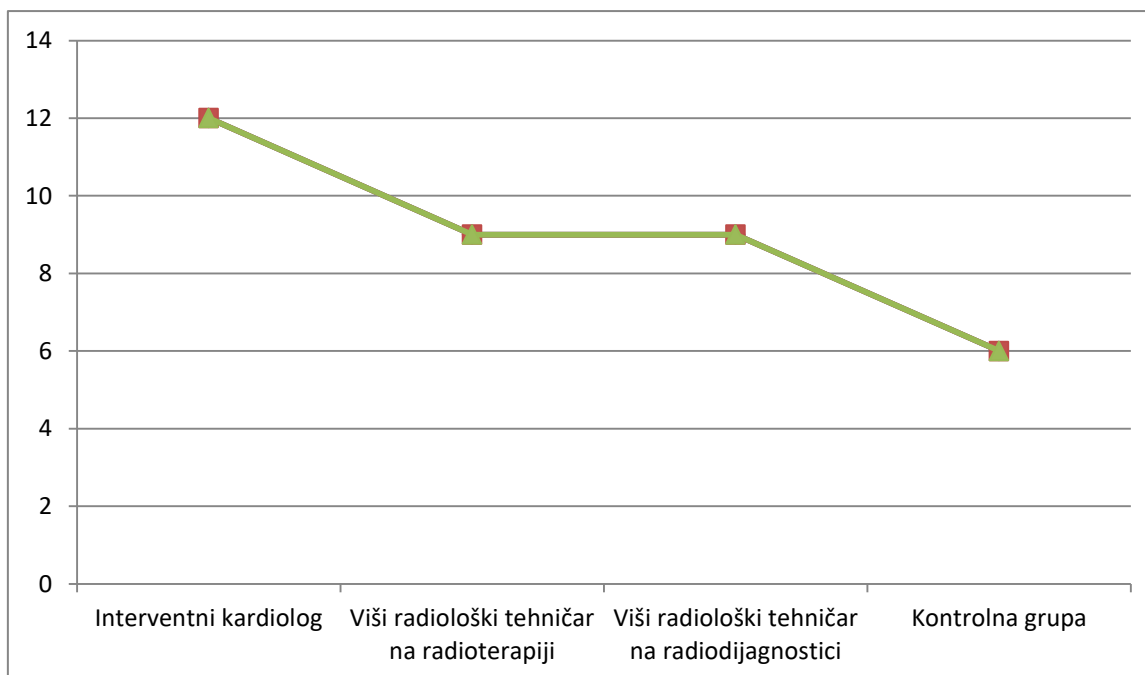
Procena profesionalne ekspozicije jonizujućim zračenjima kod ispitanika obavljena je na osnovu rezultata lične dozimetrijske kontrole i izračunavanjem godišnjeg ličnog doznog ekvivalenta. Prosečna vrednost efektivne doze za ispitanike koji rade u zoni jonizujućih zračenja prikazana je u tabeli 4.

Tabela 4. Prosečne vrednosti efektivne doze u ispitivanim grupama.

Obeležje	Interventni kardiolog	Viši radiološki tehničar na radioterapiji	Viši radiološki tehničar na radiodijagnostici
Godišnja efektivna doza/procenjena efektivna doza (mSv)	2,01 ± 1,01* (0,76-5,53)	0,80 ± 0,24 (0,37-1,20)	0,50 ± 0,11 (0,36-0,72)

\* za interventne kardiologe izračunava se procenjena efektivna doza.

Prisustvo nestabilnih hromozomskih aberacija zabeleženo je kod tri interventna kardiologa i jednog višeg radiološkog tehničara na radioterapiji. Razlika između grupa analizirana je  $\chi^2$  testom, pri čemu nije nađena statistički značajna razlika ( $\chi^2=6,177$ ;  $p=0,103$ ). Povećana učestalost mikronukleusa zabeležena je samo kod jednog interventnog kardiologa (30 mikronukleusa na 1000 analiziranih binuklearnih limfocita), dok su svi ostali ispitanici imali broj mikronukleusa u granicama referentnih vrednosti [3]. Razlika između grupa analizirana je  $\chi^2$  testom, pri čemu nije nađena statistički značajna razlika ( $\chi^2=2,99$ ;  $p=0,393$ ). Međutim, utvrđena je statistički značajna razlika u prosečnom broju mikronukleusa ( $F=11,314$ ;  $p=0,000$ ). Najveći broj mikronukleusa imali su interventni kardiolozi ( $12 \pm 6$ ), a najmanji ispitanici kontrolne grupe ( $6 \pm 3$ ), dok su isti broj imali viši radiološki tehničari na radioterapiji ( $9 \pm 4$ ) i viši radiološki tehničari na radiodijagnostici ( $9 \pm 3$ ). Sve eksponovane grupe ispitanika se razlikuju u prosečnom broju mikronukleusa od kontrolne grupe. U eksponovanim grupama značajna razlika u broju mikronukleusa nađena je između interventnih kardiologa i ispitanika ostalih grupa, tj. viših radioloških tehničara na radioterapiji i viših radioloških tehničara na radiodijagnostici. Razlika nije nađena između dve grupe viših radioloških tehničara. Ovi rezultati prikazani su na slici 1.



Slika 1. Prosečan broj mikronukleusa u binuklearnim limfocitima periferne krvi u ispitivanim grupama.

Jednofaktorskom analizom varijanse upoređene su razlike i u intenzitetu izloženosti, tj. prosečnim vrednostima godišnje efektivne doze između eksponovanih grupa. Utvrđeno je da interventni kardiolozi primaju značajno veće doze od druge dve grupe izloženih. Interventni kardiolozi imaju najkraći ekspozicioni radni staž ( $11,85 \pm 7,01$  god), ali primaju najviše godišnje efektivne doze ( $2,01 \pm 1,01$  mSv). Najduži ekspozicioni radni staž ( $16,64 \pm 8,29$  god), ali najmanje doze primaju viši radiološki tehničari na radio-dijagnostici ( $0,50 \pm 0,11$  mSv). Između dve grupe viših radioloških tehničara nije utvrđena značajna razlika u primljenoj dozi. Pearsonovim testom korelacije ispitana je povezanost intenziteta ekspozicije i broja mikronukleusa, pri čemu je utvrđena statistički značajna povezanost ( $r=0,361$ ;  $p<0,001$ ).

### 5. Zaključak

Interventni kardiolozi, iako imaju najkraći ekspozicioni radni staž, primaju značajno veće doze i imaju i značajno veći prosečan broj mikronukleusa od druge dve grupe izloženih ispitanika. Između dve grupe viših radioloških tehničara nije utvrđena značajna razlika u primljenoj dozi, kao ni u prosečnom broju mikronukleusa. Ovakav nalaz ukazuje na potrebu za kontinuiranim zdravstvenim nadzorom i praćenjem svih efekata profesionalne ekspozicije malim dozama jonizujućih zračenja, s tim da interventni kardiolozi zahtevaju češću analizu biomarkera ekspozicije.

### 6. Literatura

- [1] International Atomic Energy Agency, Sources and effects of ionizing radiation, available at: [http://www.unscear.org/docs/reports/2008/09-86753\\_Report\\_2008\\_GA\\_Report\\_corr2.pdf](http://www.unscear.org/docs/reports/2008/09-86753_Report_2008_GA_Report_corr2.pdf).
- [2] Cytogenetic Dosimetry Applications in Preparedness for and Response to Radiation Emergencies. IAEA-WHO -EPR, Vienna, 2011.
- [3] B. Rakić. Učestalost mikronukleusa u limfocitima periferne krvi opšte i populacije profesionalno izložene jonizujućim zračenjima na teritoriji Srbije. Specijalistički rad. Biološki fakultet Univerziteta u Beogradu. 2013.

## OCCUPATIONAL EXPOSURE IN VARIOUS RADIATION APPLICATION FIELDS IN MEDICINE

**Sladana VUKOVIĆ, Milenko ĐUKIĆ, Jelena PAJIĆ,  
Boban RAKIĆ and Vedrana PROKIĆ**

*Serbian Institute of Occupational Health "Dr Dragomir Karajović", Belgrade,  
Serbia, [sladjana.vukovicimrs@gmail.com](mailto:sladjana.vukovicimrs@gmail.com), [djukicmilenko@gmail.com](mailto:djukicmilenko@gmail.com),  
[jelena.pajic@institutkarajovic.rs](mailto:jelena.pajic@institutkarajovic.rs), [boban.rakic@institutkarajovic.rs](mailto:boban.rakic@institutkarajovic.rs),  
[vedrana.prokic@institutkarajovic.rs](mailto:vedrana.prokic@institutkarajovic.rs)*

### ABSTRACT

Approximately 22.8 million workers are exposed to ionizing radiation, mainly health workers (75%). The most exposed are workers performing fluoroscopic procedures, including intervention procedures. The aim of this study is to determine whether there are significant differences in the exposure intensity in the different groups of health workers. The cross section study included 131 male examinees classified into four groups: 33 interventional cardiologists, 31 radiological technicians in radiotherapy, 36 radiological technicians on radiodiagnostics and 31 examinees of the control group. Interventional cardiologists have the shortest exposure time ( $11.85 \pm 7.01$  years), but receive the highest annual effective doses ( $2.01 \pm 1.01$  mSv). Longest exposure work experience ( $16.64 \pm 8.29$  years), but the smallest annual effective doses are received by radiological technicians on radiodiagnostics ( $0.50 \pm 0.11$  mSv). A significant difference in the dose received was not found between two groups of radiological technicians. In the exposed groups, a significant difference in the number of micronuclei was found between interventional cardiologists and radiological technicians. Pearson's correlation test showed a statistically significant relationship between the received annual effective doses and the number of micronuclei ( $r = 0.361$ ;  $p < 0.001$ ).

## UTICAJ PROFESIONALNE EKSPozICIJE JONIZUJUĆIM ZRAČENJIMA NA STANJE HEMATOPOEZNOG SISTEMA

Milenko ĐUKIĆ i Slađana VUKOVIĆ

Institut za medicinu rada Srbije "Dr Dragomir Karajović", Beograd, Republika Srbija,  
[djukicmilenko@gmail.com](mailto:djukicmilenko@gmail.com), [sladjana.vukovicimrs@gmail.com](mailto:sladjana.vukovicimrs@gmail.com)

### SADRŽAJ

*Savremena medicina ne može se zamisliti bez primene jonizujućih zračenja u dijagnostičke i terapijske svrhe. Neke od radioloških procedura ne obavljaju samo radiolozi, već i lekari drugih specijalnosti, kao što su kardiolozi, ortopedi, anesteziolozi i drugi. Cilj rada je da utvrdi da li razlike u načinu izloženosti jonizujućim zračenjima i vrsta rada utiču na stanje hematopoeznog sistema. Studijom preseka obuhvaćen je 131 ispitanik muškog pola. Ispitanici su svrstani u četiri grupe: 33 interventna kardiologa, 31 viši radiološki tehničar na radioterapiji, 36 radioloških tehničara na radiodijagnostici i 31 ispitanik kontrolne grupe. Kod svih ispitanika urađene su hematološke analize. Ispitivane grupe se ne razlikuju međusobno u prosečnom broju eritrocita, trombocita i leukocita. Razlika nije nađena u apsolutnom, kao i u relativnom broju neutrofila, eozinofila i monocita. Iako razlika u apsolutnom broju limfocita nije statistički značajna između grupa ( $F=2,130$ ;  $p=0,100$ ), postoji značajna razlika u relativnom broju, tj. u procentualnoj zastupljenosti limfocita u leukocitarnoj formuli ( $F=3,923$ ;  $p=0,010$ ). Prosečan broj limfocita u ispitivanim grupama iznosio je 2,2 do 2,5 hiljade, pri čemu je najniža vrednost zabeležena kod interventnih kardiologa. Interventni kardiolozi koji primaju najveće godišnje efektivne doze imaju najmanji broj limfocita i najmanji procenat limfocita u leukocitarnoj formuli, iako su ove vrednosti u granicama referentnih.*

### 1. Uvod

Više od jednog veka rendgenski zraci se koriste u medicini u dijagnostičke svrhe. Brz tehnološki razvoj omogućava razvoj novih tehnika i sofisticiranih dijagnostičkih i terapijskih procedura koja koriste jonizujuća zračenja. Neke od dijagnostičkih radioloških procedura ne obavljaju samo radiolozi, već i lekari drugih specijalnosti, kao što su kardiolozi, ortopedi, anesteziolozi i drugi. Bez obzira na nivo sistema zdravstvene zaštite, medicinska upotreba jonizujućih zračenja se povećava iz godine u godinu. U periodu 1991-1996. god. ukupan broj dijagnostičkih radioprocedura u svetu je povećan približno 50%, tj. od 2,4 na 3,6 milijardi. Na ovaj brzi rast procedura utiče pre svega primena novih tehnika, kao što je CT dijagnostika koja je uvedena 70-ih godina prošlog veka. U periodu 1997-2007. godine povećana je globalna upotreba zračne terapije sa 4,7 na 5,1 milion tretmana, sa tendencijom povećanja lečenja linearnim akceleratorima. Najveći izvor profesionalne izloženosti u medicini su fluoroskopske procedure,



uključujući interventne procedure. Dotter i Judkins su 1964. godine prvi opisali perkutanu transluminalnu angioplastiku promena na krvnim sudovima, od kada broj ovih procedura rapidno raste. U današnje vreme koronarna angiografija je najčešća interventna procedura koja se primenjuje kod osoba starijih od 45 godina [1]. U okviru zdravstvenog nadzora lica profesionalno izloženih izvorima jonizujućih zračenja pored opšteg zdravstvenog stanja, posebna pažnja se posvećuje kontroli radiosenzitivnih tkiva i organa. U tom smislu akcenat se stavlja na hematološke i citogenetičke analize [2,3,4,5].

### 2. Cilj rada

Cilj rada je da utvrdi da li razlike u načinu profesionalne izloženosti jonizujućim zračenjima i vrsta rada utiču na stanje hematopoeznog sistema zdravstvenih radnika.

### 3. Materijal i metod rada

Studijom preseka obuhvaćen je 131 ispitanik muškog pola. Ispitanici su podeljeni u četiri grupe: 33 interventna kardiologa, 31 viši radiološki tehničar na radioterapiji, 36 viših radioloških tehničara na radiodijagnostici i 31 ispitanik kontrolne grupe. Kod svih ispitanika uzeta je anamneza i obavljen fizikalni pregled. Analiziran je uzorak venske krvi i urađene su laboratorijske hematološke analize (broj leukocita sa leukocitarnom formulom, broj eritrocita, hemoglobin, hematokrit, eritrocitni indeksi, broj trombocita). Deskripcija numeričkih obeležja urađena je klasičnim metodama deskriptivne statistike. Za evaluaciju značajnosti razlika u ispitivanim parametrima između grupa, korišćena je jednofaktorska i dvofaktorska analiza varijanse. Za statističku analizu podataka korišćen je softverski paket Statistical Package for Social Sciences (SPSS) verzija 17.0.

### 4. Rezultati i diskusija

Svi ispitanici su muškog pola, prosečne starosti  $41,8 \pm 8,9$  godina. Ispitanici su radili prosečno  $15,2 \pm 9,2$  godine, a u zoni jonizujućih zračenja  $14,6 \pm 8,2$  godine (tabela 1).

**Tabela 1. Demografske karakteristike ispitanika.**

Obeležje	Interventni kardiolog	Viši radiološki tehničar na radioterapiji	Viši radiološki tehničar na radiodijagnostici	Kontrolna grupa
Uzrast (godine)	$45,4 \pm 8,3$ (29-57)	$40,9 \pm 10,3$ (26-62)	$44,0 \pm 7,8$ (28-55)	$36,0 \pm 6,7$ (28-57)
Ukupni radni staž (godine)	$16,0 \pm 8,0$ (5-29)	$17,3 \pm 10,9$ (5-37)	$18,3 \pm 8,3$ (5-32)	$8,6 \pm 6,0$ (1-30)
Ekspozicioni radni staž (godine)	$11,8 \pm 7,0$ (5-28)	$15,0 \pm 8,8$ (5-30)	$16,6 \pm 8,3$ (5-32)	/

Kod svih ispitanika urađene su hematološke analize. Prosečne vrednosti krvnih elemenata u ispitivanim grupama prikazane su na tabelama 2, 3 i 4.

## Биолошки ефекти јонизујућих зрачења

**Tabela 2. Karakteristike elemenata crvene krvne loze u ispitivanim grupama.**

Obeležje	Interventni kardiolog	Viši radiološki tehničar na radioterapiji	Viši radiološki tehničar na radiodijagnostici	Kontrolna grupa
Broj eritrocita (milion)	5,1 ± 0,4 (4,3-5,9)	5,1 ± 0,5 (4,2-5,8)	5,0 ± 0,3 (4,1-5,8)	4,9 ± 0,4 (4,1-5,9)
Hemoglobin (g/L)	153,3 ± 9,6 (134-179)	150,7 ± 10,1 (131-165)	150,1 ± 6,3 (132-168)	153,2 ± 7,8 (136-172)
Hematokrit	0,455±0,028 (0,394-0,522)	0,457±0,032 (0,406-0,497)	0,447±0,021 (0,381-0,486)	0,452±0,025 (0,391-0,504)
MCV	90,3 ± 4,6 (80,0-102,0)	88,6 ± 4,1 (80,8-96,0)	90,1 ± 3,9 (82,6-102,0)	90,9 ± 4,1 (82,8-99,6)
MCH	30,52 ± 1,81 (26,40-35,0)	29,24 ± 1,71 (25,70-31,80)	30,59 ± 2,21 (27,30-39,80)	30,83 ± 1,68 (26,60-34,00)
MCHC	337,0 ± 8,9 (323-354)	329,8 ± 7,6 (316-344)	334,7 ± 10,7 (289-347)	338,1 ± 8,1 (318-353)

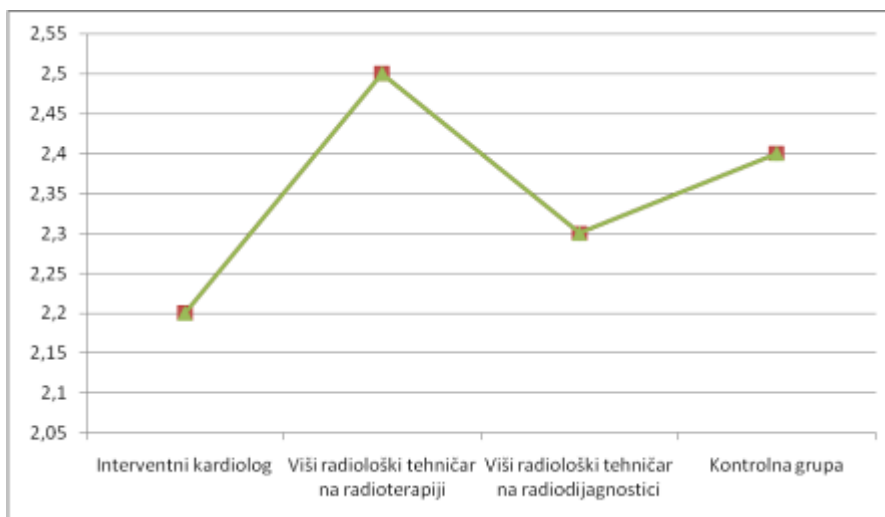
**Tabela 3. Karakteristike elemenata bele krvne loze u ispitivanim grupama.**

Obeležje	Interventni kardiolog	Viši radiološki tehničar na radioterapiji	Viši radiološki tehničar na radiodijagnostici	Kontrolna grupa
Broj leukocita (hiljada)	7,3 ± 1,8 (4,4-11,7)	7,3 ± 1,7 (4,8-11,2)	7,1 ± 1,6 (4,4-11,3)	7,3 ± 1,6 (4,5-10,1)
Apsolutni broj neutrofila	4,2 ± 1,4 (2,1-8,0)	4,0 ± 1,3 (2,3-6,9)	3,9 ± 1,1 (2,3-6,9)	4,1 ± 1,1 (2,2-6,4)
Relativni broj neutrofila (%)	57,1 ± 7,9 (43,7-71,0)	54,2 ± 7,2 (45,8-66,9)	54,3 ± 5,7 (41,6-65,4)	56,4 ± 6,5 (43,4-66,7)
Apsolutni broj limfocita	2,2 ± 0,6 (1,1-3,9)	2,5 ± 0,5 (1,8-4,1)	2,3 ± 0,6 (1,1-3,2)	2,4 ± 0,7 (1,5-4,5)
Relativni broj limfocita (%)	29,8 ± 6,8 (20,9-43,3)	35,0 ± 6,6 (23,5-45,5)	32,0 ± 5,5 (21,6-42,6)	33,2 ± 6,2 (20,3-44,2)
Apsolutni broj monocita	0,5 ± 0,2 (0,2-0,9)	0,6 ± 0,2 (0,4-1,1)	0,6 ± 0,2 (0,3-1,2)	0,6 ± 0,2 (0,3-1,2)
Relativni broj monocita (%)	7,4 ± 1,9 (3,3-11,2)	8,0 ± 1,8 (5,6-10,9)	8,4 ± 1,6 (5,2-11,9)	7,9 ± 1,9 (4,5-12,0)
Apsolutni broj eozinofila	0,2 ± 0,1 (0,1-0,6)	0,2 ± 0,1 (0,1-0,3)	0,3 ± 0,2 (0,1-0,8)	0,2 ± 0,1 (0,1-0,5)
Relativni broj eozinofila (%)	2,8 ± 1,9 (0,6-10,2)	2,3 ± 0,9 (0,8-3,9)	3,3 ± 1,9 (1,1-10,5)	2,6 ± 1,8 (0,4-9,1)

**Tabela 4. Karakteristike trombocita u ispitivanim grupama.**

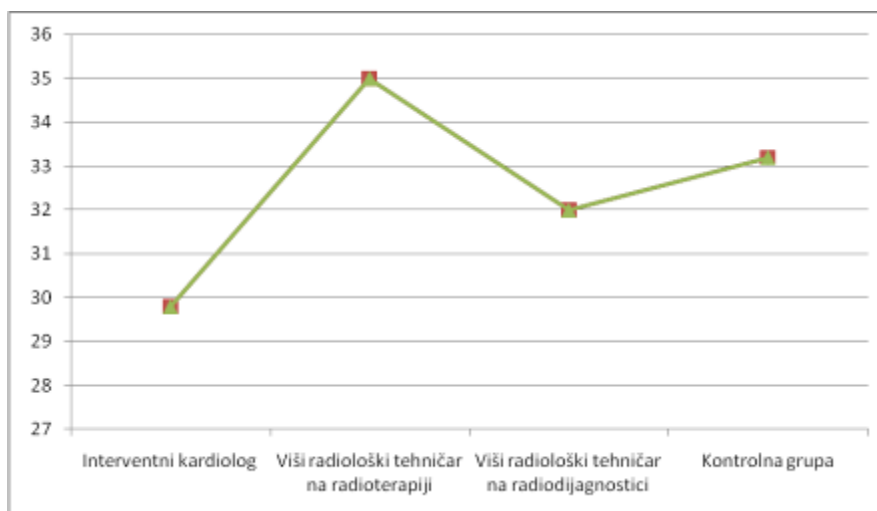
Obeležje	Interventni kardiolog	Viši radiološki tehničar na radioterapiji	Viši radiološki tehničar na radiodijagnostici	Kontrolna grupa
Broj trombocita (hiljada)	236,4 ± 47,9 (141-323)	226,1 ± 29,4 (166-270)	244,6 ± 46,7 (172-365)	253,6 ± 50,4 (151-444)

Samo u grupama ispitanika eksponovanih jonizujućim zračenjima uočena je leukocitoza i poremećaji u leukocitarnoj formuli (u svakoj grupi po dva ispitanika). Ispitivane grupe se ne razlikuju međusobno u prosečnom broju eritrocita, trombocita i leukocita. Razlika nije nađena u apsolutnom, kao i ni relativnom broju neutrofila, eozinofila i monocita. Iako razlika u apsolutnom broju limfocita nije statistički značajna između grupa ( $F=2,130$ ;  $p=0,100$ ), postoji značajna razlika u relativnom broju, tj. u procentualnoj zastupljenosti limfocita u leukocitarnoj formuli ( $F=3,923$ ;  $p=0,010$ ). Prosečan broj limfocita u ispitivanim grupama iznosio je 2,2 do 2,5 hiljade, pri čemu je najniža vrednost zabeležena kod interventnih kardiologa (slika 1).



**Slika 1. Prosečan apsolutni broj limfocita u ispitivanim grupama.**

Kod interventnih kardiologa zabeležena je i najmanja procentualna zastupljenost limfocita u leukocitarnoj formuli ( $29,8 \pm 6,8\%$ ), po čemu su se značajno razlikovali od kontrolne grupe i viših radioloških tehničara na radioterapiji. Statistički značajna razlika u procentnu limfocita nađena je i između viših radioloških tehničara na radioterapiji i viših radioloških tehničara na radiodijagnostici. Rezultati su prikazani na slici 2.



**Slika 2. Prosečan relativni broj limfocita u ispitivanim grupama.**

### 5. Zaključak

Samo u grupama eksponovanih ispitanika uočena je leukocitoza i poremećaji u leukocitarnoj formuli. Interventni kardiolozi koji primaju najveće godišnje efektivne doze imaju najmanji broj limfocita i najmanji procenat limfocita u leukocitarnoj formuli. Iako su ove vrednosti limfocita u granicama referentnih, kod interventnih kardiologa je zabeležen statistički značajno niži relativni broj limfocita. Statistički značajna razlika u relativnom broju limfocita nađena je i između viših radioloških tehničara na radioterapiji i viših radioloških tehničara na radiodijagnostici. Ovakav nalaz ukazuje na potrebu za kontinuiranim zdravstvenim nadzorom i praćenjem hematoloških parametara kod lica profesionalno izloženih malim dozama jonizujućih zračenja.

### 6. Literatura

- [1] International Atomic Energy Agency, Sources and effects of ionizing radiation, available at: [http://www.unscear.org/docs/reports/2008/09-86753\\_Report\\_2008\\_GA\\_Report\\_corr2.pdf](http://www.unscear.org/docs/reports/2008/09-86753_Report_2008_GA_Report_corr2.pdf).
- [2] S. Milačić. Bolesti izazvane jonizujućim zračenjima. U: Vidaković A, ur. Medicina rada II. Beograd: Udruženje za medicinu rada Jugoslavije, 1997, 638-43.
- [3] Pravilnik o uslovima za dobijanje licence za obavljanje radijacione delatnosti, Beograd: Službeni glasnik Republike Srbije br.61, 2011.
- [4] Pravilnik o prethodnim i periodičnim lekarskim pregledima zaposlenih na radnim mestima sa povećanim rizikom, Beograd: Službeni glasnik Republike Srbije br.120, 2007.
- [5] International Commission On Radiological Protection, ICRP. Statement on Tissue Reactions / Early and Late Effects of Radiation in Normal Tissues and Organs – Threshold Doses for Tissue Reactions in a Radiation Protection Context, ICRP Publication 118, Ann. ICRP 41(1-2), Elsevier, 2012.

## THE INFLUENCE OF OCCUPATIONAL EXPOSURE ON THE HEMATOPOESIS

Milenko ĐUKIĆ and Slađana VUKOVIĆ

*Serbian Institute of Occupational Health “Dr Dragomir Karajović”, Belgrade, Serbia,  
[djukicmilenko@gmail.com](mailto:djukicmilenko@gmail.com), [sladjana.vukovicimrs@gmail.com](mailto:sladjana.vukovicimrs@gmail.com)*

### ABSTRACT

Some radiological procedures are performed not only by radiologists, but also by doctors of other specialties, such as cardiologists, orthopedics, anesthesiologists and others. The aim of the paper is to determine whether the differences in the occupational exposure to ionizing radiation and the type of work affect of the hematopoiesis. The cross section study included 131 male examinees classified into four groups: 33 interventional cardiologists, 31 radiological technicians in radiotherapy, 36 radiological technicians on radiodiagnostics and 31 examinees of the control group. The investigated groups do not differ between each other in the mean number of erythrocytes, platelets and leukocytes. The difference was not found in the absolute, as well as in the relative number of neutrophils, eosinophils and monocytes. Although the difference in the absolute number of lymphocytes is not statistically significant among the groups ( $F=2.130$ ;  $p=0,100$ ), there is a significant difference in the relative number of lymphocytes ( $F=3.923$ ;  $p=0.010$ ). Interventional cardiologists receiving the highest annual effective doses have the smallest absolute and relative number of lymphocytes, although these values are within the limits of the reference values.

## EVALUACIJA REFERENTNIH VREDNOSTI MIKRONUKLEUS TESTA ZA PROFESIONALNO IZLOŽENA LICA U SRBIJI

**Boban RAKIĆ<sup>1</sup>, Jelena PAJIĆ i Aleksandar MILOVANOVIĆ<sup>1,2</sup>**

1) Institut za medicinu rada Srbije „Dr Dragomir Karajović“, Beograd, Srbija,

[boban.rakic@institutkarajovic.rs](mailto:boban.rakic@institutkarajovic.rs), [jelena.pajic@institutkarajovic.rs](mailto:jelena.pajic@institutkarajovic.rs)

2) Univerzitet u Beogradu, Medicinski fakultet, Beograd, Srbija, [milalex@eunet.rs](mailto:milalex@eunet.rs)

### SADRŽAJ

*Referentne vrednosti mikronukleus testa uspostavljaju se i periodično preispituju u skladu sa preporukama referentnih dokumenata. U Laboratoriji za biodozimetriju i citogenetiku poslednje preispitivanje obavljeno je 2013. godine, kada su ustanovljene nove prosečne vrednosti i referentni opseg za opštu i profesionalno izloženu populaciju u Srbiji. Novi ispitanici, čiji je genetički materijal analiziran u protekle dve godine, indikacija su za evaluaciju prethodno uspostavljenih vrednosti. Ispitivana populacija obuhvatila je 410 profesionalno izloženih ispitanika – 201 iz prethodne baze laboratorije i 209 novih – 112 i 97 iz dve različite ustanove. Poređenja grupa po polu, starosti i konzumiranju cigareta nisu pokazala značajne razlike. Poređenja starih i novih ispitanika i svake grupe zasebno, pokazala su statistički značajnu razliku u srednjoj vrednosti mikronukleusa. Ipak, kako se srednje vrednosti nalaze u očekivanom opsegu, istraživanje je pokazalo da se postojeća baza i dalje može koristiti za referentne vrednosti mikronukleus testa.*

### 1. Uvod

Biomonitoring se, kao veoma važan deo zdravstvenih pregleda ispitanika izloženih različitim mutagenim agensima, zasniva na utvrđivanju učestalosti različitih bioloških pokazatelja (biomarkera) koji ukazuju na najranije, još popravljive biološke efekte, koji prethode pojavi različitih bolesti.

Pored analize hromozomskih aberacija (HA) i analize razmene sestrinskih hromatida (SCE), mikronukleus (CBMN) test [1] je jedan od najznačajnijih konvencionalno korišćenih testova u studijama biomonitoringa.

Ovaj je test svoju primenu našao u biomonitoringu populacija izloženih hemijskim i fizičkim genotoksičnim agensima na radnom mestu i/ili u životnoj sredini, zbog: osetljivosti, jednostavnosti i statističke značajnosti zasnovane na analizi velikog broja ćelija.

Osnovni preduslov za primenu nekog biološkog testa u svrhu nadzora izloženih populacija je poznavanje njegovih referentnih vrednosti u posmatranoj populaciji. U biološkom nadzoru korisno je poznavati i individualne početne vrednosti odgovarajućeg biomarkera, koje služe za sva kasnija poređenja i procenu izloženosti efekta i/ili osetljivosti na nivou pojedinca. U tu svrhu laboratorije formiraju baze podataka koje sadrže vrednosti posmatranih parametara izmerene ili utvrđene na velikom broju ispitanika izložene populacije. Takve su baze podataka od velikog značaja za rutinsku

praksu, ali i u slučajevima neželjenih događaja (akcidenata), kada nije poznata osnovna vrednost posmatranog biomarkera koja je prethodila vanrednom izlaganju. Preporuka je redovno obnavljati baze podataka (idealno bi bilo svake 2 godine), a trebalo bi raspolagati podacima za najmanje 20 ispitanika svakog pola po dekadi starosti [1].

Laboratorija za biodozimetriju i citogenetiku (LBC) Instituta za medicinu rada Srbije „Dr Dragomir Karajović“, u okviru prethodnih i periodičnih lekarskih pregleda zaposlenih u zoni jonizujućih zračenja i biomonitoring studija opšte populacije Srbije, prikuplja podatke o vrednostima mikronukleus testa.

U LBC je poslednje preispitivanje obavljeno 2013. godine, kada su ustanovljene nove prosečne vrednosti i referentni opseg za opštu i profesionalno izloženu populaciju u Srbiji. Posle tog perioda, laboratorija je analizirala genetički materijal novih ispitanika - pripadnika profesionalno izložene populacije, u cilju evaluacije prethodno uspostavljenih vrednosti.

### 2. Materijal i metode

Istraživana populacija obuhvatila je ukupno 410 ispitanika profesionalno izloženih zatvorenim izvorima jonizujućih zračenja: 201 iz prethodne baze laboratorije i 209 novih (112 i 97 iz dve različite ustanove). Svi ispitanici su podvrgnuti citogenetičkim ispitivanjima (CBMN testu) u okviru prethodnih i periodičnih lekarskih pregleda koji se obavljaju u Centru za radiološku zaštitu Instituta za medicinu rada Srbije „Dr Dragomir Karajović“. Celokupna organizacija citogenetičkih ispitivanja sprovedena je u skladu sa etičkim načelima i smernicama pretpostavljenim za biomonitoring ljudskih populacija [2].

Za CBMN test limfociti su kultivisani, a uzorci obrađeni i kasnije analizirani u skladu sa standardnim protokolom [3].

Podaci od značaja za procenu genetičkih oštećenja opisani su klasičnim metodama deskriptivne statistike: aritmetičkom sredinom i standardnom devijacijom. Za poređenje razlika u prosečnim vrednostima upotrebljeni su Studentov t test za nezavisne uzorke i analiza varijanse (ANOVA) po Kraskal Volisu. U svim primenjenim analitičkim metodama prihvaćeni nivo značajnosti bio je 0,05. Za statističku analizu podataka korišćen je softverski paket Statistical Package for Social Sciences (SPSS) verzija 17.0.

### 3. Rezultati

U radu je analizirano 410 ispitanika podeljenih u dve približno jednake grupe: prvu grupu su činili ispitanici iz postojeće baze, a drugu ispitanici čiji su uzorci citogenetički analizirani protekle dve godine.

Poređenje prosečnih vrednosti za parametre: starost, pol, konzumiranje cigareta i ekspozicioni radni staž (ERS) po grupama, pokazalo je da nije bilo statistički značajne razlike ( $t = 0,48$ ;  $df = 408$ ;  $p > 0,05$  - za starost;  $t = 2,96$ ;  $df = 408$ ;  $p > 0,05$  - za pol;  $t = 2,34$ ;  $df = 408$ ;  $p > 0,05$  - za konzumiranje cigareta;  $t=0,78$ ;  $df=408$ ;  $p > 0,05$  za ERS) što je omogućilo dalje poređenje između grupa i pokazalo da je odabir grupa izvršen po principu slučajnosti.

Opšte karakteristike ispitivane populacije: pol, starost, ekspozicioni radni staž (ERS) i navika pušenja prikazane su u tabeli 1.



**Tabela 1. Opšte karakteristike ispitivane populacije.**

Grupa	Starost (godine) (mean±SD)	Pol (m; ž) <sup>a</sup>	Navika konzumiranja cigareta (p; np) <sup>b</sup>	ERS (mean±SD)
1	43,5 ± 11,1	99; 101	95; 106	14,38 ± 11,14
2	43,3 ± 8,99	100; 110	102; 108	15,11 ± 7,37

<sup>a</sup> m-muški pol; ž-ženski pol; <sup>b</sup> p – pušači; np-nepušači

Poređenje prosečnih vrednosti za parametar broj mikronukleusa pokazalo je statistički značajne razlike između pripadnika različitih polova (m-muški, ž-ženski pol) i starosnih kategorija (1-ispitanici do 40 godina; 2-ispitanici preko 40 godina starosti) u obe posmatrane grupe i celom uzorku, dok razlika u broju mikronukleusa u odnosu na naviku konzumiranja cigareta (0-nepušači; 1-pušači – više od 20 cigareta dnevno) nije konstatovana. Tabela 2 prikazuje prosečne vrednosti parametra broj MN i značajnost razlike.

**Tabela 2. Prosečne vrednosti parametra broj MN po starosnim kategorijama, polu i pušačkom statusu.**

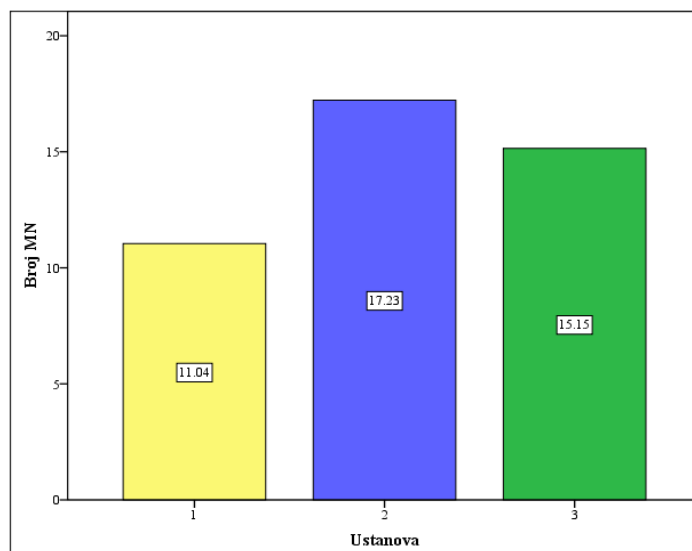
Broj MN	Starosna kategorija (mean±SD)	Pol (mean±SD)	Pušački status (mean±SD)	Značajnost razlike		
				Starosna kategorija	pol	Pušački status
1	9,73± 6,5 (1)	9,91 ± 0,5 (m)	13,44 ± 11,8 (0)	0,00	0,00	0,429
	16,81± 13,1 (2)	16,11 ± 0,5 (ž)	14,73± 10,3 (1)			
2	11,44 ± 3,9 (1)	13,26 ± 4,7 (m)	14,33± 5,7 (0)	0,00	0,00	0,413
	17,67 ± 5,6(2)	17,02 ± 6,2 (ž)	15,03± 5,7 (1)			

Poređenje prosečnih vrednosti za parametar broj mikronukleusa pokazalo je i statistički značajne razlike između pripadnika različitih grupa sa prosečnim vrednostima 13,91 ± 11,32 u grupi novih ispitanika i 15,15 ± 5,82 u grupi starih ispitanika, Poređenja po ustanovama takođe su pokazala statistički značajnu razliku u prosečnom broju mikronukleusa, sa najvećim prosečnim vrednostima MN u grupi 2 (17,23 ± 13,11), a najmanjim u grupi 1 (11,04 ± 7,73). Grafikon 1 prikazuje prosečne vrednosti broja MN po ustanovama.

#### 4. Diskusija

Mikronukleusi u limfocitima periferne krvi, kako zdravih ispitanika opšte populacije, tako i profesionalno izloženih različitim mutagenima, pokazatelj su oštećenja genoma

koja su akumulirana tokom života pojedinačne ćelije. Ove promene naročito dolaze do izražaja nakon prve in vitro deobe [1].



**Grafikon 1. Prosečne vrednosti broja MN po ustanovama.**

U ovom radu proučavan je nivo genetičkog oštećenja u populaciji profesionalno izloženih ispitanika jonizujućim zračenjima (radiolozi i radiološki tehničari). Analizom rezultata vezanih za opšte karakteristike populacije (starost, pol, navika konzumiranja cigareta, ERS) nije utvrđena statistički značajna razlika među grupama u odnosu na posmatrana obeležja, što pokazuje da je izbor grupa vršen nezavisno od njih.

Parametri koji opisuju genetička oštećenja analizirani su CBMN testom u odnosu na pol, starost i naviku konzumiranja cigareta, kao faktore koji, u skladu sa literaturnim podacima [4-11], mogu uticati na njihovu bazalnu incidencu.

Analiza u odnosu na pol pokazala je povećanu učestalost broja mikronukleusa u limfocitima periferne krvi osoba ženskog pola. Ovi nalazi u skladu su sa drugim studijama koje su se bavile izučavanjem uticaja pridruženih faktora na incidencu hromozomskih oštećenja [4, 7, 9-11], ističući da se povećan broj MN kod ženskog pola može povezati sa povećanom tendencijom X hromozoma da uđe u sastav mikronukleusa u odnosu na ostale hromozome i činjenicom da žene, za razliku od muškaraca, imaju dva X hromozoma [9-11].

Pozitivna korelacija između učestalosti MN i starosti utvrđena je u drugim studijama [4, -11]. Taj fenomen se najčešće objašnjava činjenicom da sa procesom starenja, kako na ćelijskom tako i na nivou čitavog organizma, dolazi do nagomilavanja primarnih oštećenja DNK, povećane učestalosti hromozomskih aberacija, kao i spontanog nastanka aneuploidija zbog gubitka pojedinih hromozoma [8, 11].

Bez obzira na prisustvo dokazanih kancerogena u duvanskom dimu, rezultati studija o uticaju pušenja na učestalost mikronukleusa su kontroverzni. Većina laboratorija uključenih u HUMN projekat [4] nije našla statistički značajne razlike između pušača i nepušača, a rezultati našeg istraživanja u skladu su sa publikovanim.

Iako je statistička analiza pokazala postojanje značajne razlike u prosečnim vrednostima MN testa između novoanaliziranih i starih ispitanika, sve ustanovljene vrednosti nalaze se u okvirima referentnih vrednosti, ustanovljenih za eksponovanu populaciju [spec rad

Boban]. Varijabilnost u incidenci MN uočena u ovoj studiji može se, bar delimično, objasniti individualnom genomskom senzitivnošću i unutrašnjim faktorima, kakvi su starost i pol, kao i životnim navikama (ishrana, konzumiranje alkohola, cigareta) [4-11]. Sprovedeno istraživanje pokazalo je da se postojeće referentne vrednosti, uz periodična preispitivanja, mogu uspešno koristiti u rutinskoj praksi laboratorije.

### 5. Literatura

- [1] M. Fenech. Cytokinesis-block micronucleus cytome assay. Protocol. *Nature Protocols*. 2, 2007, 1084-1104.
- [2] R.J.Albertini, J.A.Nicklas, J.P.O'Neill. Future research direction for evaluating human genetic and cancer risk from environmental exposures, *Environ. Health Persp.* 104, 1996, 503-510.
- [3] International Atomic Energy Agency. Cytogenetic Dosimetry: Applications in Preparedness for and Response to Radiation Emergencies. IAEA, Vienna, 2011.
- [4] Fenech, N. Holland, W.P. Chang, E. Zeiger and S. Bonassi The HUMN project-international collaborative study on the use of the micronucleus technique for measuring DNA damage in humans. *Mutat. Res.* 428, 1999, 271-283.
- [5] M. Kirsch-Volders, T. Sofuni, M. Aardema, S. Albertini, D. Eastmond, M. Fenech et al. Report from the in vitro micronucleus assay working group. *Mutat. Res.* 35, 2000, 167-172.
- [6] S. Bonnassi, M. Fenech, C. Lando, Y.P. Lin, M. Ceppi, W.P. Chang et al. HUman MicroNucleus project: international database comparison for results with the cytokinesis-block micronucleus assay in human lymphocytes: I. Effect of laboratory protocol, scoring criteria and host factors on the frequency of micronuclei. *Environ. Mol. Mutagen.* 37, 2001, 31-45.
- [7] H. Surowy, A. Rinckleb, M. Luedeke, M. Stuber, A. Wecker, D. Varga, et al. Heritability of baseline and induced micronucleus frequencies. *Mutagen.* 26, 2011, 111-117.
- [8] C. Bolognesi, C. Lando, A. Forni, E. Landini, R. Scarpato, L. Migliore and S. Bonassi Chromosomal damage and ageing: effect of micronuclei frequency in peripheral blood lymphocytes. *Age. Ageing.* 28 (1999), 393-397.
- [9] M.Fenech, S. Bonassi. The effect of age, gender, diet and lifestyle on DNA damage measured using micronucleus frequency in human peripheral blood lymphocytes. *Mutagen.* 26 (2011), 43-49
- [10] H. Nefic, I. Handzic. The effect of age, sex, and lifestyle factors on micronucleus frequency in peripheral blood lymphocytes of the Bosnian population. *Mutat. Res.* 753, 2013, 1-11.
- [11] J.M. Battershill, K. Burnett, S. Bull Factors affecting the incidence of genotoxicity biomarkers in peripheral blood lymphocytes: impact on design of biomonitoring study. Commentary. *Mutagen.* 23, 2008, 423-437.

## EVALUATION OF CBMN TEST REFERENCE VALUES FOR OCCUPATIONALLY EXPOSURE IN SERBIA

**Boban RAKIĆ<sup>1</sup>, Jelena PAJIĆ and Aleksandar MILOVANOVIĆ<sup>1,2</sup>**

- 1) *Serbian Institute of Occupational Health „Dr Dragomir Karajović“, Belgrade, Serbia, [boban.rakic@institutkarajovic.rs](mailto:boban.rakic@institutkarajovic.rs), [jelena.pajic@institutkarajovic.rs](mailto:jelena.pajic@institutkarajovic.rs)*
- 2) *Belgrade University, School of medicine, Belgrade, Serbia, [milalex@eunet.rs](mailto:milalex@eunet.rs)*

### ABSTRACT

Reference values of CMBN test are established and periodically evaluated according to reference documents recommendations. Cytogenetic biodosimetry laboratory re-established values in 2013. Recently examined subjects served as good indication for evaluation previously established values. Examined population comprised 410 occupationally exposed persons: 201 from old laboratory base and 209 new subjects. Comparison of MN values between groups showed statistically significant differences. However, new values were still in reference range. This results encouraged us to continue using established values in routine laboratory practice

## MEĐULABORATORIJSKA POREĐENJA BIODOZIMETRIJSKIH LABORATORIJA – PROCENA DOZE DICENTRIK I MIKRONUKLEUS TESTOM

**Jelena PAJIĆ<sup>1</sup>, Boban RAKIĆ<sup>1</sup> i Aleksandar MILOVANOVIĆ<sup>1,2</sup>**

1) *Institut za medicinu rada Srbije „Dr Dragomir Karajović“, Beograd, Srbija,*  
*[jelena.pajic@institutkarajovic.rs](mailto:jelena.pajic@institutkarajovic.rs), [boban.rakic@institutkarajovic.rs](mailto:boban.rakic@institutkarajovic.rs)*

2) *Univerzitet u Beogradu, Medicinski fakultet, Beograd, Srbija, [milalex@eunet.rs](mailto:milalex@eunet.rs)*

### SADRŽAJ

*Obezbeđenje poverenja u kvalitet rezultata radiobioloških ispitivanja sprovodi se periodično u okviru mreže biodozimetrijskih laboratorija kroz procenu apsorbovane doze zračenja dicentrik i mikronukleus testom. Rad prikazuje rezultate poslednjeg međulaboratorijskog poređenja koje je za cilj imalo i proveru kapaciteta mreže u slučaju radijacionog/nuklearnog akcidenta. U poređenju je učestvovalo 16 institucija. Uzorci krvi ozračeni sa dve doze gama zračenja poslani su u laboratorije sa zadatkom kultivacije, analize preparata i procene doze. Rezultati su procene doze pokazali su vrlo uspešnu klasifikaciju ozračenih uzoraka u medicinski značajne grupe, odlično slaganje sa isporučenim dozama i potvrdili kapacitivnost biodozimetrijskih servisa u brzom odgovoru u slučaju akcidenta.*

### 1. Uvod

Radijacioni akcidenti sa velikim brojem žrtava mogu biti rezultat različitih događaja koji uključuju ekspoziciju radioaktivnim izvorima. U slučaju akcidenata većih razmera, inicijalna trijaža, koja za cilj ima klasifikovanje žrtava prema stepenu izlaganja, indikovana je kao vodeći korak ka odgovarajućem kliničkom zbrinjavanju.

Procena ekspozicije bazirana na simptomima kao što su glavobolja, mučnina i slično, često vode pogrešnoj klasifikaciji žrtava, a s obzirom na činjenicu da svi ovi simptomi mogu biti i posledica anksioznosti, a ne ozračivanja [1]. Zato je informacija o ekspozicionom statusu žrtava, dobijena biološkom dozimetrijom, neophodna da dopuni evaluaciju kliničkih simptoma u okviru medicinske dozimetrije [2]. U slučaju akcidenata koji uključuju stotine žrtava, kapacitet pojedinačne biodozimetrijske laboratorije nije dovoljan za trijažu, pa je mreža laboratorija neophodan i važan element adekvatnog odgovora u ovakvim situacijama [3, 4]. U prethodnom periodu je kroz projekte EU osnovana mreža evropskih laboratorija sa ciljem harmonizacije performansi 5 biodozimetrijskih testova (dicentrik test, mikronukleus test, test prevmene kondenzacije hromozoma, test za detekciju translokacija FISH metodom, gama H<sub>2</sub>AX test). U okviru mreže testovi su optimizovani kroz standardizaciju metoda, obuke i međulaboratorijska poređenja [5, 6]. Za dicentrik i mikronukleus test organizovane su po dve interkomparacije, a ovaj rad prikazuje rezultate dobijene nakon drugog međulaboratorijskog poređenja.

### 2. Materijal i metode

Za potrebe druge interkomparacije uzorci krvi zdrave odrasle osobe (donora) ozračeni su poznatim dozama gama zračenja ( $Cs^{137}$ ) ( $D1=0,85$  Gy;  $D2=2,7$  Gy) i isporučeni partnerskim laboratorijama (označene od L1-L16). Svi učesnici imali su zadatak da uzorke kultivišu i obrade, a zatim analiziraju i izvrše procenu doze pomoću sopstvenih kalibracionih kriva. Prilikom ozračivanja simulirani su različiti scenariji – u okviru ove interkomparacije simulirana je akutna ekspozicija. Uzorci su podeljeni u grupe – ozračeni sa 0 Gy („sham irradiation“), ozračeni niskom i visokom dozom i svakoj laboratoriji isporučena su tri uzorka – svi su dobili jedan „sham irradiated“ i dva uzorka ozračena dozom  $D1$ , odnosno  $D2$ . Kodirani uzorci spakovani su u skladu sa UN propisima i poslani partnerskim laboratorijama u skladu sa IAEA preporukama (International Atomic Energy Agency [IAEA] 2011).

### 3. Rezultati

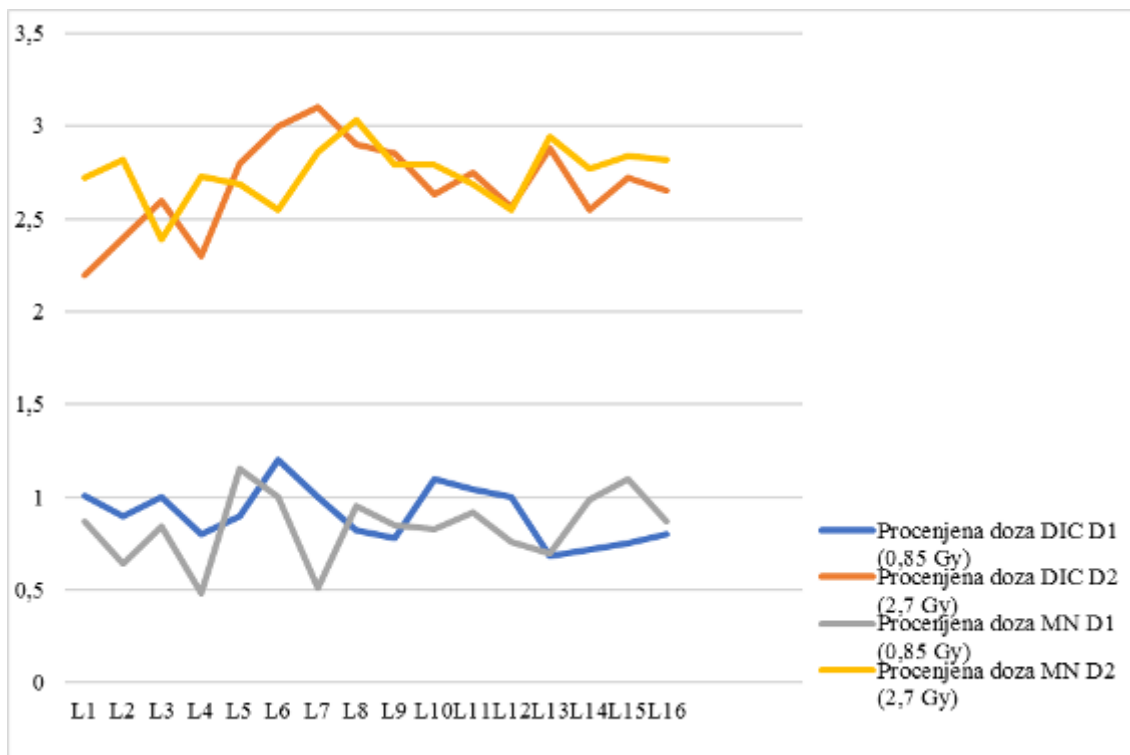
Po prijemu uzoraka, laboratorije su pristupile kultivaciji, obradi i analizi u skladu sa svojim protokolima. Svi su bili u obavezi da popune standardizovani upitnik (u okviru obrasca u kome su upisani i rezultati) u kome se navode ključni koraci u protokolu za oba testa. Po završenoj analizi preparata, izvršen je proračun doze i dobijeni rezultati su poslani organizatoru. Laboratorije su imale zadatak da u obrazac za dicentrik test unesu broj dicentrika (i dicentrika i ring hromozoma) dobijenih na 30, 50 i 100 analiziranih metafaznih figura, a u obrazac za mikronukleus test da unesu broj mikronukleusa na 100, 200, 500, 1000 i 2000 analiziranih binuklearnih limfocita. Neke od laboratorija učesnica koristile su CABAS a neke DOSEESTIMATE softver za obradu rezultata i procenu doze. Obrada rezultata dicentrik testa pokazala je odlično slaganje rezultata na nižoj dozi (0,85 Gy) gde su, na 50 ćelija, skoro sve laboratorije dobile prinos dicentrika blizak teorijski očekivanoj vrednosti (oko 5,13 dicentrika na 50 ćelija). Tri laboratorije su imale prinos van očekivanog opsega. Prinos dicentrika i procenjena doza na 100 analiziranih ćelija pokazala je da je većina laboratorija u očekivanom opsegu ( $-1 \leq z \leq 1$ ); dve laboratorije imale su upitne rezultate ( $2 \leq z \leq 3$ ), a jedna je procenila dozu iznad opsega, sa  $z \geq 3$ . Rezultati prinosa mikronukleusa na nižoj dozi na 1000 analiziranih binuklearnih limfocita takođe su pokazala dobro slaganje i sve laboratorije, osim jedne, našle su se u očekivanom opsegu. Na višoj dozi uočeno je bolje slaganje dobijenih rezultata i prinosa sa stvarnom dozom u oba testa. Generalno, uočen je trend dobrog slaganja procenjenih doza dicentrik i mikronukleus testom. Tabela 1 i grafikon 1 prikazuju rezultate oba testa (za dicentrik test na 100 ćelija, za mikronukleus test na 1000 binuklearnih limfocita) koje su dostavile laboratorije učesnice.

Po završenoj obradi rezultata, izvršena je klasifikacija uzoraka prema medicinski značajnim dozama, a s obzirom na krajnji cilj međulaboratorijskog poređenja – provera kompetentnosti laboratorije da odgovori u akcidentalnim situacijama. Klasifikacija je urađena u odnosu na broj analiziranih ćelija i u odnosu na dozu. Za nižu dozu, netačna klasifikacija podrazumevala je procenjenu dozu veću od 2 Gy, a za višu dozu, netačna klasifikacija podrazumevala je procenjenu dozu manju od 1Gy. Analiza je pokazala da postoji 6,25% loše klasifikovanih rezultata na nižoj i nijedan loše klasifikovan rezultat na višoj dozi.

**Tabela 1. Rezultati oba testa (DIC-dicentrik test i MN test) koje su dostavile laboratorije učesnice.**

Laboratorija	Procenjena doza DIC		Procenjena doza MN	
	D1 (0,85 Gy)	D2 (2,7 Gy)	D1 (0,85 Gy)	D2 (2,7 Gy)
L1	1,01	2,2	0,87	2,72
L2	0,9	2,4	0,84	2,82
L3	1	2,6	0,84	2,39
L4	0,8	2,3	0,85	2,73
L5	0,9	2,8	1,15	2,69
L6	2,2	3	2,1	2,55
L7	1	3,1	0,81	2,86
L8	0,82	2,9	0,95	3,03
L9	0,78	2,85	0,85	2,79
L10	1,1	2,63	0,93	2,79
L11	1,04	2,75	0,92	2,69
L12	1	2,56	0,86	2,55
L13	0,68	2,88	0,7	2,94
L14	0,72	2,55	0,99	2,77
L15	0,75	2,72	0,92	2,84
L16	0,8	2,65	0,87	2,82





**Grafikon 1. Grafički prikazani rezultati oba testa (DIC-dicentrik test i MN test) koje su dostavile laboratorije učesnice.**

#### 4. Diskusija

Dicentrik i mikronukleus test su važni u proceni apsorbovane doze zračenja u biološkoj dozimetriji [1]. Standardizacija protokola i harmonizacija metoda neophodna je za uspostavljanje mreže biodozimetrijskih laboratorija u slučaju radiacionog ili nuklearnog akcidenta većih razmera. Potencijali i ograničenja ovih biodozimetrijskih metoda testirani su kroz interkomparacije. Ukupno su, u dve do sada organizovana međulaboratorijska poređenja, učestvovala 42 laboratorije iz 31 države; u drugoj interkomparaciji, čiji su rezultati obrađeni u ovom radu, učestvovalo je 16 laboratorija. Dizajn ovog projekta uključio je transport uzoraka krvi među članicama Evropske unije (EU), ali i u evropske države koje nisu članice, kao i u države van evropskog kontinenta. Isporučka u okviru EU uspešno je izvedena u roku od 24h, međutim van Evropske unije došlo je do neprihvatljivih odlaganja zbog specifičnih pravila u vezi sa uvozom humanih uzoraka. Ovi rezultati sugerisali su da u vandrednim situacijama transport uzoraka van EU može biti ugrožen i da alternativa može biti procena doze pomoću specijalizovane internet mreže (web-based scoring) [7].

Iako su oba testa dugo u upotrebi u biodozimetriji, i za obe postoje publikovani protokoli i ISO standardi (IAEA, ISO; ISO), uočava se varijabilnost u kultivaciji, što za rezultat ima i razlike u koeficijentima kriva i rezultatima procene doze.

Klasifikacija uzoraka u medicinski značajne kategorije doza izvršena je uspešno za obe doze.

Bez obzira na relativno koherentne rezultate i pokazanu sposobnost procene doze biodozimetrijskih servisa, preporuka je nastaviti sa unapređenjem kvaliteta isporučenih rezultata kroz – kurseve i obuke u svim aspektima biodozimetrijske procene doze,

razvijanje i dalje unapređenje internet mreže za međulaboratorijska poređenja, organizovanje međulaboratorijskih poređenja sa ciljem prevazilaženja aktuelnih problema.

### 5. Literatura

- [1] International Atomic Energy Agency. *Cytogenetic Dosimetry: Applications in Preparedness for and Response to Radiation Emergencies*. Vienna: IAEA, 2011.
- [2] P. Voisin, M. et al. The cytogenetic dosimetry of recent accidental overexposure. *Cell Mol Biol.* 47, 2001, 557–564.
- [3] L. Roy, S Roch-Lefe`vre, A. Vaurijoux, P.A .Voisin, P. Voisin. Optimization of cytogenetic procedures for population triage in case of a radiological emergency. *Radiat Meas.* 42, 2007, 1143–1146.
- [4] W. F. Blakely WF et al. WHO 1st consultation on the development of a global biodosimetry laboratories network for radiation emergencies (BioDoseNet) *Radiat Res.* 17, 2009, 127–139.
- [5] U. Kulka et al. Realizing the European Network of Biodosimetry (RENEB). *Radiat. Prot. Dosim.* 151, 2012, 621–625.
- [6] U. Kulka et al. Realizing the European network of biodosimetry: RENEB-status quo. *Radiat. Prot. Dosim.* 164, 2015, 42–45.
- [7] H. Romm et al. Web based scoring is useful for validation and harmonisation of scoring criteria within RENEB. *Int. J. Radiat. Biol.* 93, 2017, 110-117
- [8] SRPS ISO 19238:2011. *Zaštita od zračenja. Uslovi za citogenetske laboratorije za biodozimetriju*, 2011.
- [9] ISO17099:2014. *Radiological protection —Performance criteria for laboratories using the cytokinesis block micronucleus (CBMN) assay in peripheral blood lymphocytes for biological dosimetry*, 2014.

## INTERCOMPARISONS APPLYING CONVENTIONAL BIODOSIMETRY TESTS

**Jelena PAJIĆ<sup>1</sup>, Boban RAKIĆ<sup>1</sup> and Aleksandar MILOVANOVIĆ<sup>1,2</sup>**

1) *Serbian Institute of Occupational Health „Dr Dragomir Karajović“, Belgrade, Serbia, [jelena.pajic@institutkarajovic.rs](mailto:jelena.pajic@institutkarajovic.rs), [boban.rakic@institutkarajovic.rs](mailto:boban.rakic@institutkarajovic.rs)*

2) *Belgrade University, School of medicine, Belgrade, Serbia, [milalex@eunet.rs](mailto:milalex@eunet.rs)*

### ABSTRACT

Intercomparison exercise was conducted to assess the suitability of an optimized version of the dicentric and cytokinesis-block micronucleus assay, and to evaluate the capacity of a large laboratory network performing biodosimetry for radiation emergency triages. Sixteen European institutions participated in the exercise. The results of the conducted exercise performed by biodosimetry network demonstrate that the dicentric and micronucleus assays are useful tools for large-scale radiation emergencies, and can be successfully implemented within a large network of laboratories.

**РАДИОАКТИВНИ ОТПАД И  
ДЕКОНТАМИНАЦИЈА**



**RADIOAKTIVNI OTPAD I DEKONTAMINACIJA:  
RETROSPEKTIVA RADOVA PREZENTOVANIH NA  
SIMPOZIJUMIMA DRUŠTVA ZA ZAŠTITU OD  
ZRAČENJA U PERIODU 1963.-2017. GODINE**

**Ivana SMIČIKLAS, Mihajlo JOVIĆ,  
Marija ŠLJIVIĆ-IVANOVIĆ i Slavko DIMOVIĆ**

*Univerzitet u Beogradu, Institut za Nuklearne Nauke Vinča, Beograd, Srbija,  
ivanat@vin.bg.ac.rs, mjovic@vin.bg.ac.rs, marijasljivic@vin.bg.ac.rs,  
sdimovic@vin.bg.ac.rs*

**SADRŽAJ**

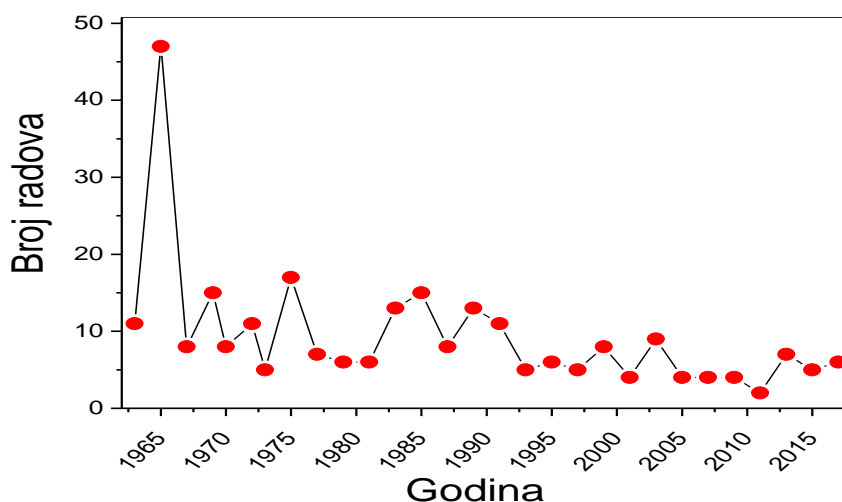
*Kao neizbežni pratioci svih vidova proizvodnje i primene nuklearne energije nastaju nusprodukti - otpadni materijali, koji nemaju potencijala za dalje korišćenje, a čija aktivnost premašuje granične vrednosti propisane zakonskom regulativom. Akcidenti pri proizvodnji i primeni nuklearne energije, manipulaciji i transportovanju izvora jonizujućeg zračenja i druge vanredne situacije u miru i ratu, značajno doprinose generisanju radioaktivnog otpada kao i radijacionoj kontaminaciji materijalnih sredstava i objekata, životne sredine i živih bića. Povodom jubilarnog XXX Simpozijuma Društva za zaštitu od zračenja Srbije i Crne Gore, kroz restrospektivu radova saopštenih na prethodnim skupovima prikazano je kako su se na vremenskoj skali od 54 godine menjale aktualne teme, problemi, metodologija rada i koji su zaključci proistekli iz naučnih istraživanja i praktičnog rada u oblasti radiokativnog otpada i dekontaminacije.*

**1. Radovi iz oblasti RAO i dekontaminacije na Simpozijumima Društva za zaštitu od zračenja i prvi, tematski skupovi**

Radioaktivni otpad (RAO) i dekontaminacija su stalne teme Simpozijuma Društva za zaštitu od zračenja od njegovog osnivanja. Na prethodnih 29 skupova, u okviru ovih oblasti je publikovano oko 270 radova i kratkih izvoda saopštenja.

Prosečan broj radova je bio 8, izuzimajući II Simpozijum održan 1965. godine u Mostaru, na kome je svih 47 radova bilo posvećeno problemima radiološke dekontaminacije, kao centralnoj temi skupa (slika 1). Tadašnji predsednik Jugoslovenskog društva za radiološku zaštitu Prof. dr Grujica Žarković, navodi u predgovoru Zbornika da je uklanjanje neželjene radioaktivnosti iz čovekove životne sredine jedna od najvažnijih oblasti radiološke zaštite i razlog sazivanja posebnog stručno-naučnog skupa, a prispeli radovi odnosili su se na opšta i organizaciona pitanja, spoljnu i internu dekontaminaciju čoveka, dekontaminaciju vode, hrane, objekata i materijala. Već tada je preporučeno da se organizaciji i sprovođenju radiološke zaštite u miru i ratu pristupiti planski, u pogledu donošenja zakonskih propisa i uputstava, osposobljavanja stručnog kadra, nabavke pouzdane instrumentacije i bržeg korišćenja naučnih dostignuća u praksi, što je

rezultiralo usvajanjem Rezolucije sa kojom je trebalo upoznati najodgovornije državne organe.



**Slika 1. Broj radova iz oblasti RAO i dekontaminacija prezentovanih na Simpozijumima DZZ u periodu 1963.-2017. god.**

Naredni Simpozijum, održan 1967. godine u Banjaluci, takođe je imao centralnu temu - „Merenja i instrumentacija u zaštiti od jonizujućeg zračenja“. Za kontrolu i merenje površinske kontaminacije u to vreme su korišćeni GM, proporcionalni i scintilacioni brojači, a zahvaljujući razvoju elektronike počelo je uvođenje poluprovodničkih elemenata koji su omogućili veću pouzdanost instrumentacije, uz manje dimenzije i potrošnju. Na skupu je predstavljen prenosni, tranzistorizovani instrument za merenje površinske kontaminacije KOMO-T, koji je indikovao kontaminaciju alfa i beta/gama emiterima i imao vizuelnu i akustičku kontrolu broja impulsa (slika 2A). Učesnici skupa su upoznati i sa prvom pokretnom radiološkom laboratorijom, izrađenom u Institutu u Vinči (slika 2B). Ova laboratorija je bila opremljena uređajima za merenje primljenih doza za lica, radijacionih polja gama zračenja, za merenje kontaminacije ljudi, odeće, terena, površina, radioaktivnosti uzoraka vode, hrane i vazduha, a takođe i kompletima za medicinsku intervenciju i humanu dekontaminaciju.



**Slika 2. Uređaj za merenje površinske kontaminacije KOMO-T (A) i pokretna radiološka laboratorija Instituta u Vinči (B). Zbornik III Jugoslovenskog Simpozijuma o radiološkoj zaštiti, Banja Luka, 1967.**



Naredni Simozijumi DZZ postali su mesto razmene praktičnih iskustava, prezentovanja novih naučnih i tehnoloških dostignuća iz oblasti dekontaminacije, karakterizacije, tretmana i odlaganja RAO, razmatranja strategija upravljanja RAO materijalima i problema dekomisije nuklearnih postrojenja.

### 2. Dekontaminacija

Efikasnost dekontaminacija metalnih površina i sprega u različitim rastvorima za dekontaminaciju, odeće kontaminirane česticama radioaktivnih padavina postupcima hemijskog čišćenja i mašinskog pranja, kao i kontaminabilnost gumiranih platna i njihova radiološka dekontaminacija, bili su tema Simpozijuma 1969. godine. Ideja o primeni morske vode u dekontaminaciji, predstavljena 1970. god, zasnivala se na visokom sadržaju dvovalentnih katjona i njihovom efektu na oslobađanje radioaktivni katjona koji su za podlogu vezani procesom jonake izmene. Morska voda se pokazala efikasnom u dekontaminaciji obojenih površina i pamučne tkanine, a određene su i optimalne koncentracije aditiva (natrijum-heksametafosfat i površinski aktivne supstance-deterdženti) koji povećavaju efekt dekontaminacije. Predložen je i postupak radiološke dekontaminacija motornih vozila u vanrednim uslovima, koji obuhvata mlaziranje vodom ili vodenim rastvorom deterdženta "Plavi radion". Otkriveno je da laka pena na bazi proteina, koja se koristi pri gašenju požara, može naći primenu u dekontaminaciji površina, s obzirom da ne kvasi uređaje, vezuje nastale gasove i hemijski je neutralna. Primena visoko-ekspanzivne pene u dekontaminaciji sintetičkih podova i vazduha publikovana je 1975. godine. Takođe, diskutovani su problemi i praktična iskustva vezana za određivanje performansi visokoeфикаsnih aerosolnih filtera, kao važnih činilaca zaštite okoline od rada nuklearnih postrojenja.

Mehanizmi dejstva tenzida i mogućnosti brze filtracija radioaktivnog koloidnog materijala razmatrani su 1983. god, dok je najveći broj radova na narednom skupu 1985. god. bio posvećen radiološkoj dekontaminaciji hrane. Akcenat je bio na postupcima koji će se mogu izvesti u domaćinstvu i koji brzo i efikasno smanjuju sadržaj radiokontaminata bez redukcije konzumne vrijednosti namirnice. Postupci uklanjanja radioaktivnih jona kao što su  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{85}\text{Sr}$  i  $^{131}\text{I}$ , zasnivali su se na potapanju kontaminiranog mesa u vodu i slane rastvore, kao i dubokom zamrzavanju mesa, praćenim brzim odmrzavanjem i višestepenim kuvanjem pod pritiskom, uz promenu tečne faze.

Na Simpozijumu održanom 1987. god. nakon nuklearne katastrofe u Černobilu, predstavljen je postupak ultrazvučne dekontaminacije opreme, dok je najveći broj radova iz oblasti humane dekontaminacije bio prezentovan u okviru Sekcije „Medicinsko-biološka zaštita“.

Složeno međudelovanje različitih vrsta tenzida u sistemima za dekontaminaciju bilo je tema radova iz 1991. godine. Prezentovan je i metod elektrohemijske dekontaminacije u nuklearnim postrojenjima, u kome je kontaminirani metalni predmet uronjen u rastvor elektrolita i vezan za pozitivan pol izvora jednosmerne struje. Metod je pokazao dobre rezultate u dekontaminaciji čelika, bakra i aluminijuma, usled anodnog rastvaranja metala. Prikazana je i primena Mossbauer-ove spektroskopije u analizi korozionih produkata čelika.

U okviru dekontaminacije, ispitivani su i postupci tretmana otpadnih materijala koji imaju perspektivu dalje primene. Fosfo-gips se dobija kao nus-proizvod pri proizvodnji fosforne kiseline, a usled povećane aktivnosti radionuklida ne može se koristiti u

građevinskoj industriji i poljoprivredi. Postupci njegovog prečišćavanja predloženi 1997. god, smanjuju koncentraciju prisutnih radionuklida do zakonski predviđenog nivoa. Iste godine je prvi put razmatrana primena laserskog zračenja za dekontaminaciju površina metala, uz analizu principa ablacije površine putem intenzivne i fokusirane laserske svetlosti koja otparava tanak sloj materijala. Kao prednosti nove metode navedeni su: delovanje sa daljine bez kontakta sa objektom, smanjenje sekundarnog otpada i izbegavanje upotrebe agresivnih hemikalija u velikim količinama.

Procena i poređenje efikasnosti dekontaminacije alkidnih i epoksi-poliuretanskih sistema premaza, publikovana je 2007. god, a za merenje površinske aktivnosti kontaminiranih i dekontaminiranih uzoraka korišćen je gamaspektrometrijski sistem visoke rezolucije sa koaksijalnim poluprovodničkim detektorom sa kristalom od germanijuma visoke čistoće (HPGe ORTEC GEM 50).

Prenosni digitalni merač radioaktivnog zračenja DMRZ-M15, za merenje jačine ambijentalne ekvivalentne doze gama zračenja  $H^*(10)$ , kao i za detekciju radioaktivnih izvora i kontaminacije, predstavljen je 2015. god. Korišćenjem mikrokontrolera omogućena je upotreba više mernih sondi, korekcija na fon, kao i kompenzacija mrtvog vremena. Primenom daljinskih sondi, moguće je i merenje na daljinu (do 100 m), što ga čini korisnim za merenje velikih jačina doza sa bezbedne udaljenosti.

### 3. Remedijacija kontaminiranih terena

Problemi dekontaminacije i remedijacije terena postali su aktuelni nakon bombardovanja Savezne Republike Jugoslavije od strane NATO saveza, 1999. god. Na području rta Arza, koji se nalazi na ulazu u zaliv Boka Kotorska, ispaljeno je 480 projektila, a procenjeno je da je 300-400 bilo sa uranijumskim penetratorom (90-120 kg osiromašenog uranijuma). Realizaciju projekta dekontaminacije je Vlada Crne Gore poverila Centru za ekotoksikološka ispitivanja i kampanja je trajala do decembra 2002. godine. Dozimetrijski je detaljno pregledano ukupno oko 45.000 m<sup>2</sup> terena, a kontaminacija osiromašenim uranijumom je detektovana na oko 18.000 m<sup>2</sup>. Na Simpozijumima DZZ održanim 2001. i 2003. god, saopštena su dozimetrijska iskustva, sistematizovani su tipovi lokacija i publikovani rezultati dekontaminacije. Svih 486 kontaminiranih lokacija je dekontaminirano do nivoa koji je niži od dvostruke maksimalne vrednosti lokalnog prirodnog fona i područje je proglašeno podesnim za neograničeni javni pristup.

Na Simpozijumu DZZ 2005. god, sorpcija i distribucija urana na zemljištu lokaliteta Bratoselce koje je za vreme NATO agresije bombardovano municijom sa osiromašenim uranijumom, razmatrana je sa stanovišta povećanja znanja o interakcijama urana i komponenti zemljišta. Takođe, predstavljene su metode hemijske *in situ* stabilizacije radionuklida u zemljištu, a 2013. god. i eksperimentalni rezultati primene apatita u *in situ* remedijaciji zemljišta kontaminiranog radioaktivnim <sup>90</sup>Sr. Osim metoda stabilizacije, proučavan je i optimizovan sastav rastvora za hemijsku ekstrakciju radionuklida iz kontaminiranog zemljišta (2015. god).

### 4. Karakterizacija i tretman tečnog RAO

Postupci tretmana tečnog RAO su kontinuirano izučavani do današnjih dana. Na Simpozijumu 1969. godine analiziran je proces prečišćavanja vode flokulacijom i taloženjem ferifosfatnih flokula u LAMELLA aparatima. Sistem kontrole otpadnih radio-

aktivnih voda i postupanje sa tečnim materijalima u institutu u Vinči, opisani su 1970. godine. Prva šarža koja je u toku probnog pogona tretirana u eksperimentalnom postrojenju bila je smeša fisionih produkata. Tretman je obuhvatao koprecipitaciju Sr kalcijum-fosfatom uz dodatak  $\text{Fe}^{3+}$  jona, separaciju zaostalog Sr i većeg dela Cs jona katjonskom izmenom na smoli Amberlit IR-120 i završno uklanjanje preostalog Cs pomoću selektivnog jonskog izmenjivača  $\text{K}_2/\text{CoFe}(\text{CN})_6$ . Šema model postrojenja za uklanjanje  $^{60}\text{Co}$  i  $^{137}\text{Cs}$ , koje je bila planirano za obradu efluenta tipa VR-1, publikovana je 1972. god. S obzirom na složeni hemijski sastav ovog efluenta, tretman je obuhvatao više faza.

Postupak predkoncentrisanja lantanida primenom aluminijum-hidroksida, saopšten 1985. god, pokazao se efikasnim u prisustvu visokih koncentracija soli, ali ne i u prisustvu kompleksanata koji grade stabilne komplekse sa  $\text{Ln}^{3+}$  jonima.

Mogućnosti tretmana nisko i srednje radioaktivnih efluenta iz nuklearne elektrane (NE) "Krško" kombinovanim metodama, saopštene su 1987. god, a 1989. su definisani najpovoljniji uslovi denitriranja suspenzije visoko radioaktivnog otpada primenom mravlje kiseline. Interesantan je podatak da u ovom periodu, iz praktičnih, ekonomskih i sigurnosnih razloga, započinje praksa izvođenja eksparimenata primenom stabilnih izotopa kao analoga radioaktivnim.

Proces dvostepene pertracije je 1997. godine predstavljen kao perspektivna alternativa postojećim separacionim metodama za uklanjanje radioaktivnih jona iz tečne faze. Ramski membranski moduli sa transverzalno postavljenim šupljim vlaknima omogućavaju da se istovremeno izvrši i dekontaminacija polaznog rastvora i međusobna separacija jona, uz koncentrisanje svakog jona ponaosob i omogućavanje komercijalne primene radioizotopa. Na sledećem Simpozijumu 1999. god, diskutovana je primena membranskih procesa za efikasno koncentrisanje i/ili separaciju radionuklida iz tečne faze, kao što su elektrodijaliza, Donnanova dijaliza, pertracija i reversna osmoza.

Veliki broj radova na Simpozijumima DZZ bio je posvećen separaciji radionuklida iz vodene sredine primenom selektivnih čvrstih matrica – sorbenata. 1969. godine publikovani su rezultati primene sintetičkog zeolita tipa Linde 4A, aktivnog uglja biljnog porekla i mikrokristalnih sorbenata. Godine 1972, izložen je niz radova na temu sorpcije radionuklida, posebno  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{89}\text{Sr}$  i  $^{60}\text{Co}$ , na sintetičkom zeolitu AV/-500 koji je visokoselektivan prema Cs, ilitnim glinama, ifuzorijskoj zemlji, bentonitu i tufu. Kristalni  $\text{BaSO}_4$  je ispitivan kao sorbent, a izučavan je i zahvat primesa pri njegovoj kristalizaciji. Rezultati izučavanja defektne strukture mikrokristala  $\text{BaCO}_3$  i migracija trasera  $^{133}\text{Ra}$  u čvrstu fazu  $\text{BaCO}_3$  bili su prezentovani 1981. i 1983. godine.

Ispitivanje sorpcije  $^{137}\text{Cs}$  na zeolitu 4A, 1973. god, pokazalo je da prisustvo deterdženta nema uticaja na efikasnost separacije. Komparativna sorpcija jona Co na neorganskim i organskim sorbentima publikovana 1973. god, pokazala je da je proces uspostavljanje ravnoteže dugotrajan (24 h i više), osim na organskim jonoizmenjivačkim smolama. Sorpcija radionuklida na kolubarskom lignitu (1975. god) pokazala je selektivnost površine prema jonima Co. U interakciji sa rastvorom iz uglja su ekstrahovane mineralne i organske materije, među kojima i fenol, pa je ovaj sorbent ocenjen kao nepogodan za dekontaminaciju vode za piće.

Istraživanje sistema za fiksaciju radioizotopa iz 1975. god. obuhvatilo je i razmatranje mehanizma rekristalizacije, adsorpciono/desorpcione ravnoteže i samodifuzije, kao procesa koji određuju fiksaciju radioaktivnih izotopa u sistemima čvrsto/tečno.

Sorpcija  $^{137}\text{Cs}$  je izučavana primenom prirodnog i modifikovanog bentonita (1977. i 1979. god). Utvrđeno je da se efikasnost sorpcije na domaćim bentonitskim glinama

može znatno poboljšati termičkim i hemijskim tretmanima. Najveća efikasnost uklanjanja postignuta je primenom gline obradjene natrijum-hidroksidom, a zatim feri-hloridom, te je ovaj sorbent preporučen i za dekontaminaciju vode za piće.

Na skupovima 1977. i 1981. god, tema je bila mogućnost uklanjanja radionuklida u anjonskom obliku (jod i njegove valentine forme) primenom aktivnog uglja, dok je 1983. analiziran problem dekontaminacije voda sa visokim koncentracijama neaktivnih jona, kod kojih je moguća pojava ekskluzije radioaktivnog materijala. Najveći stepen ekskluzije pronađen je na kaolinu, a najmanji na zeolitu A što mu daje prednost kao matiksnu za dekontaminaciju. Zeoliti su bili aktuelni i 1985. god, kada su predstavljeni rezultati uklanjanje radioizotopa gadolinijuma i mogućnosti korištenja zeolita za obradu nisko i srednje radioaktivnog otpada iz nuklearnih elektrana. Na istom Simpozijumu predstavljeni su prvi u nizu rezultata primene sorbenata na bazi kalcijum-fosfata, čije su različite hemijske i strukturne forme izučavaju do današnjih dana. Pored eksperimenalnih rezultata sinteze i karakterizacije različitih apatita, 1999. god. je na Simpozijumu predstavljen softver VINMATRIX 1.0 razvijen u Institutu „Vinča“ za izučavanje stabilnosti sistema apatit - primesa. U osnovi softvera je izračunavanje vrednosti potencijala jon-jon interakcije, jednog od osnovnih fizičkih parametara koji definišu kapacitet čvrste matrice za inkorporaciju primesa i stabilnost sistema čvrsta matrica/primesa.

O primenljivosti granuliranih formi sorbenata (modernita i zeolita) za uklanjanje radionuklida iz pojedinačnih rastvora ili smeše, bilo je reči na Simozijumima održanim 1987. i 1989. god. U ovom periodu, sorpcija radionuklida na različitim mineralima je izučavana i u svetlu selekcije pogodnih odlagališta RAO, a predstavljeni su i rezultati ispitivanja uticaja temperature i vremena kalcinisanja zeolita na brzine otpuštanja radioaktivnih kajona. Korišćenje sepiolita u oblasti zaštite životne sredine, u svim situacijama kada postoji kontaminacija zemljišta i voda uranijumom, prezentovano je 2011. god.

Od 2007. god, u skladu sa trendovima u svetu, značajno je poraslo interesovanje za valorizaciju otpadnih materijala i njihovu praktičnu primenu u imobilizaciji radionuklida. Životinjske kosti su izučavane kao sekundarni izvor hidroksiapatita i u više studija su se pokazale kao pogodna matrica za imobilizaciju radionuklida. U svrhu uklanjanja radioaktivnih katjona, na Simpozijumima održanim 2013. i 2015. god, predstavljen je niz radova u kojima je kao sorbent korišćen otpadni material (boksitni ostatak, leteći pepeo, pepeo pirinčane pleve, komponente građevinskog otpada, kompost rečne korovske biljke, ljuštore školjki). Dobijeni rezultati su pokazali da se među otpadnim materijalima mogu pronaći alternativne, jeftine, lako dostupne i ekološki prihvatljive matrice za primenu u procesima prečišćavanja tečnog radioaktivog otpada.

### **5. Karakterizacija i tretman čvrstog RAO**

U oblasti tretmana čvrstog RAO, na Simpozijumu 1981. god. se prvi put pored cementa pominje bitumen kao medijum za solidifikaciju RAO. U poređenju sa cementnom matricom, bitumen pokazuje prednosti kao što su fizička, hemijska i radiolitička stabilnost uz niže operativne cene bitumenizacije (10 puta niže u odnosu na cemenctiranje) i niže troškove transporta do mesta odlaganja. Godine 1983, učesnicima Simpozijuma DZZ je predstavljen novi metod solidifikacije jonoizmenjivača plastičnim materijalima koji polimerizuju na sobnoj temperaturi, kao i rezultati prve kampanje vitrifikacije radioaktivnog otpada u Francuskoj.

Na skupovima održanim 1983. i 1985. god, aktuelna tema bio je sastav matriksa za imobilizaciju RAO, a praćena je izlučljivost  $^{137}\text{Cs}$  iz perlit-cementa i vermikulit-cementa. Poređenje efiksnosti vermikulit-maltera i maltera dobijenog na bazi Portland cementa sa aditivima, u imobilizaciji istrošenih jonoizmenjivačkih smola, ukazalo je na neminovnost promena u tehnologiji kondicioniranja RAO u NE „Krško”. Modelovanje fizičko-hemijskih parametara maltera za imobilizaciju RAO i betona za izradu kontejnera u tehnologiji odlaganja RAO, prikazano je na Simpozijumu 1989. god.

Lizimetrijska ispitivanja solidifikovanih RAO formi prvi put su primenjena 1991. god, kao nov pristup u definisanju ponašanja RAO materijala niskog i srednjeg nivoa aktivnosti, imobilisanih u izabranim cementnim matriksima. Ovim ispitivanjima se imitiraju realni uslovi, a akcenat je stavljen na pojavu mogućih akcidentalnih uslova na području odlagališta.

Kao rezultat potrebe za nedestruktivnom karakterizacijom otpada u nestandardnim pakovanjima, bez prethodnog iznošenja iz skladišta, 2005. god. su na Simpozijumu DZZ opisana spektrometrijska merenja gama zračenja iz istorijskog otpada nastalog solidifikovanjem reaktorskog tečnog otpada, u cilju ovladavanja *in situ* karakterizacijom. Merenja su izvedena pomoću NaI(Tl) detektora, sa višekanalnim analizatorom InSpector 2000 i programskim paketom Genie 2000.

Na Simpozijumu 2007. godine, predstavljeni su matematički modeli za određivanje i poređenje efektivnih koeficijenata difuzivnosti radionuklida, od značaja u analizi migracije radionuklida iz cementog matriksa pripremljenog bez i sa dodatkom adiva (bentonita i zeolita) za dodatnu stabilizaciju.

Rezultati uklanjanja, kondicioniranja i skladištenja iskorišćenih radioaktivnih izvora u Crnoj Gori, sprovedenih kroz projekte IAEA i EU, predstavljeni su 2017. godine.

### 6. Dekomisija reaktora

Problem dekomisije nuklearnih elektrana prvi put je akcentovan na Simpozijumu DZZ 1985. god. Povlačenje nuklearnih objekata iz upotrebe nije bilo dovoljno regulisano, a nedostatak kriterijuma povezivan je sa nedostatkom istustva. Do tog trenutka je u celom svetu izvršena dekomisija oko 60 nuklearnih objekata, ali ni jedne komercijalne NE. Procenjivalo se da će do kraja 20 veka preko 100 NE prestati sa radom, što govori o aktuelnosti i razmerama problema.

Godine 1997., na Simpozijumu su izneti problemi zbrinjavanja isluženog goriva reaktora RA u Vinči. Istraživački RA snage 6,5 MW, projektovan i izgrađen od strane bivšeg SSSR, pušten je u pogon 1959. god, a zaustavljen 1984. god. U elaboratu "Podloge i kriterijumi za utvrđivanje daljeg statusa istraživačkog reaktora RA", procenjena je realna vrednost reaktora RA, zajedno sa teškom vodom i gorivom i ocenjeno da izbor rešenja za njegov trajni status mora biti izvršen što pre. Isluženo nuklearno gorivo bilo je smešteno u bazenu za privremeno odlaganje, u suterenu zgrade reaktora. Tadašnja ispitivanja su pokazala da je stanje u ovom bazenu može imati ozbiljne sigurnosne i radiološke implikacije. Dat je opis odlagališta isluženog goriva i aktivnosti koje su sprovedene na poboljšanju njegovih sigurnosnih i radioloških karakteristika. Prikazani su rezultati do tada postignuti na identifikaciji i minimizaciji korozivnih procesa, kao i rezultati analize sigurnosti na nuklearnu kritičnost. Povećana radioaktivnost vode u bazenu pripisana je curenju "izgubljenog" gorivnog elementa, koji je u toku 1996. god. lociran i izvađen sa dna bazena. Cilj Misije IAEA koja je boravila u Institutu "Vinča" u februaru 1997. bio je da eksperti iz Rusije razrade plan i



procene troškove sprovođenja navedenih aktivnosti. Procenjeno je da je za sanaciju bazena sa isluženim gorivom reaktora RA potrebno oko 300 do 500 hiljada US \$.

Odlukom Vlade Republike Srbije iz jula 2002. god, trajno je zaustavljen reaktor RA, te je najviše radova o ovoj problematici prezentovano na Simpozijumu 2003. god. Prikazani su detalji plana radiološke karakterizacije za potrebe dekomisije RA, a koji se odnose na metode uzorkovanja, merenja i analizu eksperimentalnih rezultata određivanja aktivnosti sistema i komponenti. Dat je pregled metoda proračuna koji će biti korišćeni za određivanje neutronske indukovane aktivnosti u komponentama i sistemima reaktora RA i razmatrana je mogućnost korišćenja automatizovane nedestruktivne analize nuklearnog otpada srednje i niske aktivnosti i transuranijskog otpada, smeštenog u kontejnerima (buradima), pomoću emisione kompjuterizovane tomografije (ECT). Analizirane su opcije dekomisije RA, a na osnovu analiziranih parametara predloženo je odlaganje dekomisije za period od 30 godina i usvajanje programa pripremnih radova.

Zaključcima Vlade Republike Srbije iz februara 2004. godine definisani su glavni pravci aktivnosti vezanih za ovo nuklearno postrojenje: vraćanje isluženog nuklearnog goriva u zemlju porekla i dekomisija postrojenja primenom strategije neodložne demontaže. Na Simpozijumu 2007. god, prezentovane su aktuelne aktivnosti vezane za dekomisiju RA. Usvojeni su odgovarajući propisi za rad u objektu reaktora RA, formirani su timovi za realizaciju projekata uklanjanja isluženog goriva i dekomisiju reaktora RA i definisane aktivnosti i rokovi izvršenja za period 2004-2015. Pripreme za prepakivanje i transport isluženog goriva reaktora u Rusiju i za otpočinjanje dekomisije reaktora RA odvijale su se u okviru Programa VIND, finansiranog od strane Ministarstva nauke Republike Srbije, uz ekspertsku i tehničku pomoć IAEA i uz očekivane donacije iz inostranstva.

### **7. Sakupljanje, transport i odlaganje RAO**

Rezultati ocene i provere zaštitnih svojstava kontejnera B-2, za transport radioaktivnih materijala, saopšteni su 1972. god. Odeljenje za reaktorske materijale Instituta u Vinči radilo je na razvoju i izradi konstrukcije kontejnera koji pripada ambalaži tipa B, u skladu sa normativnima IAEA. Ispitivanje gotove konstrukcije, uključujući hermetičnost, zaštitna svojstva, izdržljivost na slobodan pad i temperaturu, pokazalo je da kontejner B-2 ima zadovoljavajuću mehaničku izdržljivost i homogenost zaštite od gama zračenja, te se moglo pristupiti serijskoj proizvodnji.

Podaci o stanju i količinama čvrstog RAO u privremenom skladištu u institutu u Vinči, prvi put su izneti na Simpozijumu 1975. god. Istaknuto je da do 1963. god. nije vođena evidencija o godišnjem prinosu čvrstog RAO, niti o njegovom poreklu. U period od 1948. do 1963. god, sakupljeno je oko 3000 komada buradi od 200 L sa nisko aktivnim RAO. Ovaj materijal nalazio se na izdvojenom mestu u krugu Instituta, van zatvorenog skladišnog prostora, izložen dejstvu atmosferilija. Od 1963. god, vođena je evidencija o količinama i poreklu čvrstog RAO koji je skladišten u novoizgrađenom hangaru. Predlog konstrukcije i tehnički podaci o armirano-betonskim kontejnerima za pakovanje radioaktivnog materijala iznet je 1987. godine.

Na Simpozijumu 1997. god, zaključeno je da problem deponovanja RAO iz NE treba rešavati kroz jedinstveni program na nivou Jugoslavije. Sistematizovana su postojeća rešenja odlaganja RAO: u more, u napuštene rudnike soli i u veštačka odlagališta.

Navedeni su sigurnosni kriterijumi koje skladište treba da zadovolji i koji su od NE "Kriško" upućeni Saveznom komitetu za zdravstvo.

Izbor tehnologija obrade tečnog i čvrstog RAO u institutu u Vinči, prezentovan je 1979. god. Predviđen je faktor smanjenja zapremine 3-4, pakovanje voluminoznog otpada i metalnih predmeta u metalnu burad, a zatim betoniranje. Učesnici Simpozijuma 1981. god, iz Instituta "Ruder Bošković" iz Zagreba i "Jožef Stefan" iz Ljubljane, predstavili su strategiju sakupljanja, privremenog i trajnog odlaganja radioaktivnog otpada iz nuklearnih postrojenja.

Mogućnost primene domaćih materijala za izradu betonskih kontejnera u tehnologiji solidifikacije RAO, kao i za izradu maltera za odlaganje i ispunu betonskih tranšaja razmatrana je na Simpozijumu 1983. god. Oko 3000 m<sup>3</sup> tečnog i čvrstog otpada niskog i srednjeg nivoa aktivnosti se u tom trenutku nalazilo na skladištenju u Institutu u Vinči. Kao jedna od prihvatljivih opcija trajnog odlaganja nisko i srednje aktivnog otpada, predloženo je površinsko odlaganje, a istraživački rad je bio usmeren na razvoj postupaka solidifikacije cementnim postupkom, razvoj postupka za dobijanje betonskih kontejnera i recepture za betone za ispunu tranšaja. Cilj rada je bio da pokaže u kojoj meri ovakav koncept, zasnovan na tri barijere, zadovoljava sigurnosne kriterijume i uslove trajnog smeštaja u našoj zemlji sa stanovišta geoloških, klimatskih i drugih specifičnosti. Interesantan je podatak da je u Jugoslaviji bila predviđena izgradnja serije od najmanje šest nuklearnih elektrana do 2000 god, te je problem obrade i odlaganja RAO svih vrsta, uključujući visoko-aktivni, bio značajan.

Program istraživanja i razvoja plitko ukopanih betonskih sistema za odlaganje radioaktivnog otpada u Jugoslaviji predstavljen je na Simpozijumu 1993. god. Zakon o moratorijumu na gradnju nuklearnih elektrana u Jugoslaviji do kraja XX veka već je stupio na snagu, a započeta akcija rešavanja problema trajnog odlaganja RAO dogovorom republika prekinuta je i pre raspada SFRJ. Postojala je velika potreba da se aktuelizuje problem izgradnje skladišta za trajno odlaganje u okviru koga bi se našla odgovarajuća rešenja za sve vrste isluženih izvora.

Na Simpozijumu 1995. godine, bilo je reči o progresu u demontaži i skladištenju radioaktivnih gromobrana, nakon donošenja zakonske obaveze na teritoriji SR Jugoslavije. Ponovo je naglašena potreba obrade nekondicioniranog RAO, tečnog i čvrstog, različitih nivoa vezane aktivnosti, kao i potreba da se dovrši izgradnja postrojenja predviđenih za tu namenu. Reaktorski program WIMSD4, primenjen je za proračun parametara kritičnosti odlagališta ozračenog goriva, a rezultati su pokazali da konfiguracija isluženog goriva smeštenog u bazenu za odlaganje goriva Reaktora RA ispunjava zahteve u pogledu sigurnosti na nuklearnu kritičnost.

Kondicioniranje i privremeno stokiranje radijumskih RAO materijala razmatrano je 1999. god, s obzirom da sigurnost ovakvih paketa RAO mora biti obezbeđena u periodu od 40 godina, nakon čega sledi ponovno kondicioniranje izvora. Predložena rešenja obuhvatala su hermetizaciju <sup>226</sup>Ra zatvaranjem izvora u male kontejnere od volframa i pakovanje pet do deset ovakvih kontejnera u hermetički zatvorenu kolonu od nerđajućeg čelika.

2007. god. je predstavljeno i novo uputstvo o sakupljanju, označavanju i čuvanju RAO materijala u Centru NTI, a za evidenciju pojedinačnih paketa sa radioaktivnim otpadom koristi se elektronska baza podataka "Radioactive Waste Management Registry" dobijena od IAEA.

Konačno, 2013. god, na Simpozijumu DZZ su predstavljeni novi objekti za skladištenje RAO u Republici Srbiji. U cilju poboljšanja stanja sistema upravljanja radioaktivnim



отпадом, u Винчи су изграђени нови објекти за складиштење чврстог радиоактивног отпада, (НЗ) и за безбедно складиштење јаких извора зрачења (BS). Оператор нових објеката за складиштење је Јавно предузеће „Нукlearни објекти Србије“, које је Лиценцу за пробни рад објеката добило 2011. год. Након пробног рада који је трајао 20 недеља и у коме су извршена сва потребна испитивања инфраструктурних, сигурносних и безбедносних система, допуњена документација и извршено допунско обућавање лица која раде у објектима, дозвола за коришћење објеката, тј. пуног погон, је добијена 2012. год. Пуштањем у рад ових објеката је складиштење радиоактивног отпада и извора зрачења у Републици Србији, а уједно и управљање радиоактивним отпадом у целини, значајно унапређено и стављено на виши сигурноси и безбедносни ниво.

### **8. Umesto zaključka**

U proteklih 54 godina, Simozijumi DZZ su bili centralno mesto predstavljanja novih dostignuća i razmene iskustava iz oblasti dekontaminacije, karakterizacije, tretmana i odlaganja RAO, remedijacije kontaminiranih terena, dekomisije nuklearnih postrojenja, i donošenja smernica za upravljanje RAO materijalima. Najvažniji problemi, koji su na skupovima kontinuirano isticani, a ostali aktuelni do današnjih dana, odnose se na tretman i kondicioniranje istorijskog tečnog i čvrstog RAO, dekomisiju reaktora RA i trajno odlaganje RAO na teritoriji Republike Srbije.

### **9. Zahvalnica**

Ovaj rad je podržan od strane Ministarstva za prosvetu, nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije (Projekat III 43009).

### **10. Literatura**

Kao literatura, korišćeni su zbornici radova I - XXIX Simpozijuma Društva za zaštitu od zračenja, koji su dostupni u elektronskoj formi na web-stranici <http://dzz.org.rs/simpozijumi/arhiva-zbornika/>.

**RADIOACTIVE WASTE AND DECONTAMINATION:  
RETROSPECTIVE OF PAPERS PRESENTED ON SYMPOSIUMS  
OF THE RADIATION PROTECTION SOCIETY IN THE PERIOD  
1963 - 2017**

**Ivana SMIČIKLAS, Mihajlo JOVIĆ,  
Marija ŠLJIVIĆ-IVANOVIĆ and Slavko DIMOVIĆ**

*University of Belgrade, Vinča institute of Nuclear Sciences, Belgrade, Serbia,  
[ivanat@vin.bg.ac.rs](mailto:ivanat@vin.bg.ac.rs), [mjovic@vin.bg.ac.rs](mailto:mjovic@vin.bg.ac.rs), [marijasljivic@vin.bg.ac.rs](mailto:marijasljivic@vin.bg.ac.rs),  
[sdimovic@vin.bg.ac.rs](mailto:sdimovic@vin.bg.ac.rs)*

**ABSTRACT**

As inevitable followers of all forms of production and application of nuclear energy, waste materials are produced which do not have the potential for further use and which activity exceeds the limit values prescribed by the legislation. Accidents in the production and application of nuclear energy, manipulation, and transportation of sources of ionizing radiation, and other emergencies in peace and war, contribute significantly to the generation of radioactive waste as well as to the radiation contamination of material assets and objects, the environment and living beings. On the occasion of the jubilee XXX Symposium of the Society for Radiation Protection of Serbia and Montenegro, through the retrospection of the papers presented at the previous meetings, the current topics have been tracked on the timeline of 54 years, as well as the problems, the methodology of work and significant conclusions derived from scientific research and in practice.

## PUŠTANJE U RAD POSTROJENJA ZA PRERADU RADIOAKTIVNOG OTPADA

**Danijela SOLDATOVIĆ, Milutin JEVREMOVIĆ i Dalibor ARBUTINA**

*Javno preduzeće „Nuklearni objekti Srbije”, Beograd, Srbija,  
[danijela.soldatovic@nuklearniobjekti.rs](mailto:danijela.soldatovic@nuklearniobjekti.rs), [milutin.jevremovic@nuklearniobjekti.rs](mailto:milutin.jevremovic@nuklearniobjekti.rs),  
[dalibor.arbutina@nuklearniobjekti.rs](mailto:dalibor.arbutina@nuklearniobjekti.rs)*

### SADRŽAJ

*Od početka rada Instituta za nuklearne nauke „Vinča“, 50-ih godina prošlog veka, radioaktivni otpad (RAO) se sakupljao i neadekvatno skladištio, najpre na otvorenom prostoru, a zatim u namenskim skladištima, hangarima H1 i H2. Izgradnjom novih skladišta H3 i BS, a posebno revitalizacijom laboratorije za transuranske elemente u Postrojenje za preradu RAO, stekli su se uslovi za preradu neadekvatno upakovanog i uskladištenog RAO. U Postrojenju za preradu RAO će se vršiti prerada istorijskog RAO, ali i RAO koji će se generisati u budućnosti u Republici Srbiji. Tehnologija prerade obuhvataće operacije predtretmana (razvrstavanje, prepakivanje i razdvajanje RAO formiranjem posebnih tokova), tretmana (kompaktiranje, uparavanje i imobilizaciju), kao i kondicioniranja isluženih zatvorenih izvora jonizujućih zračenja i demontažu isluženih jonizacionih detektora dima. Osnovni zadatak je da se RAO tretira na takav način da ispuni stroge kriterijume za prijem u nova licencirana skladišta H3 i BS.*

### 1. Uvod

Čvrsti i tečni radioaktivni otpad sakuplja se u kompleksu Vinča od početka rada Instituta za nuklearne nauke „Vinča“ 1948. godine, i skladišti u krugu Instituta „Vinča“. Za skladištenje čvrstog radioaktivnog otpadnog materijala je prvobitno korišćen hangar H1, koji se naziva i „staro skladište“, izgrađen 1967. godine Odlukom Savezne komisije za nuklearnu energiju. Tokom 1982. godine odlukom Vlade biva sagarađen i drugi hangar, H2. Radioaktivni otpadni materijal - RAO, koji se tih godina skladištio u pomenuta dva hangara, poticao je uglavnom od rada reaktora i Laboratorije za radioizotope, kao i od dekontaminacije površina u drugim laboratorijama u Institutu „Vinča“. Pored toga, otpad je preuziman i skladišten i od drugih korisnika radioizotopa. Institut za nuklearne nauke „Vinča“, pristupio je 2005. godine realizaciji Projekta „Sanacija stanja skladišta radioaktivnog otpada“, u okviru međunarodnog Programa nuklearne dekomisije u Institutu „Vinča“ - „VIND“ („VIND - Vinca Nuclear Decommission“). U prvobitnom planu realizacije bila je predviđena izgradnja novih objekata za skladištenje čvrstog radioaktivnog otpada - RAO (hangar H3 i bezbedno skladište jakih izvora zračenja BS) i objekta za procesiranje RAO (WPF – Waste Processing Facility). Ovi objekti trebali su da doprinesu značajnom saniranju veoma lošeg stanja u postojećim objektima za skladištenje RAO (hangarima H1 i H2) i obezbede uslove za tretman i kondicioniranje postojećeg RAO (istorijski otpad i otpad koji je nastao u toku prepakivanja isluženog nuklearnog goriva), RAO koji će nastati u

toku dekomisije reaktora RA, kao i RAO koji se generiše u okviru tekućih aktivnosti u zdravstvenim ustanovama, naučno-istraživačkim organizacijama, kod korisnika izvora zračenja i dr.

Zbog nedostatka sredstava za investicije u budžetu dolazi do realizacije samo I faze pomenutog plana. U toku 2009. godine izgrađen je objekat za skladištenje čvrstog radioaktivnog otpada (H3) i objekat za bezbedno skladištenje jakih izvora zračenja (BS), dok se odustaje od plana izgradnje objekta za procesiranje RAO.

Umesto izgradnje, na osnovu procene eksperata MAAE i UNOPS-a (UNOPS – United Nations Office for Project Services) donosi se odluka da se objekat Latransa - laboratorija za transuranske elemente, revitalizuje u Postrojenje za preradu RAO. Iste godine donosi se nov Zakon o zaštiti od jonizujućih zračenja i o nuklearnoj sigurnosti [1], i Odlukom Vlade Republike Srbije (Sl. glasnik RS, br. 50/09), formira se Javno preduzeće „Nuklearni objekti Srbije“, preuzimanjem dela saradnika, objekata i opreme Instituta za nuklearne nauke „Vinča“. Nakon formiranja, JP „Nuklearni objekti Srbije“ je preuzelo sve operativne aktivnosti vezane za realizaciju započetih investicija. U okviru međunarodnog projekta tehničke saradnje MAAE: SRB3004 „Safely Managing Waste, Sealed Sources, Decommissioning and Site Remediation Activities at the Vinca Institute“ sklopljen je Ugovor između MAAE, JP „Nuklearni objekti Srbije“ i konzorcijuma koji predvodi firma „TECNUBEL S.A.“. Pomenutim Ugovorom je u toku 2015. i 2016. godine realizovana i izvršena sanacija i adaptacija objekta Latransa u Postrojenje za preradu RAO, čime su se stekli uslovi za preradu neadekvatno upakovanog i uskladištenog RAO.



**Slika 1. Lokacija objekta PPO u ograđenom kompleksu za upravljanje RAO (Hangar H1; Hangar H2; Objekat za bezbedno skladištenje jakih izvora zračenja - BS; Objekat za skladištenje čvrstog radiaktivnog otpada - hangar H3; PPO - Postrojenje za preradu otpada.**

### **2. Namena Postrojenja za preradu radioaktivnog otpada (PPO)**

U postrojenju za preradu radioaktivnog otpada (PPO), kao nuklearna aktivnost, vršiće se obrada radioaktivnog otpada trenutno uskladištenog u postojećim starim hangarima H1 i H2, otpada koji će se sakupiti iz samog Instituta „Vinča“, kao i novonastalog RAO od dekomisije RA i drugih korisnika. Otpad će se obraditi na način kojim će se omogućiti njegov siguran transport i dalje sigurno i bezbedno skladištenje u novom hangaru H3 i

bezbednom skladištu BS. Osnovni cilj prerade RAO u postrojenju za preradu radioaktivnog otpada je pripremanje pakovanja RAO kategorisanih prema međunarodno usvojenoj kategorizaciji i obrađenih na takav način da održe integritet pakovanja u periodu privremenog skladištenja, da omoguće proverljivost stanja tokom vremena i da zahtevaju eventualno minimalan dodatni tretman pre konačnog odlaganja. U Postrojenju za preradu radioaktivnog otpada (PPO) će se vršiti obrada radioaktivnog otpada niske i srednje aktivnosti i kondicioniranje isluženih izvora jonizujućih zračenja (u daljem tekstu ZIJZ) i jonizujućih detektora dima (u daljem tekstu JDD).

U PPO-u će se vršiti kondicioniranje izvora kategorije 3 i 4 prepakivanjem u zbirni kontejner, kao i izvora kategorije 5, razdvajanjem JDD i razvrstavanjem aktivnih i neaktivnih komponenti. Izvori kategorije 1 i 2 zahtevaju mnogo veću zaštitu od zračenja (olovni zid, olovno staklo veće debljine i sl.) tako da se njihovo kondicioniranje ne planira u PPO-u već u odgovarajućim „vrućim ćelijama“ na reaktoru RA.

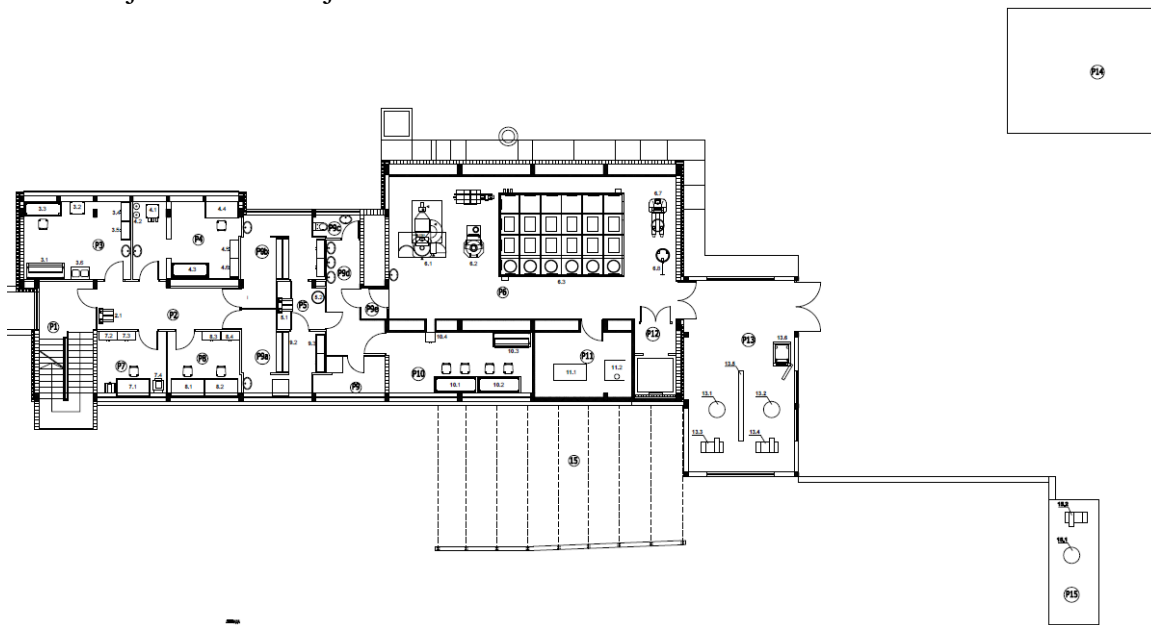


Slika 2. Postrojenje za preradu radioaktivnog otpada (PPO) u kompleksu RAO.

### 3. Opis tehnološkog procesa tretmana RAO u PPO-u

Osnovni cilj obrade RAO u postrojenju za preradu radioaktivnog otpada (PPO) je pripremanje pakovanja RAO u skladu sa Kriterijumima za prijem RAO u H3 i BS. Balans između potrebe da se ukupna zapremina RAO smanji u najvećoj mogućoj meri i za to potrebnih resursa, služi kao opredeljenje za procenu pojedinih operacija ili čitavog procesa prerade određene vrste (toka) otpada. Tehnologija prerade RAO obuhvata sledeće operacije: *i*) transport i prijem ulaznih pakovanja RAO; *ii*) privremeni smeštaj u prijemno-otpremnom prostoru za RAO; *iii*) predkarakterizaciju; *iv*) otvaranje pakovanja RAO; *v*) predtretman (razvrstavanje i razdvajanje, sečenje hidrauličnim alatima, prepakivanje u plastične vreće i novu ambalažu, formiranje posebnih tokova RAO); *vi*) tretman (kompaktiranje, uparavanje), i *vii*) završnu karakterizaciju. Kondicioniranje izvora obuhvata: *i*) identifikaciju izvora; *ii*) merenje aktivnosti izvora; *iii*) proveru curenja izvora; *iv*) demontažu izvora iz kontejnera/kućišta; *v*) prepakivanje u zbirni kontejner. Kondicioniranje JDD obuhvata demontažu izvora iz kućišta na radnim stolovima ili u boksovima sa rukavicama i razdvajanje delova na posebne tokove otpada (RAO, elektronski otpad, plastični otpad, metalni otpad). Predviđeno je da se pojedine vrste otpada tretiraju u kampanjama, zavisno od kapaciteta i tipa potrebnih operacija za

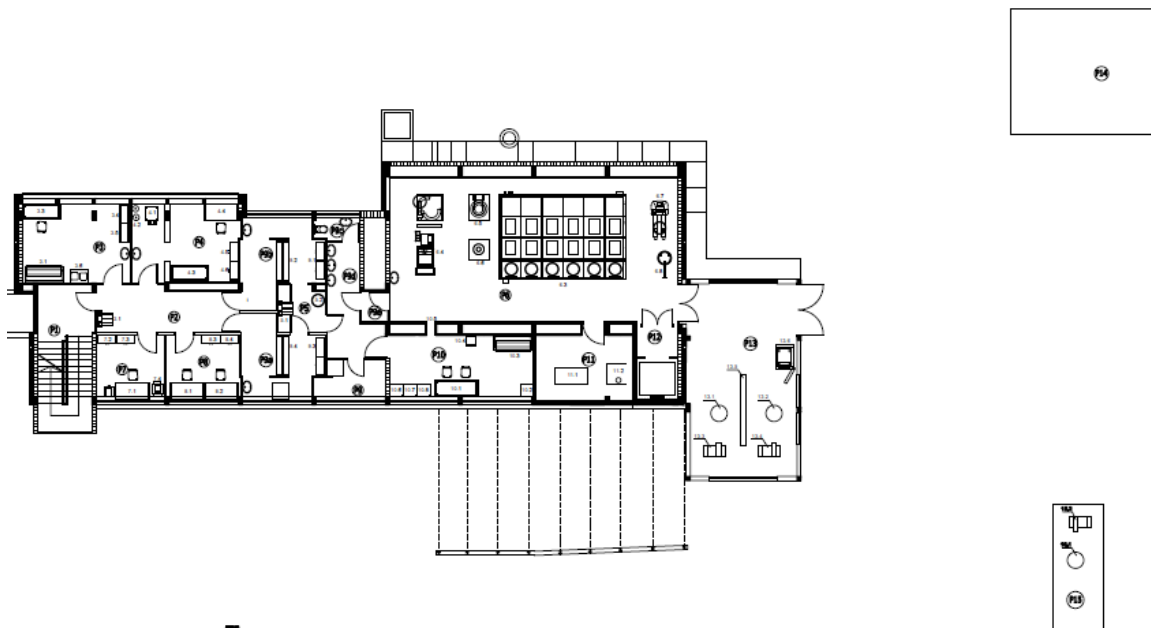
tretman: *i*) stišljivi (kompaktibilni) otpad se tretira kompaktiranjem; *ii*) nestišljivi (nekompatibilni) otpad se pakuje i eventualno zaliva cementnim malterom; *iii*) tečni otpad se tretira postupkom vakuumskog sušenja u evaporatoru (Drum Dryer); *iv*) detektori dima se demontiraju u boksovima sa rukavicama i pakuju u odgovarajuću ambalažu. Postrojenje obuhvata dve koncepcije tehnološkog postupka: tehnološka koncepcija I, koja podrazumeva tretman isključivo čvstog RAO, i tehnološka koncepcija II, koja podrazumeva tretman čvrstog RAO i manjih količina tečnog RAO. U tehnološkoj koncepciji II dolazi do zamene tehnološke opreme u radnoj prostoriji, gde će na mestu oba kompaktora biti instliran uparivač tečnog RAO (Drum Dryer), paleta za ograničavanje razlivanja tečnosti i mešalica za mešanje u buretu (in-drum mixing). Takođe u tehnološkoj koncepciji II, prostorija za demontažu JDD postaje laboratorija za radiohemiju.



**Slika 3. Raspored prostorija i dispozicija opreme u PPO, tehnološka koncepcija I, sa platomom na kom je smeštena prostorija za izlazna pakovnja RAO (trostruki ISO kontejner) i prostorija za završnu karakterizaciju izlaznih pakovanja RAO (standardni ISO kontejner).**

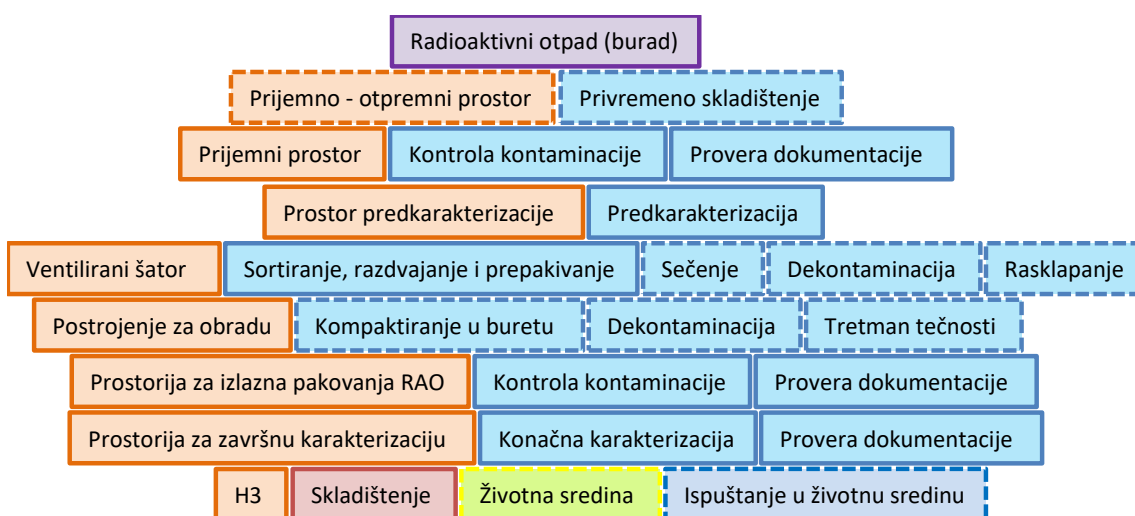
Obzirom da će tretman RAO u PPO biti organizovan u kampanjama, nakon određenog vremena svi JDD biće demontirani i u slučaju pojave pojedinačnih primeraka demontaža može biti obaveljena u boksu sa rukavicama (Pravilnikom o prijavljivanju i evidentiranju izvora jonizujućih zračenja [2], zabranjena proizvodnja i ugradnja JDD u gasovitom stanju). Radne stolove u prostoriji za demontažu JDD zameniće oprema za destruktivnu karakterizaciju RAO: peć za sušenje i žarenje uzoraka RAO, UV/Vis spektrofotometar, mikrotalasni uređaj za razlaganje uzoraka, uređaj za elektroforezu, uređaj za određivanje tačke paljenja, itd. Unošenje uzoraka za merenje i testiranje vršiče se kroz mali prozor za uvođenje uzoraka koji postoji između radne prostorije i Prostorije za demontažu JDD, odnosno Laboratorije za radiohemiju.





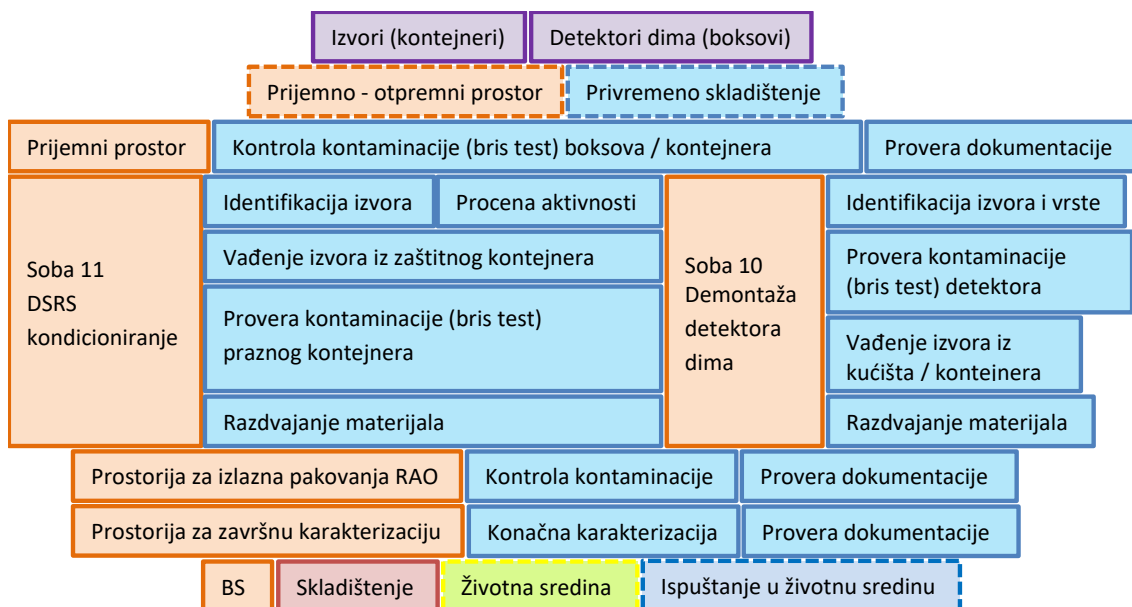
**Slika 4. Raspored prostorija i dispozicija opreme u prizemlju PPO, tehnološka koncepcija II, sa platoom na kom je smeštena prostorija za izlazna pakovnja RAO (trostruki ISO kontejner-P14) i prostorija za završnu karakterizaciju izlaznih pakovanja RAO (standardni ISO kontejner-P15).**

Na slikama 5 i 6 prikazane su šeme tokova za upravljanje RAO (slika 5) i za upravljanje ZIJZ i JDD (slika 6). Narandžastom bojom su prikazane prostorije i mesta na kojima se odvijaju tehnološke operacije i tretmani. Plavom bojom su prikazani procesi (tehnološke operacije i procedure manipulacije dokumentima i RAO), roze bojom prikazano je skladištenje RAO, zelenom bojom životna sredina i svetlo ljubičastom bojom ispuštanje u životnu sredinu odnosno za izuzimanje iz regulatorne kontrole (poslednji red).



**Slika 5. Šema toka za upravljanje RAO.**





Slika 6. Šema toka za upravljanje ZIJZ i JDD.

## 4. Zaključak

Nakon završetka sanacije i adaptacije objekta Latransa, kod nadležnog Ministarstva građevinarstva, saobraćaja i infrastrukture otpočeo je proces ozakonjenja objekta. Objekat je ozakonjen i u međuvremenu je izvršena promena namene objekta u Postrojenje za preradu radioaktivnog otpada. Upravo sa ovim aktivnostima podnet je zahtev za izdavanje Licence za probni rad nuklearnog postrojenja, regulatornom telu, Direktoratu za radijacionu i nuklearnu sigurnost i bezbednost Srbije, u skladu sa Zakonom [3]. Redosled faza ispitivanja u probnom radu Postrojenja za preradu radioaktivnog otpada PPO je sledeći: I faza - testiranje nuklearnog postrojenja bez radioaktivnih i nuklearnih materijala; II faza - testiranje nuklearnog postrojenja sa radioaktivnim i nuklearnim materijalom. Cilj probnog rada PPO je da se dokaže pouzdanost u radu svih infrastrukturnih instalacija i sigurnosnih/bezbednosnih sistema, koji su bitni za siguran i bezbedan rad nuklearnog postrojenja, kako bi moglo da se pređe na narednu fazu rada u licenciranju nuklearnog postrojenja - probni rad sa pakovanjima RAO. Isto tako, probni rad treba da posluži za izradu Konačnog izveštaja o sigurnosti za redovan rad nuklearnog postrojenja PPO. Pored toga, cilj probnog rada je i osvedočenje stručne osposobljenosti i obučenosti zaposlenih za rad u nuklearnom objektu PPO u redovnom pogonu, kao i u slučaju akcidenta.

## 5. Literatura

- [1] Zakon o zaštiti od jonizujućih zračenja i o nuklearnoj sigurnosti. Sl. glasnik RS br. 36/09 i 93/12, 2009 i 2012.
- [2] Pravilnik o prijavljivanju i evidentiranju izvora jonizujućih zračenja. Sl. Glasnik RS br. 25/2011 i 50/2018, 2011 i 2018.
- [3] Zakon o radijacionoj i nuklearnoj sigurnosti i bezbednosti. Sl. glasnik RS, br. 95/18 i 10/19, 2018 i 2019.

## STARTING THE FACILITY FOR RADIOACTIVE WASTE PROCESSING MANAGEMENT

**Danijela SOLDATOVIĆ, Milutin JEVREMOVIĆ and Dalibor ARBUTINA**  
*Public Company "Nuclear Facilities of Serbia", Belgrade, Serbia*  
[danijela.soldatovic@nuklearniobjekti.rs](mailto:danijela.soldatovic@nuklearniobjekti.rs), [milutin.jevremovic@nuklearniobjekti.rs](mailto:milutin.jevremovic@nuklearniobjekti.rs),  
[dalibor.arbutina@nuklearniobjekti.rs](mailto:dalibor.arbutina@nuklearniobjekti.rs)

### ABSTRACT

Since the beginning of the Vinča Institute of Nuclear Sciences, in the 50s of the last century, radioactive waste (RAO) was collected and inadequately stored, first in the open space, then in dedicated warehouses, hangars H1 and H2. The construction of new H3 and BS storage facilities, especially the revitalization of the Laboratory for transuranium elements in the RAO Processing Facility, has resulted in conditions for the processing of inadequately packaged and stored RAO. The RAO Processing Plant will be processing the historical RAO, but also RAO that will be generated in the future in the Republic of Serbia. Processing technology includes operations of pre-treatment (sorting, repacking and separation of RAO by the formation of special flows), treatment (compacting, evaporation and immobilization), and conditioning conditioned closed sources of ionizing radiation and dismantling of spent ionizing smoke detectors. The main task is to treat the RAO in such a way that it meets strict criteria for admission to the new, licensed warehouses H3 and BS.

## BIODOSTUPNOST Mn U ZEMLJIŠTU NAKON *IN SITU* REMEDIJACIJE APATITNIM ADITIVOM

Mihajlo JOVIĆ<sup>1</sup>, Marija EGERIĆ<sup>1</sup>, Marija ŠLJIVIĆ-IVANOVIĆ<sup>1</sup>,  
Biljana DOJČINOVIĆ<sup>2</sup> i Ivana SMIČIKLAS<sup>1</sup>

- 1) Univerzitet u Beogradu, Institut za nuklearne nauke „Vinča“, Beograd, Srbija, [mjovic@vin.bg.ac.rs](mailto:mjovic@vin.bg.ac.rs), [egericmarija@vin.bg.ac.rs](mailto:egericmarija@vin.bg.ac.rs), [ivanat@vin.bg.ac.rs](mailto:ivanat@vin.bg.ac.rs), [marijasljivic@vin.bg.ac.rs](mailto:marijasljivic@vin.bg.ac.rs)
- 2) Univerzitet u Beogradu, Institut za hemiju, tehnologiju i metalurgiju, Beograd, Srbija, [bmatic@chem.bg.ac.rs](mailto:bmatic@chem.bg.ac.rs)

### SADRŽAJ

*Primena apatitnih materijala kao aditiva kontaminiranom zemljištu jedna je od intenzivno proučavanih metoda in situ stabilizacije radionuklida u zemljištu. Istraživanja uticaja tretmana na distribuciju Mn u zemljištu i njegovu biodostupnost su posebno interesantna, s obzirom da je ovaj element esencijalan za biljke. U ovom radu ispitan je efekat različitih doza biogenog apatita (0,3%, 2% i 5%) kao aditiva kiselom zemljištu, na frakciju biodostupnog Mn hemijski ekstrahovanog metodom DTPA, kao i na sadržaj Mn u nadzemnom delu biljke Lolium perenne gajene u pot-eksperimentima na netretiranom i tretiranom zemljištu. Ustanovljeno je da se sa povećanjem količine dodatog bioapatita smanjuje koncentracija Mn u DTPA ekstraktu, kao i u nadzemnom tkivu biljke. Hemijski ekstrahovane i biološki usvojene koncentracije Mn su međusobno bile u pozitivnoj korelaciji ( $R^2 = 0,971$ ,  $p < 0,05$ ). U svim varijantama tretmana DTPA ekstrakt je sadržao koncentracije Mn u granicama koja se smatraju adekvatnim za većinu biljnih kultura.*

### 1. Uvod

Mangan (Mn) je veoma zastupljen element u litosferi i gotovo sav mangan u zemljištu potiče iz matičnog supstrata, a njegova koncentracija u zemljištu je odraz sastava matičnih stena. Ne javlja se kao slobodan element već je u prirodi prisutan kroz brojne minerale tipa oksida, sulfida i u manjoj meri karbonata, silikata i fosfata. U prirodni oksidaciono stanje Mn može da varira od +2 do +7, a najčešći katjon je  $Mn^{2+}$  koji ima sposobnost da lako zamenjuje položaje drugih dvovalentnih katjona, najčešće gvožđa (Fe) sa kojim je i usko povezan u geohemijskim procesima odnosno ciklus kruženja Mn uvek prati ciklus kruženja Fe [1]. Poznato je dvadeset izotopa Mn, a jedini stabilni izotop mangana u prirodi je  $^{55}Mn$ . Radioaktivni izotopi Mn imaju kratak život, osim  $^{53}Mn$  ( $t_{1/2} = 2 \times 10^6$  godina). Izotop  $^{53}Mn$  nastaje u svemiru, izotop  $^{54}Mn$  nađen je u radioaktivnoj prašini nakon nuklearnih eksplozija i nastaje aktivacijom korozivnih produkata konstrukcionih elemenata nuklearnog reaktora, a zajedno s izotopom  $^{56}Mn$  služi kao obeleživač prilikom proučavanja biološke uloge Mn u organizmu čoveka [2]. Sadržaj Mn u stenama kreće se od 350 do 2000 mg/kg, u svetskim zemljištima varira od 411 do 550 mg/kg, dok je prema drugim istraživanjima normalna vrednost ukupnog sadržaja Mn za većinu zemljišta u granicama od 500 do 1000 mg/kg, a srednja vrednost

850 mg/kg [3]. Takođe, kiselina i ilovasta zemljišta imaju veći sadržaj Mn u odnosu na bazna-krećna zemljišta pa je tako nađeno da se ukupan sadržaj Mn u kiselim zemljištima u Srbiji kreće između 560 i 1675 mg/kg, a da značajne razlike u koncentracijama Mn u velikoj meri zavise od načina korišćenja zemljišta (livada, njiva, dr.) [4]. Mangan je od velikog značaja za sve žive organizme (mikroorganizme, više biljke i životinje) i smatra se esencijalnim tj. neophodnim elementom za normalan rast i razvoj [5]. Biljke usvajaju mangan kao  $Mn^{2+}$  jon, a od faktora koji utiču na redukciju Mn iz viših u niža oksidaciona stanja zavisi i kapacitet zemljišta da snabdeva biljke potrebnim količinama Mn [6]. U biljkama, Mn je esencijalan za biosintezu hlorofila, aromatičnih amino kiselina, uključen je u proces proizvodnje kiseonika putem fotosinteze, predstavlja važnu komponentu više enzima, a najvažnija funkcija mu je učesće u različitim oksido-redukcionim procesima i izgradnja otpornosti prema abiotičkim i biotičkim stresovima [1]. Mn može imati ograničavajući faktor na rast biljaka ako je u deficitu ili postaje toksičan ukoliko se nađe u suficitu. Nedostatak Mn u biljkama manifestuje se u obliku internervne hloroze na listovima (žuti listovi na zelenim nervima), smanjenim i usporenim rastom. Mn nedostatak se pojačava primenom alkalnih azotnih i fosfornih đubriva, dodavanjem organskih materija u sušnim periodima, dok pojavu viška Mn u zemljištu podstiče kiselost zemljišta odnosno redukcionni uslovi koji u zemljištu nastaju usled zasićenja vodom, loše obrađenosti, prisustva veće količine organske materije i niske pH vrednosti [6]. Nažalost, Mn se poslednjih decenija, u pojedinim oblastima, pojavljuje kao jedan od toksikanata (i stabilni i radioaktivni izotopi Mn), kao posledica nekontrolisanih antropogenih aktivnosti.

U cilju uklanjanja radionuklida iz zagađenih zemljišta, danas su u upotrebi mnoge klasične procedure remedijacije, ali primena apatitnih materijala kao aditiva kontaminiranom zemljištu jedna je od danas možda i najproučavanijih metoda *in situ* stabilizacije [7, 8]. Osnovni ciljevi ovog rada bili su da se ispituju mogućnosti primene aditiva na bazi apatita (goveđe kosti) na stabilizaciju prisutnog Mn u zemljištu i ispitivanje distribucije i biodostupnosti Mn nakon tretmana uzimajući u obzir da je ovaj element esencijalna za žive organizme, normalan rast i razvoj.

## 2. Materijal i metode

Uzorkovanje zemljišta izvršeno je u selu Slatina, u blizini RTB Bor. Kompozitni uzorak zemljišta uzet je sa dubine od 20 cm, a potom transportovan u laboratoriju. Uzorak zemljišta je osušen do vazdušno suvog stanja (25°C i 72 h), potom su iz njega uklonjene različite nečistoće, a nakon toga je uzorak usitnjen i prosejan kroz sito otvora 2 mm. Fosfatni aditiv (BC) dobijen je tretmanom govedih kostiju koji je obuhvatao odvajanje mesa od kostiju, tretman ključalom vodom, usitnjavanje i žarenje u atmosferi vazduha na 400 °C tokom 4 h [9]. Pripremljeno zemljište zamešavano je sa 0%, 0,3%, 2% i 5% aditiva BC u potovima od po 1 kg u triplikatu. Tako pripremljeni uzorci zalivani su destilovanom vodom u kontinuitetu 2 meseca održavajući 65% kapaciteta zadržavanja vode zemljišta. Nakon tog perioda, iz svakog pota uzeto je po 100 g uzorka za dalje analize, a u same potove posejano je po 200 semenki biljke *Lolium perenne*. Nakon perioda od 20 dana, nadzemni deo biljke (slika 1) je posečen, osušen do konstantne mase (60°C i 48 h) i potom usitnjen. Za određivanje pristupačnog sadržaja Mn u zemljištu, uzorci su ekstrahovani sa DTPA (dietilentriaminpentasilčetna kiselina) rastvorom po metodi ISO 14870 [10]. Biljni materijal, oko  $0,2 \text{ g} \pm 0,0001$ , razaran je u

teflonskim kivetama mikrotalasnom digestijom (MARS 5, CEM Corporation, USA) uz dodavanje 5 mL HNO<sub>3</sub> i 1 mL H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>.



**Slika 1. Izgled biljke *Lolium perenne* gajene u pot-eksperimentima na netretiranom i tretiranom zemljištu (0,3%, 2% i 5% aditiva BC).**

Za određivanje koncentracije Mn u prethodno pripremljenim uzorcima korišćen je sistem indukovano spregnute plazme sa optičkom emisionom spektrometrijom (ICP-OES) uređaj iCAP 6500 Duo (Thermo Scientific, United Kingdom).

### 3. Rezultati i diskusija

Pseudo-ukupan sadržaj Mn u polaznom zemljištu iznosio je 1070±46 mg/kg suvog uzorka (s.u.), a određen je prema metodi US EPA 3051A [11]. U tabeli 1 prikazani su koncentracije Mn (mg/kg s.u.) u DTPA ekstraktima i uzorcima biljaka. Takođe, u tabeli 1 prikazane su i pH vrednosti uzoraka zemljišta, netretirani-kontrolni (0% aditiva) i nakon tretmana (0,3%, 2% i 5%), određene po metodi US EPA 9045D [12].

**Tabela 1. Koncentracije Mn u DTPA ekstraktima uzoraka zemljišta (netretirani/tretirani), pH vrednost uzoraka zemljišta i koncentracija Mn u nadzemnom delu biljke *Lolium perenne*.**

	Koncentracija Mn (mg/kg s.u.)			
	Kontrolno Zemljište	0,3% BC (10 t/ha)	2% BC (60 t/ha)	5% BC (150 t/ha)
pH	4,93	5,49	5,91	6,25
<b>Matriks</b>				
DTPA	56,30	29,23	23,63	16,73
Biljka	138,8	96,93	73,01	64,68

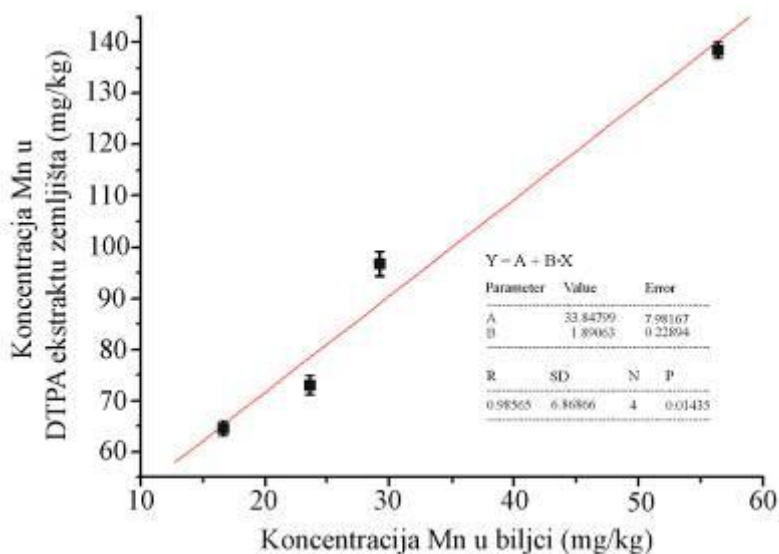
Na osnovu dobijenih rezultata (tabela 1) može se videti da je koncentracija dostupnog Mn u uzorcima zemljišta opadala sa povećanjem količine dodatog aditiva. Dodatak BC aditiva u količini od 5%, ekvivalentno dozi od 150 t/ha, doveo je do značajne stabilizacije Mn u zemljištu i smanjenja koncentracije biodostupnog Mn za skoro 3,5 puta u odnosu na kontrolni uzorak zemljišta. Takođe, sa povećanjem količine dodatog aditiva rasla je pH vrednost uzoraka, odnosno kontrolno kiselo zemljište dovedeno je do umereno kiselog zemljišta (pH 5,6-6,7) u kojem većina poljoprivrednih kultura ima

najbolje uslove za rast i razvoj. Dobijeni rezultati jasno ukazuju da je korišćeni biogeni apatit BC pogodan aditiv za *in situ* stabilizaciju Mn u kontaminiranim zemljištima, međutim izuzetno je važno ispitati i da primenjena metoda remedijacije ne dovede do deficita koncentracije Mn u zemljištu, što takođe može prouzrokovati negativne efekte na žive organizme. Na osnovu dobijenih rezultata i preporučenih limita (tabela 2) [13] upotreba BC nije dovela do smanjenja pristupačnog oblika Mn ispod sadržaja koji se smatra niskim za biljke.

Tabela 2. Ograničenja koncentracija Mn u DTPA ekstraktima zemljišta.

	Mn (mg/kg)
Veoma nedovoljan	< 4
Umereno nedovoljan	4 - 8
Adekvatan	8 - 80
Prekomeran	> 80

Sa porastom količine BC u zemljištu opadala je i koncentracija Mn u nadzemnom delu biljke *Lolium perenne*. Dobijena je pozitivna linearna korelacija između koncentracije Mn u DTPA ekstraktima zemljišta i koncentracije Mn u biljkama (slika 2) što u potpunosti verifikuje primenjenu metodu remedijacije.



Slika 2. Linearna korelacija koncentracija Mn u DTPA ekstraktima zemljišta i biljkama.

#### 4. Zaključak

Koncentracija dostupnog Mn u uzorcima zemljišta opadala je sa povećanjem količine dodatog biogenog apatitnog aditiva BC. Dodatak BC aditiva u količini od 5% doveo je smanjenja koncentracije biodostupnog Mn za skoro 3,5 puta u odnosu na kontrolni (netretirani) uzorak zemljišta, uz povećanje pH vrednosti na 6,2 odnosno pH oblast umereno kiselog zemljišta u kojem većina poljoprivrednih kultura ima najbolje uslove za rast i razvoj. Stabilizacija odnosno smanjenje dostupnog Mn u zemljištu praćena je



smanjenjem koncentracije Mn u nadzemnom delu biljke uz značajnu pozitivnu linearnu korelaciju hemijski ekstrahovane i biološki usvojene koncentracije Mn ( $R^2 = 0,971$ ,  $p < 0,05$ ). Bitno je napomenuti da upotreba BC aditiva u dozama do 5% nije dovela do smanjenja pristupačnog oblika Mn ispod sadržaja koji se smatra niskim za biljke, ali ipak treba povesti računa o dozama jer prekomerna upotreba BC aditiva potencijalno bi mogla da smanji fito-dostupnost Mn i drugih mikronutrijenata, i posledično indukovati nedostatak esencijalnih elemenata (uključujući i Mn) u zavisnosti od njihovog nivoa u kontaminiranom zemljištu.

### 5. Zahvalnica

Ovaj rad je podržan od strane Ministarstva za prosvetu, nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije (Projekat III 43009).

### 6. Literatura

- [1] A.D. Papludis, S.Č. Alagić, S.M. Milić. Mangan u sistemu zemljište-biljka: aspekti fitoremedijacije. *Zaštita Materijala* 59(3), 2018, 385 - 393.
- [2] M. Pribanić. Mangan, In: *Tehnička enciklopedija*, 7. svezak, Ke-Međ, Ed., Leksikografski zavod Miroslav Krleža, Zagreb, 1980, 654-664.
- [3] M.Jelić, J. Milivojević, G. Dugalić. Sadržaj i mobilnost mangana u kiselim zemljištima centralne Srbije. *Zbornik radova XXI Savetovanje o biotehnologiji*, 11-12. mart 2016, Čačak, Srbija, Vol. 21 (23), 2016, 27-32.
- [4] J. Milivojevic, I. Đalovic, M. Jelić, S. Trifunovic, D. Bogdanovic, D. Milosev, B. Nedeljkovic, D. Bjelic. Distribution and forms of manganese in vertisols of Serbia. *J. Serb. Chem. Soc.* 76, 2011, 1177-1190.
- [5] G. Ludajić. Uticaj blizine frekventnih saobraćajnica na sadržaj toksičnih elemenata u zemljištu i pšenici. Doktorska disertacija, Univerzitet u Novom Sadu, Tehnološki fakultet, 2014.
- [6] M. Ubavić, D. Bogdanović, D. Agrohemiya. Institut za ratarstvo i povrtarstvo, Novi Sad, 2001, 138-150.
- [7] Q.Y. Ma, S.J. Traina, T.J. Logan, J.A. Ryan. *In situ* lead immobilization by apatite. *Environ. Sci. & Technol.* 27(9), 1993, 1803-1810.
- [8] R.J. Stevenson, L.A. Harris, D. Peery, J.R. Hall, J.L. Shoemaker, R.J. Jarabek, E.B. Munday. Final report: Use of apatite for chemical stabilization of subsurface contaminants. Work Performed Under Contract: DE-AC26-01NT41306. U.S. Department of Energy, Tennessee, USA, 2003.
- [9] S. Dimović, I. Smičiklas, I. Plećaš, D. Antonović, M. Mitrić. Comparative study of differently treated animal bones for  $Co^{2+}$  removal. *J. Hazard. Mater.* 164, 2009, 279-287.
- [10] ISO 14870, International Standard ISO. *Soil quality - Extraction of trace elements by buffered DTPA solution*. Reference number ISO 14870:2001(E), Switzerland, 2001.
- [11] US EPA Method 3051A, U.S. Environmental Protection Agency. Microwave



Assisted Acid Digestion of Sediments, Sludges, Soils, and Oils. SW-846: Test Methods Evaluation Solid Waste, Physical/Chemical Methods. U.S. Environmental Protection Agency: USA, 2007.

- [12] US Environmental Protection Agency. Test Methods for Evaluating Solid Waste, Physical and Chemical Methods, SW 846, Test Method 9045D: Soil and Waste pH. U.S. Government Printing Office Washington D.C, 2004.
- [13] M. Pantović, R. Džamić, M. Petrović, M. Jakovljević. *Praktikum iz agrihemije*. Naučna knjiga, Beograd, 1989.

### **Mn BIOAVAILABILITY IN SOIL AFTER *IN SITU* REMEDIATION WITH APATITE ADDITIVE**

**Mihajlo JOVIĆ<sup>1</sup>, Marija EGERIĆ<sup>1</sup>, Marija ŠLJIVIĆ-IVANOVIĆ<sup>1</sup>,  
Biljana DOJČINOVIĆ<sup>2</sup> and Ivana SMIČIKLAS<sup>1</sup>**

- 1) *University of Belgrade, Vinča institute of Nuclear Sciences, Belgrade, Serbia,*  
[mjovic@vin.bg.ac.rs](mailto:mjovic@vin.bg.ac.rs), [egericmarija@vin.bg.ac.rs](mailto:egericmarija@vin.bg.ac.rs), [ivanat@vin.bg.ac.rs](mailto:ivanat@vin.bg.ac.rs),  
[marijashljivic@vin.bg.ac.rs](mailto:marijashljivic@vin.bg.ac.rs)
- 2) *University of Belgrade, Institute of Chemistry, Technology and Metallurgy,*  
*Belgrade, Serbia,* [bmatic@chem.bg.ac.rs](mailto:bmatic@chem.bg.ac.rs)

#### **ABSTRACT**

The use of apatite materials as additives to contaminated soil is one of the intensively studied *in situ* stabilization method for radionuclides in the soil. Investigation of the treatment effects on the Mn distribution in the soil and its bioavailability are particularly interesting, since this element is essential for plants. In this paper, the effect of various doses of biogenic apatite (0.3%, 2% and 5%) as an additive to acid soil, was investigated in relation to the bioavailable Mn fraction chemically extracted by DTPA method and to the Mn content in the above-ground part of the *Lolium perenne* plant, cultivated on untreated and treated soils in pot experiments. It was found that the increase in the amount of added bioapatite decreases the concentration of Mn in the DTPA extract, as well as in the above-ground tissue of the *Lolium perenne* plant. Chemical extracted and biologically accepted Mn concentrations were in positive correlation ( $R^2 = 0.971$ ,  $p < 0.05$ ). In the all treatment variants, the DTPA extracts contained Mn concentrations within the limits considered to be adequate for most plant cultures.

## MODELOVANJE SORPCIONIH IZOTERMI JONA Ni(II) NA OTPADNIM CEMENTNIM MATERIJALIMA

Marija ŠLJIVIĆ-IVANOVIĆ<sup>1</sup>, Ivana JELIĆ<sup>2</sup>, Slavko DIMOVIĆ<sup>1</sup>,  
Mihajlo JOVIĆ<sup>1</sup>, Vojislav STANIĆ<sup>1</sup> i Ivana SMIČIKLAS<sup>1</sup>

- 1) Univerzitet u Beogradu, Institut za nuklearne nauke "Vinča", Beograd, Srbija,  
[marijasljivic@vin.bg.ac.rs](mailto:marijasljivic@vin.bg.ac.rs), [sdimovic@vin.bg.ac.rs](mailto:sdimovic@vin.bg.ac.rs), [mjovic@vin.bg.ac.rs](mailto:mjovic@vin.bg.ac.rs),  
[voyo@vin.bg.ac.rs](mailto:voyo@vin.bg.ac.rs), [ivanat@vin.bg.ac.rs](mailto:ivanat@vin.bg.ac.rs)
- 2) Istraživačko-razvojni Institut Lola, Beograd, Srbija, [ivana.jelic@li.rs](mailto:ivana.jelic@li.rs)

### SADRŽAJ

Otpadni cementni materijali (beton i fasada) su bazirani na kvarcu i kalcitu. Prvenstveno zahvaljujući kalcitu i baznom karakteru, ove matrice su pokazale visok afinitet prema jonima nikla. Ispitivanje uticaja početne koncentracije jona Ni u rastvoru na sorbovanu količinu omogućava definisanje sorpcionih izotermi. U ovom radu su prikazani rezultati matematičkog modelovanja izotermi Langmuir-ovim i Freundlich-ovim modelom. Langmuir-ov model znatno bolje opisuje eksperimentalne podatke dobijene za sorpciju na betonu, dok je sorpcija otpadnom fasadom bolje opisana Freundlich-ovom izotermom.

### 1. Uvod

Građevinski otpad je prema dostupnim podacima najzastupljeniji u ukupnom otpadu. Sastoji se od različitih materijala kao što su cementni (beton, malter), keramički (puna i šuplja opeka, crep ili keramičke pločice), materijali na bazi bitumena (asfalt), drvo, staklo, čelik i drugi proizvodi od metala, razne plastične mase i slično. Reciklaža i ponovna upotreba građevinskog otpada je najizraženija u oblasti proizvodnje građevinskog materijala, a poslednjih godina se sve više istražuju kao sorbenti, u cilju prečišćavanja otpadnih voda [1], njihove neutralizacije [2] ili u tretmanu tečnog radioaktivnog otpada [3–5].

Kondicioniranje radioaktivnog otpada podrazumeva operacije transformacije u forme pogodne za kasniju manipulaciju (rukovanje, prevoz, privremeno skladištenje i trajno odlaganje). Proces sorpcije je metod pogodan za tretman radioaktivnog otpada sa ciljem koncentrisanja radionuklida u čvrstom matriksu koji bi dalje bio solidifikovan u odgovarajuće cementne, staklene ili polimerne forme.

Radionuklidi koji su često prisutni u tečnom radioaktivnom otpadu i kao takvi, interesantni za istraživanje su <sup>60</sup>Co, <sup>63</sup>Ni, <sup>90</sup>Sr i <sup>137</sup>Cs itd [6]Error! Reference source not found.

U ovom radu su dati rezultati modelovanja sorpcionih izotermi jona Ni(II) otpadnim betonom i fasadom Langmuir-ovom i Freundlich-ovim matematičkim modelom.

## 2. Eksperimentalni deo

Sakupljeni su kompozitni uzorci otpadnog betona i fasade čije je vreme starenja duže od 40 godina. Fizičko-hemijska karakterizacija materijala je pokazala da je usled starenja materijala, u betonu najzastupljenija kristalna faza kvarc uz primese kalcita, dok je kod fasade uočeno i prisustvo muskovita [5]. Ispitivanjem aktivnosti prisutnih  $\gamma$ -emitera i određivanjem pH vrednosti ovih otpadnih materijala, pokazano je da ne predstavljaju opasnost po zdravlje i životnu sredinu.

U cilju definisanja sorpcionog kapaciteta ispitanih materijala prema jonima Ni, konstruisane su sorpcione izoterme na osnovu rezultata eksperimenata u kojima je varirana početna koncentracija vodenog rastvora Ni(II) od  $5 \times 10^{-4}$  do  $3 \times 10^{-3}$  mol/L tokom 24 h na sobnoj temperaturi [5].

Grafik zavisnosti sorbovanih ravnotežnih količina  $q_e$  od rezidualne koncentracije jona metala u rastvoru ( $c_e$ ) predstavlja sorpcionu izotermu. Dobijene krive su fitovane najčešće korišćenim modelima, Langmuir-ovim i Freundlich-ovim modelom.

## 3. Rezultati i diskusija

Sorpcione izoterme Ni(II) jona na otpadnim cementnim materijalima su date na slici 1. Maksimalno sorbovana količina je 0,130 mmol/g na betonu i 0,300 mmol/g na fasadi. Poređenjem sa dostupnim literaturnim podacima vezanim za sorpciju Ni(II) jona na otpadnim materijalima, utvrđeno je da ispitani građevinski materijali na bazi cementa poseduju viši sorpcioni kapacitet u odnosu na isprani (0,372 mmol/g) i termički tretirani crveni mulj (0,470 mmol/g) [7]. Takođe, pokazano je da je višestruko niži sorpcioni kapacitet kiselinski tretiranog crvenog mulja [8], letećeg pepela, keramičkih pločica i crepa [3], asfalta i različitih vrsta cigli [5]. Poređenjem sa prirodnim mineralima, maksimalni sorpcioni kapacitet šabazita je 0,076 mmol/g, a klinoptilolita 0,008 mmol/g [9].

Primenjeni modeli su:

Langmuir-ova izoterma data sledećim izrazom [10]:

$$Q_e = \frac{q_m \cdot K_L \cdot C_e}{1 + K_L \cdot C_e} \quad (1)$$

čija je najčešće korišćena linearna forma predstavljena izrazom:

$$\frac{C_e}{Q_e} = \frac{C_e}{Q_m} + \frac{1}{q_m \cdot K_L} \quad (2)$$

Freundlich-ova izoterma je data nelinearnom jednačinom [11]:

$$Q_e = K_F \cdot C_e^n \quad (3)$$

dok je njen linearizovani oblik dat sledećim izrazom:

$$\ln Q_e = \ln K_F + n \cdot \ln C_e \quad (4)$$

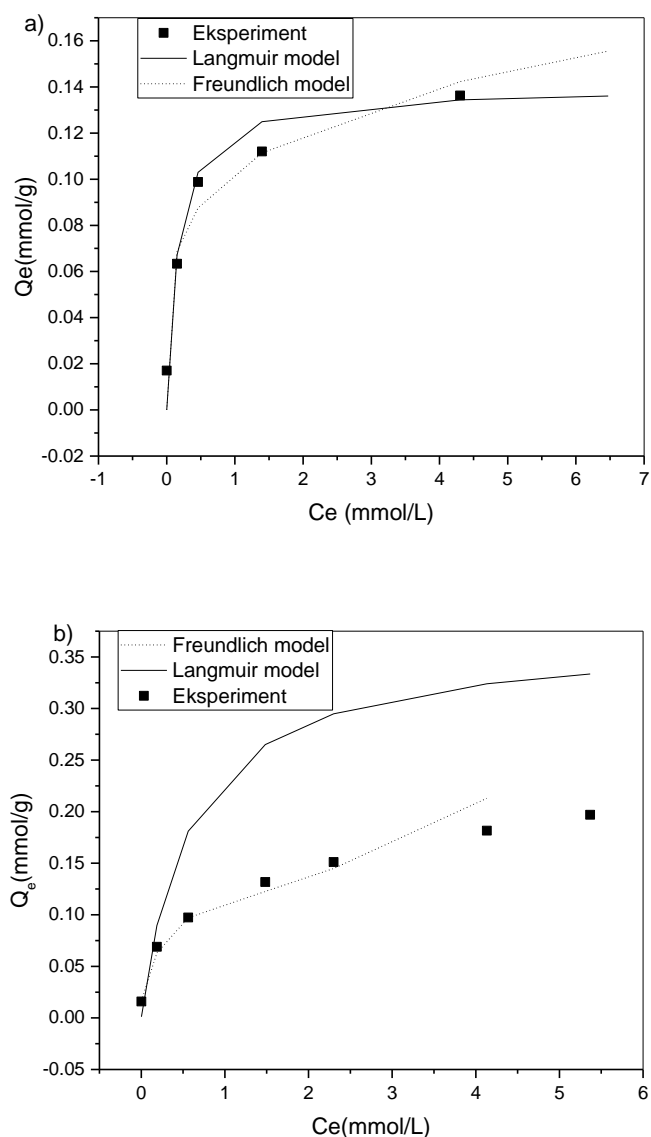
gde su u jednačinama (1-4):

$C_e$  - ravnotežna koncentracija jona u tečnoj fazi [mmol/L];  $Q_e$  - ravnotežna koncentracija jona na čvrstoj fazi [mmol/g];  $q_m$  - maksimalni sorpcioni kapacitet [mmol/g];  $K_L$  - Langmuir-ova konstanta koja se odnosi na energiju adsorpcije [L/mmol],  $K_F$ ,  $n$  - parametri Freundlich-ove izoterme:  $K_F$  [(mmol<sup>1-n</sup>·dm<sup>3n</sup>/g)],  $n$  bezdimenzioni parametar.

**Tabela 1. Konstante za Langmuir-ov i Freundlich-ov model izoterme.**

<b>Langmuir model</b>			
	$q_m$	$K_L$	$R^2$
<b>beton</b>	0,1395	6,130	0,995
<b>fasada</b>	0,3700	1,705	0,912
<b>Freundlich model</b>			
	$n$	$K_F$	$R^2$
<b>beton</b>	0,2172	0,1036	0,926
<b>fasada</b>	0,3130	0,1165	0,989

Na osnovu eksperimentalno dobijenih podataka, primenom jednačina (2) i (4) izračunati su parametri primenjenih matematičkih modela (tabela 1).



**Slika 1. Sorpcione izoterme Ni(II) jona na: a) betonu i b) fasadi.**

Korišćenjem vrednosti parametara datih u tabeli 1, konstruisane su teorijske sorpcione izoterme predstavljene na slici 1.

Na osnovu  $R^2$  vrednosti kao i na osnovu grafičkog prikaza, uočava se znatno bolje poklapanje eksperimentalnih vrednosti sa Langmuir-ovim modelom u slučaju betona, odnosno sa Freundlich-ovim modelom u slučaju fasade. Izračunati maksimalni sorpcioni kapaciteti primenom Langmuir-ovog modela su u saglasnosti sa eksperimentalno dobijenom vrednošću za fasadu. Nagib prave ( $n$ ) date jednačinom (4) je manji od jedan što ukazuje na uspostavljanje jačih veza sorbent-sorbat, tj. najčešće na hemisorpciju, ali i na činjenicu da se radi o sorpciji na heterogenim površinama, tj. aktivnim centrima različitih energija aktivacije. Prema literaturnim podacima, za opis rezultata sorpcione ravnoteže jona Ni(II) na građevinskim komponentama su korišćeni različiti modeli. Tako, na primer, sorpcija Ni(II) jona na crepu se bolje opisuje Freundlich-ovom izotermom, dok su za sorpciju na keramičkim pločicama podjednako dobra oba modela [3].

#### 4. Zaključak

Ispitivanjem sorpcije jona Ni(II) na uzorku betona i fasade, pokazano je da ispitane čvrste matrice poseduju visok sorpcioni kapacitet. Krive dobijene kao zavisnost sorbovane količine u čvrstoj fazi od rezidualne koncentracije jona u tečnoj fazi nakon dostizanja ravnoteže su fitovane različitim modelima izoterma. Pokazano je da je sorpcija otpadnom fasadom bolje opisana Freundlich-ovom izotermom, dok je sorpcija na betonu bolje opisana Langmuir-ovim modelom.

#### 5. Zahvalnica

Ovaj rad je podržan od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja republike Srbije (Projekat III 43009 i TR34023).

#### 6. Literatura

- [1] Ş. Kubilay, R. Gürkan, A. Savran, T. Şahan. Removal of Cu(II), Zn(II) and Co(II) ions from aqueous solutions by adsorption onto natural bentonite. *Adsorption*. 13, 2007, 41–51.
- [2] H. Raclavská, M. D. H. Škrobánková. Potential utilization of crushed concrete in the acid mine drainage treatment. Proceedings 12th International Conference of Environment and Mineral Processing Part III, VŠB- Technical University, Ostrava, 2008, 147–154.
- [3] I. Jelić, M. Šljivić-Ivanović, S. Dimović, D. Antonijević, M. Jović, R. Šerović, I. Smičiklas. Utilization of waste ceramics and roof tiles for radionuclide sorption. *Process Saf. Environ. Prot.* 105, 2017, 348–360.
- [4] M. Šljivić-Ivanović, I. Jelić, S. Dimović, D. Antonijević, M. Jović, A. Mraković, I. Smičiklas. Exploring innovative solutions for aged concrete utilization: treatment of liquid radioactive waste. *Clean Technol. Environ. Policy*. 20, 2018, 1343–1354.
- [5] I. Jelić, M. Šljivić-Ivanović, S. Dimović, D. Antonijević, M. Jović, M. Mirković, I. Smičiklas. The applicability of construction and demolition waste components

- for radionuclide sorption. *J. Clean. Prod.* 171, 2018, 322–332.
- [6] Handling and Treatment of Radioactive Aqueous Wastes. No. 654, IAEA, Vienna, 1992.
- [7] S. Smiljanić, I. Smičiklas, A. Perić-Grujić, B. Lončar, M. Mitrić. Rinsed and thermally treated red mud sorbents for aqueous Ni<sup>2+</sup> ions. *Chem. Eng. J.* 162, 2010, 75–83.
- [8] I. Smičiklas, S. Smiljanić, A. Perić-Grujić, M. Šljivić-Ivanović, M. Mitrić, D. Antonović. Effect of acid treatment on red mud properties with implications on Ni(II) sorption and stability. *Chem. Eng. J.* 242, 2014, 27–35.
- [9] S. Babel. Low-cost adsorbents for heavy metals uptake from contaminated water: A review. *J. Hazard. Mater.* 97, 2003, 219–243.
- [10] I. Langmuir. The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum. *J. Am. Chem. Soc.* 40, 1918, 1361–1403.
- [11] H. Freundlich. *Capillary and colloid chemistry*, Methuen and Co. Ltd., London, 1926.

### **SORPTION ISOTHERM MODELING FOR Ni(II) SORPTION ON TO WASTE CEMENTOUS MATERIALS**

**Marija ŠLJIVIĆ-IVANOVIĆ<sup>1</sup>, Ivana JELIĆ<sup>2</sup>, Slavko DIMOVIĆ<sup>1</sup>,  
Mihajlo JOVIĆ<sup>1</sup>, Vojislav STANIĆ<sup>1</sup> and Ivana SMIČIKLAS<sup>1</sup>**

1) *University of Belgrade, Vinča Institute of Nuclear Sciences, Belgrade, Serbia,*  
[marijasljivic@vin.bg.ac.rs](mailto:marijasljivic@vin.bg.ac.rs), [sdimovic@vin.bg.ac.rs](mailto:sdimovic@vin.bg.ac.rs), [mjovic@vin.bg.ac.rs](mailto:mjovic@vin.bg.ac.rs),

[voyo@vin.bg.ac.rs](mailto:voyo@vin.bg.ac.rs), [ivanat@vin.bg.ac.rs](mailto:ivanat@vin.bg.ac.rs)

2) *Research and Development Institute Lola Ltd., Belgrade, Serbia,* [ivana.jelic@li.rs](mailto:ivana.jelic@li.rs)

#### **ABSTRACT**

Waste cementous materials like concrete and facade are primary consisted of quartz and calcite minerals. As a consequence of calcite content as well as strong alkalinity, these matrices showed high sorption potential toward nickel ions. The investigation of initial Ni concentration effect onto sorbed amounts, enabled the sorption isotherm curves determination. In this paper are given results of mathematical modelling using Langmuir and Freundlich model. The better sorption data description was obtained using Langmuir model in the case of concrete sample, while, Freundlich model was more suitable for description of sorption onto facade.





**РЕГУЛАТИВА, ЕДУКАЦИЈА И ЈАВНО  
ИНФОРМИСАЊЕ**



## Прегледни рад-предавање по позиву

### РЕГУЛАТИВА НА СИМПОЗИЈУМИМА ДРУШТВА ЗА ЗАШТИТУ ОД ЗРАЧЕЊА

**Ивана АВРАМОВИЋ**

*Директорат за радијациону и нуклеарну сигурност и безбедност Србије  
Београд, Србија, [avramovic@srbatom.gov.rs](mailto:avramovic@srbatom.gov.rs)*

#### САДРЖАЈ

*Прошло је шездесет година од доношења првог системског закона у области заштите од јонизујућег зрачења. За то време, на симпозијумима Друштва за заштиту од зрачења, тема регулативе је од спорадичног помињања у појединачним радовима дошла до засебне секције. Доношењу нових закона у области по правилу је претходило представљање нових решења и промена у међународним стандардима.*

#### 1. Увод

Протекло је шездесет година од доношења првог закона у области заштите од јонизујућег зрачења па је овај јубиларни тридесети Симпозијум прилика да се сумирају резултати и анализира развој регулаторног оквира као и заступљеност ове теме у зборницима радова и секцијама на симпозијумима.

За протеклих шездесет година донето је укупно осам закона о заштити од јонизујућих зрачења [1-8] при чему треба имати у виду да су у једном периоду, паралелно са савезним законом на снази били и републички закони који су уређивали ову област.

Свест о потреби успостављања регулаторног оквира, његов развој и промене током времена утицали су и на заступљеност ове теме на симпозијумима Друштва и у радовима објављеним у зборницима. Тематска секција која се бави општим питањима, регулативом и едукацијом први пут је установљена пре педесет година на Четвртом симпозијуму о радиолошкој заштити одржаном у Башком Пољу 1969. године.

#### 2. Развој регулаторног оквира

Најстарији пропис из области потиче из 1947. године и односи се на заштитне мере при раду са рендгенским уређајима и радиоактивним материјама [9]. Чак 20 од укупно 71 члана овог правилника регулише заштиту од електричне струје високог напона. Други одељак правилника бави се заштитом од рендгенског зрачења („рентгенских зракова“) и у њему су дате табеле са еквивалентима олова, фактори за прорачунавање заштитних вредности за поједине материјале као и мере заштите медицинског особља и пацијената. Трећи одељак овог правилника прописује мере заштите од радиоактивног зрачења приликом радиотерапије односно примене „радиоактивних фокуса“ или „радиофора“.

Контрола промета радиоактивних изотопа први пут је регулисана 1958. године [10].

Закон о заштити од јонизујућих зрачења [1] донет 1959. године је први закон у овој области. На његово доношење у великој мери је утицао акцидент на реактору РБ у Винчи који се догодио 15. октобра 1958. године као и припреме за пуштање у рад реактора РА [11]. У члану 1. се каже да се „у циљу заштите од штетног дејства јонизујућих зрачења стављају (се) под надзор по одредбама овог закона извори тих зрачења, као и сва лица, материје и предмети изложени овим зрачењима.“ У члану 3. се наводи да поред извора јонизујућих зрачења, надзору подлеже и рад са изворима, зграде, делови зграда и просторије, атмосфера, тле, вода, људска и сточна храна и отпадни материјали, прибори за личну и колективну заштиту, особље које ради са изворима јонизујућих зрачења као и становништво и појединци који под било којим околностима дођу или могу доћи под утицај јонизујућих зрачења. Чланом 5. се уводи обавеза организовања службе за заштиту од јонизујућих зрачења. Законом се прописују надлежности Савезне комисије за нуклеарну енергију која је основана 1955. године а које се односе на локацију и изградњу објеката и постројења, набављање, коришћење и стављање у промет извора зрачења, евиденцију извора зрачења, контролу атмосфере, воде, хране и тла. Прописани су и услови за заштиту особља као и њихова права у погледу пензионог осигурања. У посебном одељку су наведене казнене одредбе. Организација службе за вршење инспекцијских послова, дужности и овлашћења инспектора и поступак при вршењу службе прописују се уредбом савезног извршног већа. У посебном члану наведени су прописи које доноси Савезна комисија за нуклеарну енергију.

Основни закон о заштити од јонизујућих зрачења [2] донет 1965. године наводи списак од десет послова заштите од јонизујућих зрачења. Између осталог то су организовање службе за заштиту од јонизујућих зрачења, мерење степена изложености радних места и утврђивање примљених доза и контрола здравственог стања лица на тим радним местима, утврђивање доза које прима становништво, утврђивање контаминације људске и сточне хране, земљишта, воде, ваздуха и радних просторија и спровођење деконтаминације, утврђивање и проверавање исправности мерних инструмената и заштитних средстава и поступање са радиоактивним отпадом. Овим законом уведена је обавеза утврђивања плана мера за заштиту од евентуалних удеса проузрокованих нуклеарним машинама (реактори, акцелератори и др.) или нуклеарним енергетским реакторима а који обухвата, поред заштите лица изложених зрачењу при раду, и заштиту становништва од штетног дејства зрачења у ближој и даљој околини. Уводи се забрана рада са изворима јонизујућих зрачења за лица млађа од 18 година и жене за време целог тока трудноће, а ако се ради о отвореним изворима – за жене за време дојења детета. Приметно је у овом закону да су бројне надлежности Савезне комисије за нуклеарну енергију пренете на друге савезне органе (Савезни секретаријат за здравствену и социјалну политику и Савезни завод за здравствену заштиту) као и републичке органе па је тако у њеном делокругу рада остало само давање сагласности за изградњу и реконструкцију објеката у којима се намеравају сместити нуклеарни реактори, акцелератори, лабораторије за високе активности и др. као и одређивање места и обезбеђивање средстава за одлагање радиоактивног отпада. Чланом 31. прописано је да надзор над спровођењем мера заштите од јонизујућих зрачења врше

републички органи надлежни за послове санитарне инспекције. Чланом 40. прописано је да се о спровођењу послова заштите од јонизујућих зрачења стара Савезни секретаријат за здравство и социјалну политику у сарадњи са Савезном комисијом за нуклеарну енергију, органима управе надлежним за послове цивилне заштите и другим удружењима, органима и организацијама. Прописе у области заштите од јонизујућих зрачења доноси савезни секретар за здравство и социјалну политику.

Закон о заштити од јонизујућих зрачења [3] који је донет 1976. године додатно проширује овлашћења република и покрајина. Савезна комисија за нуклеарну енергију је укинута 1970. године одлуком Савезног извршног већа па је овим Законом прописано да сагласност за локацију, пробни рад и пуштање у рад нуклеарних постројења издаје републички односно покрајински орган. У члану 10. се каже да уколико такво постројење може проузроковати опасност од радиоактивне контаминације у две или више република односно аутономних покрајина мора се прибавити сагласност надлежних органа у тим републикама односно покрајинама. Надзор над спровођењем мера за заштиту од јонизујућих зрачења врше републички односно покрајински органи осим надзора над прометом извора зрачења преко државне границе коју врши савезни орган за послове здравства.

Слободно се може рећи да Закон о заштити од јонизујућих зрачења и о посебним мерама сигурности при коришћењу нуклеарне енергије [4] донет 1984. године представља значајан искорак у односу на претходне законе. Очигледно је да је изградња нуклеарне електране „Кршко“ условила да се значајна пажња у овом Закону посвети мерама нуклеарне сигурности. Уводи се дефиниција нуклеарних објеката а као мера заштите од јонизујућег зрачења први пут је наведена физичка заштита нуклеарних објеката и нуклеарних материјала. У посебном одељку овог Закона прописане су мере сигурности нуклеарних објеката и нуклеарних материјала као и образовање комисије за сигурност нуклеарних објеката коју именује савезни орган управе надлежан за послове нуклеарне енергије. Прописани су услови за локацију, изградњу и коришћење нуклеарних објеката, услови за промет нуклеарних материјала, обавезе у вези са евиденцијом и контролом нуклеарних материјала као и физичком заштитом нуклеарних објеката, нуклеарних материјала и радиоактивних отпадних материја. Надзор над спровођењем овог Закона врше републички односно покрајински органи осим надзора над прометом извора зрачења преко државне границе коју врши савезни орган управе за послове здравства и савезни орган управе надлежан за унутрашње послове. Овим Законом се уводи обавеза уклањања радиоактивних громобрана на школским и другим јавним зградама које служе за боравак деце и омладине.

Закон о заштити од јонизујућих зрачења и о нуклеарној сигурности [5] донет 1991. године први пут уводи појам „радијациони ризик“ као „опасност озрачивања људи и животне средине јонизујућим зрачењима, изражена као математички производ вероватноће настанка нуклеарног удеса и ефективне еквивалентне дозе зрачења коју би при нуклеарном удесу примио најизложенији становник ван граница локације нуклеарног објекта“. Закон уводи забране прераде, складиштења и одлагања радиоактивних отпадних материјала иностраног порекла, уградње радиоактивних громобрана и систематских рендгенских прегледа лица млађих од 16 година. Чланом 31. се прописује образовање комисије за заштиту од јонизујућих зрачења која врши оцењивање

стања заштите од јонизујућих зрачења у земљи, заузима ставове и предлаже мере у редовним условима и приликом ванредних догађаја и прати научна сазнања и међународне уговоре и препоруке о овој области. Чланом 48. прописује се образовање комисије за нуклеарну сигурност која оцењује да ли су извршена прописана истраживања терена, примењени одговарајући стандарди и нормативи и испуњени прописани услови у погледу квалитета изведених радова и други прописани или одређени услови који су значајни за нуклеарну сигурност објекта и заштиту животне средине. Надзор над спровођењем одредаба овог закона и одговарајућих прописа које се односе на спровођење мера нуклеарне сигурности врши савезни орган управе надлежан за послове нуклеарне енергије. Чланом 90. прописано је да се извори јонизујућих зрачења из радиоактивних громобрана који су уграђени до дана ступања на снагу овог закона морају уклонити до истека времена за њихову замену а најкасније до краја 1996. године.

Заједничко за све ове законе је да надзор над спровођењем мера заштите од јонизујућих зрачења и нуклеарне сигурности у Југословенској народној армији и у органима унутрашњих послова врше надлежни војни органи односно органи управе надлежни за унутрашње послове.

Закон о заштити од јонизујућих зрачења [6] донет 1996. године по први пут уводи основна начела заштите од зрачења: оправданост, оптимизацију и ограничење излагања. Новина у овом Закону је увођење дефиниција ефективне и еквивалентне дозе као и радијационих и ткивних тежинских фактора. Надзор над спровођењем мера заштите од јонизујућих зрачења и мера нуклеарне сигурности врше савезни инспектори. У прелазним и завршним одредбама наведено је да ће савезна влада, корисник нуклеарног објекта и други корисници извора јонизујућих зрачења обезбедити услове за трајно одлагање радиоактивног отпада у року од пет година као и да се извори из радиоактивних громобрана морају уклонити у року од три године.

Законом о заштити од јонизујућих зрачења и о нуклеарној сигурности [7] који је усвојен 2009. године прописује се оснивање Агенције за заштиту од јонизујућих зрачења и нуклеарну сигурност Србије као регулаторног тела. Надзор над спровођењем мера заштите од јонизујућих зрачења и мера нуклеарне сигурности врше инспекције које су у саставу надлежних министарстава. Овим законом основано је и јавно предузеће за управљање нуклеарним објектима у Републици Србији. Рок за уклањање радиоактивних громобрана поново је продужен за пет година а рок за обезбеђивање услова за трајно одлагање радиоактивног отпада за 10 година.

Законом о радијационој и нуклеарној сигурности и безбедности [8] који је усвојен по хитном поступку у децембру 2018. године, Агенција за заштиту од јонизујућих зрачења и нуклеарну сигурност Србије је трансформисана у Директорат за радијациону и нуклеарну сигурност и безбедност Србије. Директорат је самостално и функционално независно регулаторно тело које за свој рад одогува Влади Републике Србије. Инспекција за радијациону и нуклеарну сигурност и безбедност се налази у саставу Директората. Овим Законом је извршено транспоновање директива Европске Комисије 59/2013, 117/2006, 70/2011 и 2009/71-2014/87. Извршена је категоризација радијационих делатности према ризику, уведе се термини ситуација планираног, постојећег и ванредног излагања, успостављен је оквир за регулисање мера радијационе безбедности као

и бројна друга унапређења у складу са Европским директивама и стандардима међународне агенције за атомску енергију.

### 3. Регулатива на Симпозијумима Друштва за заштиту од зрачења

Разматрање регулаторног оквира на симпозијумима Друштва за заштиту од зрачења било је тема већ на Првом симпозијуму одржаном у Порторожу 1963. године [12]. На Другом Симпозијуму о радиолошкој заштити, који је био посвећен питањима деконтаминације, учесници су донели „Резолуцију“ у којој се у тачки 4. наводи: „Потребно је да један орган државне управе, у сарадњи са осталим одговорним органима, што прије приступи изради и доношењу одговарајућих законских и других прописа и упутстава који би регулисали права и надлежности стручних организација и служби, радних организација и друштвено-политичких заједница, као и начин организације и рада на извођењу радиолошке заштите, односно деконтаминације“ [13].

Анализа регулаторног оквира у Југославији и праксе у заштити од јонизујућих зрачења била је тема на Трећем симпозијуму одржаном у Бањалуци [14]. Дат је критички осврт на законодавни рад и доношење неопходних прописа са примерима из свакодневне праксе и препорукама за превазилажење проблема.

Секција под називом „Општи проблеми заштите и прописи“ први пут је одржана на Четвртом Југословенском симпозијуму о радиолошкој заштити у Башком Пољу 1969. године [15].

На Петом симпозијуму одржаном на Бледу 1970. године посебно се издвајају два рада у којима је анализиран регулаторни оквир. Као закључак се посебно наводи потреба за трајним и систематским радом у циљу изградње потпуног законодавства [16] и да се путем Секције за законодавство и прописе успостави „сталан пут за дискусију појединих дијелова законских прописа, давање објашњења, уједначења ставова и предлагање промјена ако је то потребно“ [17].

Најављене а затим и спроведене уставне промене у Југославији неминовно су утицале и на регулаторни оквир у области заштите од зрачења о чему се дискутовало на Шестом Симпозијуму у Охриду 1972. године и Седмом Симпозијуму у Каштел Старом 1973. године [18, 19]. Изградња нуклеарне електране Кршко и планови за низ других локација наметнули су и тему разматрања прописа за лоцирање и градњу нуклеарних постројења на Десетом симпозијуму у Аранђеловцу 1979 године и Тринаестом симпозијуму у Пули 1985. године [20, 21]. Измене у међународним стандардима иницирале су анализу домаћих прописа на неколико симпозијума [22-24]. Акцидент у Чернобиљу је између осталог ставио у фокус и регулативу у области деловања у ванредном догађају на Саветовању у Крагујевцу 1986. године [25] а затим и у Монографији издатој 2016. године поводом 30 година од катастрофе [26]. Законски оквир за регулисање мера заштите од зрачења у медицини био је једна од тема на Саветовању у Новом Саду 1988. године [27]. Најаве измена закона који регулишу област заштите од јонизујућих зрачења биле су тема на симпозијумима у Неуму 1991. године [28], Бечићима 1995. године [29], Петровцу 2003. године [30] и на Златибору 2007. године [31]. Идеја о формирању Агенције за заштиту од зрачења као регулаторног тела први пут је изложена на Симпозијуму у Кладову 2001. године [32]. Регулатива у области мониторинга радиоактивности у животној средини разматрана је у Вршцу 2015. године [33].



Може се слободно рећи да су скоро на сваком од 30 одржаних Симпозијума Друштва подзаконска акта из области заштите од зрачења била предмет стручне анализе коју су редовно пратили предлози за унапређење. У почетку су то били само акти из области примене јонизујућег зрачења у медицини, али како је време пролазило и регулаторни оквир се ширио, неминовно су се мењале и области интересовања.

#### 4. Закључак

Друштво за заштиту од јонизујућег зрачења од свог оснивања пре 60 година активно прати прописе из ове области и регулатива је на скоро свим симпозијумима била једна од тема. Стручна анализа законских и подзаконских аката је пракса која може значајно да допринесе квалитету регулативе па је један од важних задатака Директората за радијациону и нуклеарну сигурност Србије да ту праксу подржи и узме у обзир мишљење стручне јавности о предложеним решењима.

#### 5. Захвалница

Аутор се захваљује Радмили Стојановић, вишем саветнику-библиотекару, Сектор за законодавство, Народна скупштина Републике Србије, на помоћи у проналажењу текстова старих закона и правилника.

#### 6. Литература

- [1] Закон о заштити од јонизујућих зрачења, Службени лист ФНРЈ 16/59, 1959.
- [2] Основни закон о заштити од јонизујућих зрачења, Сл. лист СФРЈ 12/65, 1965.
- [3] Закон о заштити од јонизујућих зрачења, Сл. лист СФРЈ 54/76, 1976.
- [4] Закон о заштити од јонизујућих зрачења и о посебним мерама сигурности при коришћењу нуклеарне енергије, Сл. лист СФРЈ 62/84, 1984.
- [5] Закон о заштити од јонизујућих зрачења и о нуклеарној сигурности, Сл. лист СФРЈ 53/91 и Сл. лист СРЈ 45/92, 1991.
- [6] Закон о заштити од јонизујућих зрачења, Сл. лист СРЈ 46/96 и Сл. гласник РС 85/05 – др. закон и 101/05 – др. закон.
- [7] Закон о заштити од јонизујућих зрачења и о нуклеарној сигурности, Сл. гласник РС 36/09 и 93/12.
- [8] Закон о радијационој и нуклеарној сигурности и безбедности, Сл. гласник РС 95/18 и 10/19.
- [9] Правилник о заштитним мјерама при раду са рентгенским уређајима и радиоактивним материјама, Службени лист бр. 100/47, 1947.
- [10] Наредба о ограничењу промета радиоактивних изотопа, Службени лист ФНРЈ 44/58, 1958.
- [11] М. Нинковић, Један поглед на заштиту од зрачења од Винча акцидента до

данас, *Зборник радова, XX симпозијум Југословенског друштва за заштиту од зрачења*, 3-5. новембар 1999, Тара, 1999, 13-29.

- [12] П. Марковић, П. Мирић, И. Мирић, Осврт на максимално дозвољене нивое озрачивања и контаминације, *I југословенски симпозијум о радиолошкој заштити*, Кратки садржаји саопћења, 8-12 октобар 1963, Порторож, 1963, 34.
- [13] Резолуција учесника II Југословенског Симпозијума о радиолошкој заштити, Проблеми радиолошке деконтаминације, *Радови са II југословенског симпозијума о радиолошкој заштити*, 1-4. новембар 1965, Мостар, Издање Института за хигијену и социјалну медицину Медицинског факултета, Сарајево, 1966, 7-9.
- [14] Т. Вељковић, Б. Јовић, С. Митровић, С. Петровић, Неки стручни, правни и организациони проблеми нуклеарне енергије и заштите од јонизујућих зрачења у нашој земљи, Мерење и инструментација у заштити од јонизујућег зрачења, *Зборник материјала III југословенског симпозијума о радиолошкој заштити*, 23-26. октобар 1967, Бања Лука, 1967, 61-65.
- [15] Зборник радова IV југословенског симпозијума о радиолошкој заштити, *Југословенско друштво за радиолошку заштиту*, 28-30. мај 1969, Башко Поље, 1969.
- [16] Т. Вељковић, С. Митровић, Потребе за новим пратећим прописима Основног закона о заштити од јонизујућег зрачења, *Радови V југословенског симпозијума о радиолошкој заштити*, 6-9. октобар 1970, Блед, 1970, Nr/9/02.
- [17] Х. Царовац, З. Бенчак, Р. Хуфнус, Неки лошији дијелови наших законских прописа, *Радови V југословенског симпозијума о радиолошкој заштити*, 6-9. октобар 1970, Блед, 1970, Nr/9/03.
- [18] Т. Вељковић, С. Митровић, Регулисање заштите од јонизујућих зрачења у духу уставних промена, *Радови VI југословенског симпозијума – Заштита од јонизујућих зрачења*, 25-28. април 1972, Охрид, 1972, 655-659.
- [19] Т. Вељковић, С. Митровић, Уставне промене и регулисање заштите од зрачења, *Радови VII Југословенског Симпозијума – Заштита од зрачења*, 22-26. октобар 1973, Каштел Стари, 1973, 34-41.
- [20] М. Видмар, М. Зарић, Наши прописи за лоцирање и градњу нуклеарних постројења - електрана, *Зборник радова X Југословенског друштва за заштиту од зрачења*, 29. мај – 1. јун 1979, Аранђеловац, 1979, 45-50.
- [21] Б. Векић, И. Дворник, Осврт на нуклеарну регулативу на примјеру нуклеарног регулаторног (управног органа), *Зборник радова XIII југославенски симпозиј заштите од зрачења*, Књига II, 10-13. јун 1985, Пула, 1985, 502-506.
- [22] П. Д. Марковић, МКРЗ Публикација 26 – Основе и неке практичне импликације њене примене, *Зборник радова X Југословенског друштва за заштиту од зрачења*, 29. мај – 1. јун 1979, Аранђеловац, 1979, 129-153.
- [23] М. Јеремић, Р. Радовановић, Д. Панов, М. Килибардс, Прилог дискусији о примени нових препорука Међународне комисије за радиолошку заштиту,

- Зборник радова X Југословенског друштва за заштиту од зрачења*, 29. мај – 1. јун 1979, Аранђеловац, 1979, 155-160.
- [24] М. Видмар, М. Зарић, ICRP публикација 30 и југословенско законодавство, *Зборник на трудови XII југословенски симпозиум на заштита од зрачење*, Книга I, 30. мај – 3. јун 1983, Охрид, 1983, 30-33.
- [25] Н. Живковић, Нормативно уређивање заштите од јонизујућих зрачења са посебним освртом на ванредне догађаје, *Зборник радова, II саветовање „Излагање Зрачења из природне средине и процена одговарајућег радијационог ризика“*, Југословенско друштво за заштиту од зрачења, 6-8. октобар 1986, Крагујевац, 1986, 157-164.
- [26] В. Вулетић, М. Еремић-Савковић, С. Велинов, Међународна и домаћа регулатива у области заштите од зрачења након чернобильског акцидента, *Монографија „Чернобиљ 30 година после“*, Друштво за заштиту од зрачења Србије и Црне Горе, Београд, 2016, 43-50.
- [27] В. Гунарић, Законски прописи у области заштите од ионизирајућих зрачења у медицини, *Зборник радова, Семинар „Мјере заштите и здравствени надзор особа које користе изворе зрачења у здравству“*, Југословенско друштво за заштиту од зрачења, 13-15. октобар 1986, Цавтат, 1988, 7-15.
- [28] В. Радмиловић, В. Јовашевић, Р. Максић, Осврт на измене и допуне предлога Закона о заштити од јонизујућих зрачења и о нуклеарној сигурности, *Зборник радова XVI симпозијум Југословенског друштва за заштиту од зрачења*, 28-31. мај 1991, Неум, 1991, 326-328.
- [29] М. Орлић, С. Павловић, В. Радмиловић, В. Јовашевић, Р. Максић, М. Голубовић, Стручне подлоге за доношење новог закона о заштити од зрачења, *XVIII симпозијум Југословенског друштва за заштиту од зрачења*, 24-26. мај 1995, Бечићи, 1995, 19-22.
- [30] С. Марковић, М. Ковачевић, О. Цирај-Бјелац, Актуелни тренутак заштите од зрачења у СиЦГ, *XXII симпозијум Југословенског друштва за заштиту од зрачења*, 29. септембар - 1. октобар 2003, Петровац, 2003, 31-34.
- [31] Ђ. Лазаревић, Д. Аранђић, К. Станковић, С. Станковић, О. Цирај-Бјелац, Улога и надлежност регулаторног тела према нацрту новог Закона о заштити од јонизујућих зрачења и нуклеарној сигурности, *XXIV симпозијум Југословенског друштва за заштиту од зрачења*, 3-5. октобар 2007, Златибор, 2007, 387-390.
- [32] М. Орлић, Ж. Илић, О. Чукнић, Агенција за заштиту од јонизујућих зрачења (АЗЗ), *XXI симпозијум Југословенског друштва за заштиту од зрачења*, 10-12. октобар 2001, Кладово, 2001, 9-14.
- [33] Ј. Јоксић, М. Раденковић, В. Удовичић, Environmental Radioactivity Monitoring in Serbian Regulations, *Зборник радова, XXVIII симпозијум Друштва за заштиту од зрачења Србије и Црне Горе*, Вршац, 30. септембар - 2. октобар 2015. године.

**REGULATORY FRAMEWORK ON RADIATION PROTECTION  
SOCIETY SIMPOSIUMS**

**Ivana Avramović**

Serbian Radiation Protection and Nuclear Safety and Security Directorate  
Belgrade, Serbia, [avramovic@srbatom.gov.rs](mailto:avramovic@srbatom.gov.rs)

**ABSTRACT**

It has been sixty years since the adoption of the first law in the field of radiation protection. In the meantime, the discussion about the regulatory framework at Radiation Protection Society Symposiums has evolved from occasional references in certain theses to a separate section. As a rule, the adoption of a new legal framework in the area was preceded by the presentation of new solutions and changes in the international standards.

## NACIONALNA STRATEGIJA RADIJACIONE I NUKLEARNE SIGURNOSTI – PRIORITETI I IZAZOVI

**Bojan RADAĐ, Ivana AVRAMOVIĆ, Maja EREMIĆ SAVKOVIĆ,  
Milan VUJOVIĆ, Vladimir JANJIĆ i Sladan VELINOV**

*Direktorat za radijacionu i nuklearnu sigurnost i bezbednost Srbije, Beograd, Srbija,  
radak@srbatom.gov.rs, avramovic@srbatom.gov.rs, eremic.savkovic@srbatom.gov.rs,  
vujoVIC@srbatom.gov.rs, velinov@srbatom.gov.rs*

### SADRŽAJ

*Osnov i polazna tačka na kojoj se zasniva nacionalna strategija radijacione i nuklearne sigurnosti su nacionalni resursi u ovoj oblasti, što znači: objekti, sredstva, delatnosti koje koriste jonizujuće zračenje i/ili nuklearni materijal i ljudski resursi. Drugim rečima - što je moguće detaljniji inventar prostora na kojem treba primeniti sistem sigurnosti. Primarni faktor sigurnosti u svim delatnostima je čovek, a tehnika i sredstva sigurnosti su sekundarna. Zbog toga će znanje, obučenosť i izgradnja sigurnosne kulture imati primat u strategiji. Posebni izazovi sa kojima Strategija treba da se izbori su socijalno-ekonomski činioci, tj. rešenja za obezbeđivanje materijalne baze i resursa za njenu realizaciju, ali i odnos prema zajedničkoj imovini i sredstvima. I jedno i drugo upućuje na povećanu aktivnosť u podizanju socijalne i tehničke kulture i određivanje nacionalnih prioriteta.*

### 1. Uvod

Prema Zakonu o radijacionoj i nuklearnoj sigurnosti i bezbednosti ("Sl. glasnik RS", br. 95/2018 i 10/2019) Član 9. propisuje donošenje Strategije radijacione i nuklearne sigurnosti [1] (u daljem tekstu Strategija).

Strategija je pojam koji označava generalno usmerenje, okvire i principe buduće aktivnosti, sa rasporedom aktivnosti u prostoru i vremenu – radi dostizanja nekog cilja. U tom smislu, može se reći da je misija dokumenta koji se naziva Nacionalnom strategijom, suštinski, da trasira put za unapređenje i stvori uslove za kontinuirano poboljšavanje zaštite stanovništva, izloženih radnika, pacijenata, životne i radne sredine - od štetnih uticaja veštački stvorenog ili prirodno prisutnog radioaktivnog zračenja.

U Zakonu to je formulisano na sledeći način: „Strategija radijacione i nuklearne sigurnosti donosi se u cilju dostizanja (ispunjenosti, prim aut.) osnovnih principa radijacione i nuklearne sigurnosti, kao i osnovnih i posebnih ciljeva radijacione i nuklearne sigurnosti, u skladu sa ovim zakonom” [2].

Naravno, i detaljnije: „U oblasti radijacione sigurnosti strategijom se definiše pravac razvoja i usmeravaju aktivnosti relevantnih institucija u oblasti zaštite od jonizujućeg zračenja radi uspostavljanja, održavanja i poboljšanja sistema zaštite od jonizujućeg zračenja”.

Institucionalno, ovim Zakonom je definisan i uspostavljen Direktorat za radijacionu i nuklearnu sigurnost i bezbednost Srbije (u daljem tekstu Direktorat) kao regulatorno

telo za ovu oblast. Prirodno je da u raspodeli odgovornosti i aktivnosti u sprovođenju Strategije Direktorat ima funkciju koordinatora i kontrolora njenog sprovođenja. Kako bi bio jasniji smisao, namena i struktura Strategije, ovde je ona sagledana sa nekoliko aspekata.

### 2. Prostor primene

Šta sačinjava prostor (okvir) u kojem se ova Strategija primenjuje? Sačinjava ga sve što je na tlu Republike Srbije povezano sa radijacionim ili nuklearnim rizikom. To su:

1. Objekti gde se ovaj rizik pojavljuje (građevinski objekti, institucije, instalacije, postrojenja);
2. Sredstva koja koriste ili predstavljaju izvore zračenja i nuklearne materijale (uređaji, oprema, materijali, roba);
3. Delatnosti (naučnoistraživački rad, medicina, veterina, industrija, državne službe kao što su carina i policija);
4. Ljudski resursi (obrazovanje i sigurnosna kultura).

Tačka 1: podrazumeva jasan inventar objekata na koje se Strategija odnosi. Ovo ne znači da treba da sadrži sve detaljne podatke o tim objektima, već one koji su relevantni za potrebe projektovanja sveukupne strategije.

Tačka 2: na sličan način podrazumeva inventar ili statističke podatke o materijalnim dobrima koja se nalaze ili su u tranzitu u okviru državnih granica.

Tačka 3: na izvestan način opisuje glavni izvor rizika od radijacionih i nuklearnih opasnosti, jer bez ljudske aktivnosti rizik od objekata (tačka 1) i sredstava (tačka 2) praktično ne bi postojao.

Tačka 4: možda je na prvi pogled neobično što su ovde pomenuti ljudski resursi u vezi sa radijacionim i nuklearnim rizikom, ali je jasno da je izvor rizika i neznanje, tj. nedovoljna obrazovanost ljudi. Posledice neznanja mogu se javiti u profesionalnom domenu, kod lica koja su profesionalno u kontaktu sa radijacionim i nuklearnim materijalima, jer ona svojim delovanjem mogu dovesti u rizik stanovništvo. Međutim, neznanje samog stanovništva takođe može da ima dve vrste dejstva: (i) neodgovorno i neoprezno ponašanje prema situaciji sa povećanim rizikom ili pak (ii) izazivanje neosnovane panike, koja sama po sebi može imati nepredvidive posledice, daleko ozbiljnije od samog radijacionog ili nuklearnog rizika. U tom smislu, treba imati u vidu definiciju sigurnosne kulture kako je definisana od strane Međunarodne agencije za atomsku energiju (MAAE): Skup karakteristika i stavova u organizacijama i kod pojedinaca kojima se utvrđuje da se zaštititi i sigurnosti, kao prioritetu iznad svih prioriteta, posvećuje pažnja zahtevana značajem koje one imaju [3].

### 3. Ciljevi

Opšti cilj Strategije je, kao što je pomenuto, najsazetije: poboljšanje i kontinuirano poboljšavanje zaštite stanovništva, izloženih radnika, životne i radne sredine - od štetnih uticaja veštački stvorenog ili prirodno prisutnog radioaktivnog zračenja.

Obzirom da se prema zakonu Strategija donosi sa važenjem od 7 godina, posebni ciljevi mogu biti takvi da za 7 godina:

- Sva zakonska i podzakonska akta u oblasti radijacione i nuklearne sigurnosti su usklađena i redovno se ažuriraju, shodno napretku znanja u ovoj oblasti;
- Republika Srbija je aktivni učesnik u kreiranju preporuka i propisa za



- poboljšanje radijacione i nuklearne sigurnosti na međunarodnom nivou;
- Monitoring izloženosti populacije, pored upotpunjenog sistema rane najave, sadrži u sebi integrisan i sistem praćenja svih (koliko je optimalno moguće) izvora jonizujućih zračenja na teritoriji države;
- Na tlu Republike Srbije više nema poznatih napuštenih izvora zračenja (gromobrani i sl.);
- Naučnoistraživački programi u oblasti razvoja radijacione i nuklearne sigurnosti imaju punu podršku države;
- Nastavni programi i programi obuke sadrže methodske jedinice o jonizujućem zračenju i zaštiti (od osnovne škole do obuka za izložene radnike i državne službe);
- Medicinski radnici imaju redovnu obuku u vezi sa procedurama za pomaganje ugroženima, kao i u vezi zaštite od jonizujućih zračenja na svojim radnim mestima;
- Dekomisija nuklearnih ili radijacionih postrojenja koja su prestala sa radom je dovršena ili postoje jasni planovi za dekomisiju;
- Niz institucija i organa ima svoju ulogu u sprovođenju Strategije, a koordinaciju i kontrolu vrši Direktorat.

#### 4. Postojeće stanje

Za sagledavanje postojećeg stanja oblasti na koju se Strategija odnosi možda je najbolje poći od propisanog neophodnog sadržaja Strategije, prema Zakonu [2], tabela 1. Komentari dati uz svaki citiran zahtev predstavljaju smernicu i za sagledavanje postojećeg stanja i za dalju razradu.

**Tabela 1. Stavke propisanog sadržaja Strategije radijacione i nuklearne sigurnosti i komentari autora.**

Po Zakonu, Strategija treba da sadrži:	Komentar autora
1) opšte i posebne ciljeve radijacione i nuklearne sigurnosti i jasne vremenske okvire za njihovo dostizanje;	Strategija definiše ciljeve i opšti vremenski okvir (od 7 godina), dok Akcioni plan [4] za primenu strategije definiše jasne i detaljnije vremenske okvire.
2) međunarodne ugovore i sporazume u oblasti radijacione i nuklearne sigurnosti zaključene sa drugim državama, ukoliko takvi postoje;	Republika Srbija je potpisnica svih relevantnih međunarodnih konvencija. Potrebno je dovršiti sklapanje i potpisivanje preostalih bilatelarnih ugovora u okruženju.
3) pravni, regulatorni i institucionalni okvir kojim se obezbeđuje radijaciona i nuklearna sigurnost;	Pravni okvir je pre svega Zakon [1] i podzakonska akta, regulatorni je Direktorat za radijacionu i nuklearnu sigurnost i bezbednost Srbije i njegova akta, a institucionalni su u prvom redu, pored Direktorata, JP Nuklearni objekti Srbije, Institut "Vinča" i nosioci odobrenja i ovlašćenja.
4) potrebe za ljudskim i finansijskim resursima kao i mehanizme za njihovo obezbeđivanje;	Zahtevan je i suštinski zadatak da se ovo definiše i kvantifikuje.



5) istraživačke i razvojne aktivnosti neophodne za održanje nivoa i unapređenje radijacione i nuklearne sigurnosti;	Aktiviranje svih obrazovnih i naučnoistraživačkih institucija i inicijativa iz ove oblasti.
6) socijalno - ekonomske činioce;	Ovo je poseban izazov, ali okvirne i nepretenciozne procene su moguće.
7) mehanizme uspostavljanja sigurnosne kulture;	Ovo je prioritet, jer nije vezan za velika ulaganja materijalnih sredstava, osim ulaganja radnog doprinosa.
8) podizanje opšteg nivoa zaštite od jonizujućeg zračenja očuvanjem već uspostavljenih mehanizama u ovoj oblasti kao i uvođenje specifičnih aktivnosti, kao što su procena doze za populaciju u Republici Srbiji, ocena mogućih potencijalnih efekata jonizujućeg zračenja i identifikacija mera neophodnih za optimizaciju zaštite od jonizujućeg zračenja u različitim oblastima;	Obzirom da određeni stepen monitoringa i kontrole već postoji, potrebno je projektovati njihov dalji razvoj. Posebnu pažnju treba pokloniti obuci medicinskog osoblja, kako onih koji rade sa zračenjem, tako i svih generalno, u pogledu pripremljenosti za pacijente ugrožene jonizujućim zračenjem.
9) identifikaciju mogućih potencijalnih izvora zračenja van regulatorne kontrole i mehanizme za njihovo uvođenje u regulatornu kontrolu;	Poznat problem koji je doživeo svoju artikulaciju i dostigao konkretne obrise u proteklom periodu, te je lakše predvideti dalje korake.
10) podizanje svesti o identifikovanju, brzom uspostavljanju ili ponovnom uspostavljanju kontrole nad napuštenim izvorima;	Povezano sa tačkama 7, 8 i 9.
11) identifikaciju postojećih nuklearnih postrojenja u Republici Srbiji, uključujući i njihove karakteristike, trenutnu fazu životnog veka, trenutnu i planiranu upotrebu i planove za budućnost;	Podaci postoje u dovoljnoj meri.
12) planove za dekomisiju radijacionih i nuklearnih postrojenja, uključujući i sredstva neophodna za čuvanje podataka o postrojenjima u dužem vremenskom periodu;	Ima samo par većih postrojenja ovog tipa i postojeći grubi planovi treba da se artikuliraju u konkretne. Vredi razmotriti regulisanje i manjih postrojenja u ovom smislu.
13) odgovornost za primenu strategije i ključne pokazatelje ostvarenog učinka i napredovanja u primeni;	Odgovornost se mora raspodeliti, a kontrola prirodno pripada Direktoratu.
14) način i rokove izveštavanja o realizaciji strategije.	Slično kao prethodno.

### 5. Zaključak

Suštinska misija nacionalne strategije radijacione i nuklearne sigurnosti jeste da trasira put za poboljšanje i stvori uslove za kontinuirano poboljšavanje zaštite stanovništva, profesionalnih lica, životne i radne sredine od štetnih uticaja veštački stvorenog ili prirodno prisutnog radioaktivnog zračenja. Sadašnji trenutak je prvi put da je njen koncept i sadržaj propisan zakonom, kao i da se uopšte ustanovljava na nacionalnom

nivou. S obzirom da je njena podloga institucionalno praktično pripremljena, prioriteti i izazovi se uglavnom nalaze u domenu ljudskih resursa i sigurnosne kulture, kako u sferi delatnosti, tako i u sferi stanovništva.

### 6. Literatura

- [1] Zakon o radijacionoj i nuklearnoj sigurnosti i bezbednosti, Sl. glasnik RS br. 95/2018 i 10/2019, 2019.
- [2] Ibid, Član 9.
- [3] IAEA Safety Glossary, 2016 Revision, International Atomic Energy Agency Vienna, 2016, 157.
- [4] Zakon o radijacionoj i nuklearnoj sigurnosti i bezbednosti, Sl. glasnik RS br. 95/2018 i 10/2019, Član 6, 2019.

## NATIONAL STRATEGY FOR RADIATION AND NUCLEAR SAFETY - PRIORITIES AND CHALLENGES

**Bojan RADAČ, Ivana AVRAMOVIĆ, Maja EREMIĆ SAVKOVIĆ,  
Milan VUJOVIĆ, Vladimir JANJIĆ and Slađan VELINOV**

Serbian Radiation and Nuclear Safety and Security Directorate, Belgrade, Serbia,  
[radak@srbatom.gov.rs](mailto:radak@srbatom.gov.rs), [avramovic@srbatom.gov.rs](mailto:avramovic@srbatom.gov.rs), [eremic.savkovic@srbatom.gov.rs](mailto:eremic.savkovic@srbatom.gov.rs),  
[vujovic@srbatom.gov.rs](mailto:vujovic@srbatom.gov.rs), [velinov@srbatom.gov.rs](mailto:velinov@srbatom.gov.rs)

### ABSTRACT

The basis and starting point on which the national strategy for radiation and nuclear safety rests are national resources in this area, meaning: structures, means, and practices that use ionizing radiation and/or nuclear material, human resources. In other words - as much as possible - a comprehensive inventory of the space on which the safety system is to be applied. The primary factor of safety in all activities is the human individual. Technical and security means come second. For that reason will the knowledge, training, and building of security culture have priority in the Strategy. Particular challenges which the Strategy needs to handle are the socio-economical factors, i.e. the solutions to securing the material basis and resources for its realization, but also the attitude towards common assets and means. Both of this point towards an increased activity in raising social and technical culture, and defining priorities.

## ЗАКОН О РАДИЈАЦИОНОЈ И НУКЛЕАРНОЈ СИГУРНОСТИ И БЕЗБЕДНОСТИ НОВИ ПРАВНИ ОКВИР

**Бранко БРАЈИЋ, Јасмина МИЛОВАНОВИЋ, Маја ЕРЕМИЋ САВКОВИЋ,  
Ивана АВРАМОВИЋ, Милан ВУЈОВИЋ и Слађан ВЕЛИНОВ**

*Директорат за радијациону и нуклеарну сигурност и безбедност Србије, Београд,  
Србија, [info@srbatom.gov.rs](mailto:info@srbatom.gov.rs)*

### САДРЖАЈ

*Циљ доношења Закона о радијационој и нуклеарној сигурности и безбедности јесте увођење нових стандарда у спровођењу мера заштите од јонизујућих зрачења, нуклеарне и радијационе сигурности, успостављање комплексније регулативе, али и омогућавање ефикасније примене закона, успостављање стриктног и целовитог надзора над изворима јонизујућих зрачења и нуклеарним објектима, радијационим делатностима и нуклеарним активностима, као и над управљањем радиоактивним отпадом. Предложена решења настала су и као израз усклађивања нашег правног поретка са међународним обавезама. Овим законом се оснива Директорат за радијациону и нуклеарну сигурност и безбедност Србије као самостално и функционално независно регулаторно тело које врши регулаторне, стручне и са њим повезане извршне послове у области радијационе и нуклеарне сигурности и безбедности. Закон уређује и положај инспекције за радијациону и нуклеарну сигурност и безбедност у оквиру Директората чиме ће се извршити хармонизација са прописима Европске уније. По угледу на прописе ЕУ уређује се провера и континуирани надзор над испуњеношћу услова за обављање делатности или вршење послова заштите од зрачења и низ других питања.*

### 1. Разлози за доношење новог закона

Област заштите од јонизујућих зрачења и нуклеарне сигурности од 2009. године, била је уређена Законом о заштити од јонизујућих зрачења и о нуклеарној сигурности („Службени гласник РС“, бр. 36/09 и 93/12, у даљем тексту: Закон), као и низом подзаконских аката. Обзиром да је наведени закон донет пре 10 година, а у међувремену је Република Србија почела приступне преговоре са Европском унијом и преузела обавезу усклађивања свог законодавства са прописима ЕУ, те да је од доношења Закона дошло је до знатног унапређења на техничком плану и нових сазнања у области коју Закон уређује, објективно се указала потреба за доношењем новог закона, којим би се на одговарајући начин уредила сва релевантна питања.

Даље, у периоду од ступања на снагу поменутог Закона, наша земља је ратификовала четири међународне конвенције које намећу одређене обавезе у овој области.

Исто тако, разлог за доношење новог закона биле су и уочене потешкоће у примени неких одредаба постојећег, као и правне празнине које су постојале у претходном закону и на тај начин отежавале његову пуну примену.

У вези са напред изнетим, важно је напоменути да се новим Законом о радијационој и нуклеарној сигурности и безбедности обезбеђују услови за остваривање уставне надлежности Републике Србије у области заштите појединаца и становништва од штетног утицаја јонизујућег зрачења, заштите и унапређења заштите животне средине, производње, промета и превоза радиоактивних материја, као и услови за сигурно и безбедно обављање радијационих и нуклеарних делатности и активности и вршења послова заштите од зрачења на територији Републике Србије, уз пуно уважавање и примену највиших стандарда у области, какви важе у земљама Европске уније.

Законом о радијационој и нуклеарној сигурности и безбедности стварају се неопходне претпоставке за напредак наше земље у хармонизацији националног законодавства са прописима Европске уније, што представља кључни приоритет у оквиру процеса приступања Европској унији. Ради се о Директиви Савета 2013/59/Euratom од 5. децембра 2013. којом се прописују сигурносни стандарди за заштиту од штетног дејства излагања јонизујућим зрачењима, а којом се укидају Директива 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom и 2003/122/Euratom (Службени лист Европске уније, L 13, од 17. јануара 2014, стр. 1), затим Директиви Савета 2009/71/Euratom којом се успоставља заједнички оквир за нуклеарну сигурност нуклеарних инсталација (Службени лист Европске уније L 172, од 2. јула 2009, стр. 18), Директиви Савета 2014/87/Euratom од 8. јула 2014. којом се допуњује Директива Савета 2009/71/Euratom којом се успоставља заједнички оквир за нуклеарну сигурност нуклеарних инсталација (Службени лист Европске уније L 172, од 2. јула 2009, стр. 18), Директиви Савета 2011/70/Euratom од 19. јула 2011. којом се успоставља заједнички оквир за одговорно и сигурно управљање ислуженим горивом и радиоактивним отпадом (Службени лист Европске уније L 119, од 2. августа 2011, стр. 48) и Директиви Савета 2006/117/Euratom од 20. новембра 2006. о надзору и контроли пошилки радиоактивног отпада и ислуженог горива (Службени лист Европске уније L 337, од 5. децембра 2006, стр. 21).

Закон представља добру основу за успешно укључивање у европске и светске процесе у области радијационе и нуклеарне сигурности и безбедности, као и за увођење и примену међународних прописа, стандарда и техничких правила и прихватање међународне праксе у овој области, као гаранције достизања највиших стандарда у области радијационе и нуклеарне сигурности и безбедности у Републици Србији.

Посебно је важно истаћи да се овим законом оснива Директорат за радијациону и нуклеарну сигурност и безбедност Србије (у даљем тексту: Директорат), као самостално и функционално независно регулаторно тело које врши регулаторне, стручне и са њим повезане извршне послове у области радијационе и нуклеарне сигурности и безбедности. Ради обезбеђивања услова за стручно и ефикасно спровођење мера радијационе и нуклеарне сигурности и безбедности и контроле делатности уређених овим законом, њиме су јасно дефинисане надлежности Директората и прецизно утврђена његова овлашћења у погледу регулаторних и инспекцијских функција, као и надлежности за доношење подзаконских и других

аката којима ће се у потпуности уредити област радијационе и нуклеарне сигурности и безбедности у нашој земљи.

### 2. Циљеви који се законом постижу

Циљ доношења овог закона јесте увођење нових стандарда у спровођењу мера заштите од јонизујућих зрачења, нуклеарне и радијационе сигурности, успостављање комплексније регулативе, али и омогућавање ефикасније примене закона, успостављање стриктног и целовитог надзора над изворима јонизујућих зрачења и нуклеарним објектима, радијационим делатностима и нуклеарним активностима, као и над управљањем радиоактивним отпадом.

Закон о радијационој и нуклеарној сигурности и безбедности представља први корак у приближавању нашег законодавства са *acquis communautaire* (законодавство Европске уније).

Његовим одредбама се одређује правни основ за доношење подзаконских аката који ће омогућити потпуно усклађивање нашег права са европским прописима, на шта се Република Србија обавезала потписивањем Споразума о стабилизацији и придруживању између Европских заједница и њених држава чланица, са једне стране и Републике Србије, са друге стране („Службени гласник РС“, број 103/07) и Уводном изјавом на Међувладиној конференцији о приступању Републике Србије Европској унији, од 21. јануара 2014. године којом је Република Србија, у тачки 3. изразила спремност да у потпуности преузме право ЕУ у свој правни систем и изгради ефикасне административне и правосудне капацитете за његову пуну примену.

Нова законска решења настала су и као израз усклађивања нашег правног поретка са међународним обавезама које произлазе из већ донетих Закона о потврђивању Измена и допуна Конвенције о физичкој заштити нуклеарног материјала („Службени гласник Републике Србије - Међународни уговори“, број 4/2016), Закона о потврђивању Конвенције о сигурности управљања истрошеним горивом и о сигурности управљања радиоактивним отпадом („Службени гласник Републике Србије - Међународни уговори“, број 10/2017), Закона о потврђивању Конвенције о нуклеарној сигурности („Службени гласник Републике Србије - Међународни уговори“, број 10/2017) и Закона о потврђивању Додатног протокола уз Споразум о гаранцијама у вези са уговором о неширењу нуклеарног оружја („Службени гласник Републике Србије - Међународни уговори“, број 10/2018).

Стриктна примена овог закона омогућиће подизање нивоа радијационе и нуклеарне сигурности и безбедности у нашој земљи, стварање услова за унапређење ове области у Републици Србији и успостављање вишег квалитативног степен у раду свих субјеката у области радијационе и нуклеарне сигурности и безбедности.

Један од циљева доношења новог закона је и успостављање регулаторног тела Републике Србије у области радијационе и нуклеарне сигурности и безбедности, уз испуњење свих захтева из потврђених међународних конвенција и важећих европских прописа који се односе на обавезу оснивања регулаторног тела у области, са обезбеђивањем његове делотворне независности и које ће имати одговарајућа овлашћења, надлежности и финансијске и људске ресурсе, за испуњавање обавеза које су му додељене и истовремено створити услови за

квалитетан и ефикасан рад свих субјеката у области, са јасно и прецизно утврђеним правима, обавезама, овлашћењима и одговорностима.

Као нарочито важан циљ доношења новог закона, истиче се потреба да се законом уредиположај инспекције за радијациону и нуклеарну сигурност и безбедност у оквиру Директората и тако изврши хармонизација са прописима Европске уније, те да се, по угледу на прописе ЕУ, уреди и провера и континуирани надзор над испуњеношћу услова за обављање делатности или вршење послова заштите од зрачења, као низ других питања.

### 3. Структура новог закона

Материја коју закон уређује, систематизована је у шеснаест поглавља, и то:

- I. Основне одредбе;
- II. Стратегије радијационе и нуклеарне сигурности и безбедности;
- III. Директорат за радијациону и нуклеарну сигурност и безбедност Србије;
- IV. Основна начела заштите од јонизујућег зрачења;
- V. Изузимање делатности од обавезе пријављивања, пријављивање и издавање одобрења;
- VI. Радијациона и нуклеарна сигурност;
- VII. Евиденција и контрола нуклеарног материјала, активности, опреме и ненуклеарног материјала повезаних са нуклеарним горивним циклусом;
- VIII. Радијациона и нуклеарна безбедност;
- IX. Припремљеност и одговор у случају нуклеарне или радиолошке ванредне ситуације;
- X. Промет извора зрачења;
- XI. Транспорт опасне робе класе 7 ADR/RID/AND (радиоактивне материје);
- XII. Информације од јавног значаја и транспарентност;
- XIII. Одговорност носиоца лиценце за нуклеарну штету;
- XIV. Инспекцијски надзор;
- XV. Казнене одредбе;
- XVI. Прелазне одредбе и завршне одредбе.

Као што се види, законом су уређене мере радијационе и нуклеарне сигурности и безбедности, услови за обављање делатности са изворима зрачења, поступање у ситуацији планираног, постојећег и ванредног излагања јонизујућем зрачењу у циљу обезбеђивања заштите појединаца, становништва и животне средине од штетног утицаја јонизујућег зрачења, сада и убудуће, евиденција и контрола нуклеарног материјала, активности, опреме и ненуклеарног материјала повезаних са нуклеарним горивним циклусом, промет извора зрачења, транспорт опасне робе класе 7 ADR/RID/AND (радиоактивне материје), информације од јавног значаја и транспарентност; одговорност носиоца лиценце за нуклеарну штету, инспекцијски надзор; као и казнене одредбе.



### 4. Позитивни ефекти закона

Овим законом се, по први пут, на квалитетан, свеобухватан и модеран начин, уз уважавање и примену највиших стандарда, какви важе у земљама Европске уније и уз увођење и примену међународних прописа, стандарда и техничких правила и прихватање међународне праксе у овој области, уређује област радијационе и нуклеарне сигурности и безбедности у Републици Србији.

Даље, њиме се прописују услови које морају да испуне правна лица и предузетници који обављају делатности или врше послове заштите од зрачења и уређују и друга питања значајна за заштиту појединаца и становништва од штетног дејства јонизујућег зрачења и заштиту и унапређење животне средине, а све у складу са европским стандардима.

Закон утврђује правни основ за доношење низа подзаконских аката којима ће се ова област у потпуности и у целини усагласити са правним тековинама Европске уније у области радијационе и нуклеарне сигурности и безбедности као и са стандардима и препорученом праксом који су садржани у документима Међународне агенције за атомску енергију.

Доношење и примена закона представљају и реализацију обавеза Републике Србије утврђених Националним програмом за усвајање правних тековина Европске уније, а посебно са Трећом ревизијом Националног програма за усвајање правних тековина Европске уније (НПАА), коју је Влада усвојила Закључком 05 Број: 337-1851/2018 од 1. марта 2018. године.

Материјалним решењима из закона, прецизно је утврђена надлежности Директората, као и његове одговорности и овлашћења. По угледу на организацију регулаторних тела у области радијационе и нуклеарне сигурности и безбедности у европским државама, и у складу са препорукама ЕК, Директорат за радијациону и нуклеарну сигурност и безбедност Србије функционише као савремено регулаторно тело одговорно за радијациону и нуклеарну сигурност и безбедност у нашој земљи.

Са тако одређеним правним статусом, обезбеђена је независност у раду Директората у односу на политички и сваки други утицај који потенцијално негативно може да утиче на радијациону и нуклеарну сигурност и безбедност Републике Србије. Наиме, основна идеја лежи у чињеници да стручни послови, захтевају ангажовање само стручних, образованих, додатно обучених и материјално мотивисаних експерата за рад у Директорату, што ће онемогућити сваки евентуални покушај корупције.

Од ступања на снагу закона па до сада, већ су уочени његови позитивни ефекти на квалитетан и ефикасан рад свих субјеката у области радијационе и нуклеарне сигурности и безбедности, директна последица чега је подизање нивоа радијационе и нуклеарне сигурности и безбедности у циљу заштите појединаца и становништва од штетног дејства јонизујућег зрачења и заштите и унапређења животне средине

Такође, успостављен је стабилан, модеран и предвидив национални оквир у овој области, са јасно и прецизно дефинисаним правима, обавезама, овлашћењима и одговорностима, што може позитивно утицати и на појаву нових правних лица и предузетника који ће обављати делатности или вршити послове заштите од зрачења. Следећи корак у учвршћивању наведеног правног оквира је израда сета подзаконских аката, који би, у складу НПАА, требало да буду донети до краја 2021. године.



На крају, важно је напоменути да су у припреми овог закона дали свој саветодавни допринос страни консултанци из Европске уније, кроз Пројекат ИПА 2011 и PLAC пројекат, као и консултанци из Међународне агенције за атомску енергију, а такође, и да је у Народној Скупштини Републике Србије спроведено јавно слушање, током кога су сви субјекти из области радијационе и нуклеарне сигурности и безбедности и други заинтересовани, као и стручна и општа јавност, имали прилику да коментаришу материјална решења предложена овим законом.

### 5. Литература

- [1] Закон о радијационој и нуклеарној сигурности и безбедности („Службени гласник РС“, бр. 95/18 и 10/19), 2019.
- [2] Директива Савета 2013/59/Euratom од 5. децембра 2013. којом се прописују сигурносни стандарди за заштиту од штетног дејства излагања јонизујућим зрачењима, а којом се укидају Директива 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom и 2003/122/Euratom (Службени лист Европске уније, L 13, од 17. јануара 2014, стр. 1), 2014.
- [3] Директива Савета 2009/71/Euratom којом се успоставља заједнички оквир за нуклеарну сигурност нуклеарних инсталација (Службени лист Европске уније L 172, од 2. јула 2009, стр. 18), 2009.
- [4] Директива Савета 2014/87/Euratom од 8. јула 2014. којом се допуњује Директива Савета 2009/71/Euratom којом се успоставља заједнички оквир за нуклеарну сигурност нуклеарних инсталација (Службени лист Европске уније L 172, од 2. јула 2009, стр. 18), 2009.
- [5] Директива Савета 2011/70/Euratom од 19. јула 2011. којом се успоставља заједнички оквир за одговорно и сигурно управљање ислуженим горивом и радиоактивним отпадом (Службени лист Европске уније L 119, од 2. августа 2011, стр. 48), 2011.
- [6] Директива Савета 2006/117/Euratom од 20. новембра 2006. о надзору и контроли пошилики радиоактивног отпада и ислуженог горива (Службени лист Европске уније L 337, од 5. децембра 2006, стр. 21), 2006.

## LAW ON RADIATION AND NUCLEAR SAFETY AND SECURITY NEW LEGAL FRAMEWORK

**Branko BRAJIĆ, Jasmina MILOVANOVIĆ, Maja EREMIĆ SAVKOVIĆ,  
Ivana AVRAMOVIĆ, Milan VUJOVIĆ and Sladan VELINOV**  
*Serbian Radiation and Nuclear Safety and Security Directorate, Belgrade, Serbia,*  
[info@srbatom.gov.rs](mailto:info@srbatom.gov.rs)

### ABSTRACT

The main purpose of adopting the new Law on Radiation Protection and Nuclear Safety and Security was to introduce new standards in applying radiation protection and nuclear safety and security measures, to establish more complex regulatory framework, but also to facilitate more efficient enforcement of the Law, to establish stricter and more comprehensive oversight of radiation sources and nuclear facilities, radiation practices and nuclear activities, as well as radioactive waste management. The proposed solutions were the result of aligning our legal framework with the assumed international responsibilities. This Law facilitated the establishment of Serbian Radiation and Nuclear Safety and Security Directorate as a separate and independent regulatory body performing regulatory, expert and other related functions in the field of radiation and nuclear safety and security. This Law also regulates the position of the Inspection for Radiation and Nuclear Safety and Security within the Directorate and thus contributes to further harmonization with the EU regulations. By analogy to the EU regulations, the Law enables continuous supervision of the fulfilment of conditions to perform practices or conduct radiation protection, as well as a number of other issues.

## СИСТЕМ ИЗДАВАЊА ОДОБРЕЊА ПРЕМА ЗАКОНУ О РАДИЈАЦИОНОЈ И НУКЛЕАРНОЈ СИГУРНОСТИ И БЕЗБЕДНОСТИ

**Маријана БАЛИН КОВАЧЕВИЋ, Снежана АЛЕМПИЈЕВИЋ,  
Саша БАШИЋ, Ивана БАБОВИЋ и Милан ВУЈОВИЋ**

*Директорат за радијациону и нуклеарну сигурност и безбедност Србије,  
Београд, Србија, [licence@srbatom.gov.rs](mailto:licence@srbatom.gov.rs)*

### САДРЖАЈ

*Закон о радијационој и нуклеарној сигурности и безбедности (у даљем тексту Закон) ступио је на снагу 9. децембра 2018. године. Закон је унео новине у област заштите од зрачења, и како је делом у складу са Директивом Савета 59/13 EURATOM, унео је новине и у систем издавања одобрења за обављање радијационих делатности и нуклеарних активности које се првенствено огледају у примени градираног приступа у категоризацији и одобравању делатности. Закон успоставља систем издавања одобрења за обављање радијационих делатности и нуклеарних активности кроз изузимање делатности од обавезе пријављивања, пријављивање намере обављања делатности, изузимање пријављене делатности од обавезе добијања одобрења, регистрацију и лиценцирање. Закон прописује опште принципе одговорности као и обавезе носиоца одобрења, као и одредбе које се тичу измене, суспензије и одузимања одобрења.*

### 1. Увод

Закон о радијационој и нуклеарној сигурности и безбедности (у даљем тексту: „Закон“) [1] усвојен је на Четвртој седници Другог редовног заседања Народне скупштине Републике Србије, 7. децембра 2018. године. Овај закон ступио је на снагу наредног дана од дана објављивања у Службеном гласнику Републике Србије, 9. децембра 2018. године. Даном ступања на снагу овог закона престао је да важи Закон о заштити од јонизујућих зрачења и о нуклеарној сигурности [2] који је на снази био од 23. маја 2009. године.

Усвајањем Закона успостављен је основ за нови законодавни оквир у области радијационе и нуклеарне сигурности и безбедности у Републици Србији. Овим законом, између осталог усвојен је нови концепт који се заснива на уређењу поступања у ситуацијама постојећег, планираног и ванредног излагања јонизујућем зрачењу, уведена је категоризација делатности, основано истински независно регулаторно тело са проширеним обимом надлежности у које спада и инспекција а детаљније су регулисана и питања безбедности извора зрачења, повезаних објеката и постројења.

Ступањем на снагу овог закона Агенција за заштиту од јонизујућих зрачења и нуклеарну сигурност Србије која је основана Одлуком Владе Републике Србије од 10. септембра 2009. године наставља са радом као Директорат за радијациону и нуклеарну сигурност и безбедност Србије (у даљем тексту: „Директорат“).

## 2. Категоризација делатности

Применом принципа градираног приступа Законом је уведена категоризација делатности према ризику по здравље изложених радника и појединаца, становништво и животну средину, као и према врсти активности која се обавља.

Законом су све делатности разврстане у следеће четири категорије:

- 1) радијационе делатности ниског ризика;
- 2) радијационе делатности умереног ризика;
- 3) радијационе делатности високог ризика;
- 4) нуклеарне активности.

На овај начин су све радијационе делатности у које спадају употреба извора зрачења у медицини, ветерини, индустрији и научно-истраживачком раду као и промет и транспорт извора зрачења подељене у три категорије. Оваква подела омогућила је дефинисање посебних услова за издавање одобрења као и за обављање делатности. Ови услови првенствено се огледају у предвиђеном року за издавање одобрења, дужини важења одобрења и обиму документације којом се доказује сигурност и безбедност обављања делатности.

Директорат је на основу критеријума за процедурну ризика радијационе делатности припремио подзаконски акт [3] којим се ближе прописују услови за категоризацију радијационих делатности и наводи списак радијационих делатности са одговарајућим категоријама. У критеријуме на основу којих је извршена категоризација између осталог спадају: подаци о изворима зрачења и просторијама у којима се користе, начин управљања изворима, изложеност радника, становништва и животне средине, сложеност делатности која се обавља, мере заштите од јонизујућих зрачења, потенцијални путеви излагања, испуштање ефлуената и настајање радиоактивног отпада, процена излагања у случају ванредног догађаја и мере безбедности.

## 3. Пријављивање намере обављања делатности

Правно лице или предузетник који намерава да отпочне са обављањем делатности, пријављује, пре отпочињања, Директорату намеру обављања делатности о чему Директорат издаје потврду.

Носилац потврде о пријави намере дужан је да пре почетка обављања делатности од Директората прибави одобрење у складу са категоризацијом делатности. Пријављене делатности могу бити и изузете од обавезе добијања одобрења у складу са условима које ближе пропише Директорат.

Уколико носилац потврде о пријави намере обављања делатности, пре издавања одобрења, одустане од обављања делатности дужан је да о томе обавести Директорат о чему Директорат такође издаје потврду.

Пријављивањем намере обављања делатности обезбеђује се увид у планирано коришћење извора зрачења а омогућава се и увоз извора зрачења правним лицима или предузетницима који имају намеру да први пут отпочну са обављањем делатности.

## 4. Издавање одобрења

Обавеза прибављања одобрења за обављање делатности прописана је за сва правна лица која обављају делатности уређене Законом. Закон поред лиценце,

којом су до сада биле одобраване све радијационе делатности и нуклеарне активности, уводи и регистрацију као писани акт којим се одобравају радијационе делатности ниског ризика. Лиценцом се одобравају радијационе делатности умереног и високог ризика и нуклеарне активности.

У складу са градираним приступом Директорату су законом остављени различити рокови за решавање по захтевима за издавање регистрација и лиценци. У складу са истим принципом, одобрења за различите категорије имају и различите периоде важења. У табели 1. дати су подаци о издавању одобрења за различите категорије делатности. Ови подаци укључују врсту писаног акта којим се делатност одобрава, рок предвиђен за издавање одобрења и период важења одобрења.

**Табела 1. Издавање одобрења за различите категорије делатности.**

Категорија делатности	Писани акт којим се делатност одобрава	Рок за издавање*	Период важења
Радијационе делатности ниског ризика	Решење о регистрацији	30 дана	није временски ограничено
Радијационе делатности умереног ризика	Решење о издавању лиценце	60 дана	10 година
Радијационе делатности високог ризика	Решење о издавању лиценце	90 дана	5 година
Нуклеарне активности	Решење о издавању лиценце	180 дана	до 10 година**

\* од дана подношења уредног захтева

\*\* осим лиценце за обављање нуклеарне активности - пробни рад нуклеарног постројења која се издаје са роком важења до 2 године

Директорат ће издати решење о регистрацији односно решење о издавању лиценце тек када утврди да су сви услови прописани законом и подзаконским актима којима се ближе уређује издавање одобрења испуњени. До доношења нових прописа, примењиваће се прописи донети на основу Закона о заштити од јонизујућих зрачења и о нуклеарној сигурности [4-9]. Испуњење услова за издавање одобрења доказује се подношењем документације прописане законом и подзаконским актима. Спискови потребне документације дати су и у упутствима која су доступна на интернет страници Директората [10]. На слици 1. дата је шема поступка одобравања делатности.

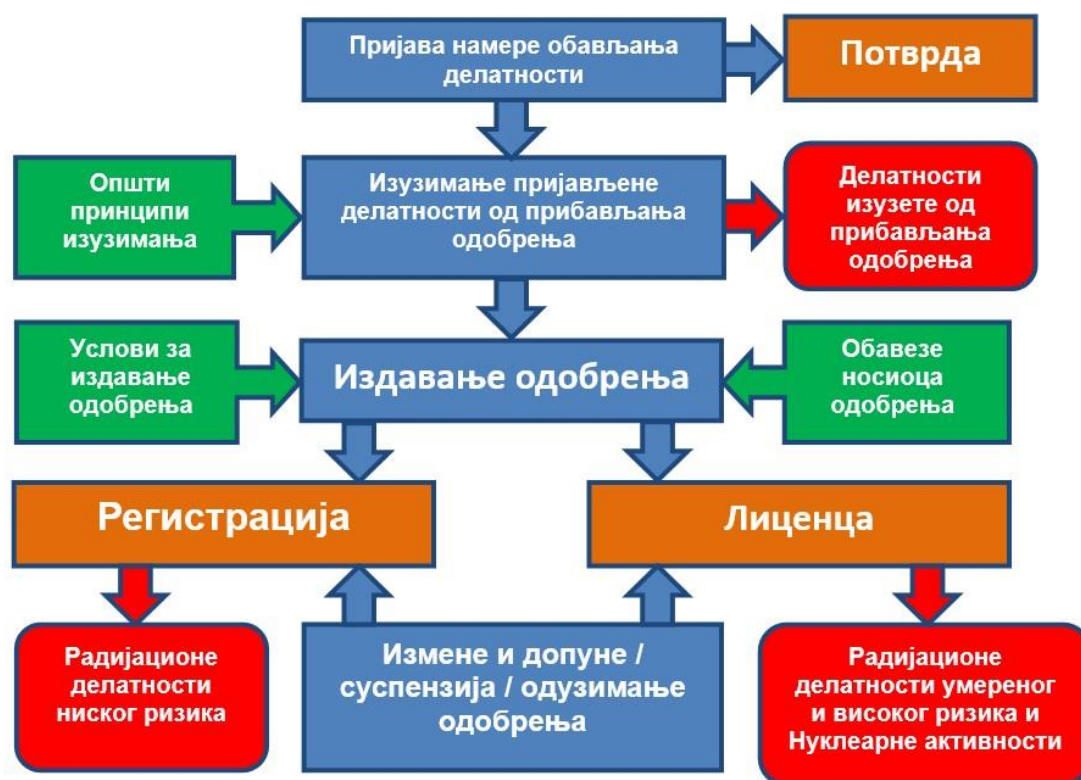
Закон је увео и могућност измене, суспензије или одузимања решења о регистрацији односно решења о издавању лиценце на захтев носиоца одобрења или на основу налаза инспекције.

По истеку периода важења решења о издавању лиценце исти се, на захтев носиоца лиценце, може продужити. Директорат ће пре продужења периода важења одобрења а на основу извештаја о периодичној ревизији извештаја о сигурности и свих пријављених промена података о испуњености услова на основу којих је издато решење о издавању лиценце утврдити да ли су испуњени сви услови на основу којих је издато решење о издавању лиценце као и све мере радијационе и нуклеарне сигурности и безбедности.

### 5. Извештај о сигурности и програм заштите од зрачења

Увођењем извештаја о сигурности и програма заштите од јонизујућег зрачења у поступак издавања одобрења унапређен је досадашњи концепт пројекта мера радијационе сигурности и безбедности за радијационе делатности односно коначног извештаја о нуклеарној сигурности за нуклеарне активности.

Извештај о сигурности израђује се за делатност која се обавља или планира да се обавља и обавезно садржи опис делатности, опис и карактеристике простора, постројења, локације и сваког другог места на коме се делатност обавља, услове и ограничења за обављање делатности, анализу сигурности обављања делатности у редовним околностима и у случају одступања од редовних околности која укључују и ванредни догађај, анализу претпостављених иницијалних догађаја који могу довести до одступања од предвиђеног начина рада као и процену могућих ванредних догађаја и мера за њихово спречавање, ублажавање као и санацију стања у случају ванредног догађаја.



Слика 1. Шема поступка одобравања делатности.

Сврха извештаја о сигурности је да покаже да је делатност сигурна односно да се обавља на начин који гарантује да излагање изложених радника и становништва буде унутар прописаних граница. При анализи сигурности узимају се у обзир сви путеви излагања и сви извори зрачења који се користе при обављању делатности као и њихова међузависност.

Извештај о сигурности се мења и допуњује у складу са променама које настају током обављања делатности тако да се извештај у сваком тренутку односи на тренутни статус обављања делатности. Ово практично значи да ће свака промена



која утиче или може да утиче на сигурност захтевати измену и допуну извештаја о сигурности. Ово се посебно односи на промене начина обављања делатности, извора зрачења који се користи, услова и ограничења за обављање делатности као и промена на локацији, у простору или у постројењу где се делатност обавља и сл. Поред измена и допуна које су резултат промена које настају током обављања делатности врши се и редовна ревизија извештаја о сигурности. Ревизија ће се вршити у временским роковима које ће Директорат прописати подзаконским актом или на захтев Директората. Ревизија извештаја о сигурности подразумева његов преглед, верификацију да успостављене мере радијационе и нуклеарне сигурности, мере спречавања ванредног догађаја и мере санирања последица ванредног догађаја ако до њега дође и даље обезбеђују сигурно и безбедно обављање делатности као и унапређење ових мера.

Концепт прелиминарног извештаја о сигурности који се подноси у поступку прибављања решења о издавању лиценце за обављање радијационе делатности високог ризика а на који Директорат издаје сагласност уведен је у сврху показивања да је планирани начин обављања делатности, локација, простор и постројење у којима се делатност обавља као и услови и ограничења за обављање делатности у које спадају и мере заштите од зрачења пројектовани и припремљени на такав начин да гарантују сигурно и безбедно обављање активности.

Програм заштите од јонизујућег зрачења обухвата све успостављене мере и процедуре заштите од јонизујућег зрачења код носиоца овлашћења. У ове мере обавезно спадају: расподела одговорности током обављања делатности, обележавање контролисаних и надгледаних зона, успостављање правила за раднике и контрола њиховог рада, успостављање и спровођење индивидуалног мониторинга изложених радника и радне средине, систем за евидентирање и обавештавање, спровођење мера заштите од јонизујућег зрачења, програме обуке, методе и рокови за периодични преглед и ревизију програма заштите од јонизујућег зрачења, планови који се примењују у случају ванредних догађаја, програм здравственог надзора и захтеви за спровођење и осигурање контроле квалитета.

Новина уведена са новим законом је и израда и прибављање сагласности на План безбедности. План безбедности на који Министарство унутрашњих послова као надлежни орган даје сагласност садржи мере физичко-техничке заштите и друге мере безбедности извора зрачења и повезаних постројења. У ове мере, између осталог спадају описи и пројекти свих система физичко-техничке заштите, интерна документа која се односе на безбедност као и план деловања у случају безбедносног ванредног догађаја. У сврху одржавања успостављених мера безбедности План безбедности се континуирано унапређује у складу са свим променама, тако да увек одражава тренутно стање постројења и делатности.

### **6. Закључак**

Усвајањем кровног закона у области радијационе и нуклеарне сигурности и безбедности уведен је и нови концепт одобравања радијационих делатности и нуклеарних активности. Применом принципа градираног приступа радијационе делатности су према ризику који носе и према својој врсти категоризоване у три категорије. Оваква категоризација представља основ за успостављање система



одобравања делатности. Концепт показивања сигурности заснован на пројекту мера радијационе сигурности и безбедности унапређен је увођењем извештаја о сигурности, програма заштите од јонизујућих зрачења и плана безбедности. Сврха ова три документа је да покажу да је делатност сигурна и безбедна. Увођењем обавезе периодичне ревизије извештаја о сигурности и плана безбедности обезбеђено је континуирано праћење делатности и спровођење мера радијационе и нуклеарне сигурности и безбедности.

У наредном периоду неопходно је адекватним подзаконским решењима и даљом применом принципа градираног приступа ближе прописати услове за одобравање делатности.

### 7. Литература

- [1] Закон о радијационој и нуклеарној сигурности и безбедности („Сл. гласник Републике Србије“, бр. 95/18 и 10/19), 2019.
- [2] Закон о заштити од јонизујућих зрачења и о нуклеарној сигурности („Сл. гласник Републике Србије“, бр. 36/09 и 93/12), 2012.
- [3] <http://www.srbatom.gov.rs/srbatom/doc/01%20Pravilnik%20o%20kategorizaciji%20delatnosti%20NACRT.pdf>.
- [4] Правилник о условима за добијање лиценце за обављање радијационе делатности („Сл. гласник Републике Србије“ бр. 61/11, 101/16 и 50/18), 2018.
- [5] Правилник о пријављивању и евидентирању извора јонизујућих зрачења („Сл. гласник Републике Србије“ 25/11 и 50/18), 2018.
- [6] Правилник о примени извора јонизујућих зрачења у медицини („Сл. гласник Републике Србије“ 1/12), 2012.
- [7] Правилник о обављању нуклеарне активности („Сл. гласник Републике Србије“ бр. 37/11), 2011.
- [8] Правилник о условима за добијање лиценце за обављање нуклеарне активности („Сл. гласник Републике Србије“ бр. 37/11), 2011.
- [9] Правилник о управљању радиоактивним отпадом („Сл. гласник Републике Србије“ бр. 60/11 од 16.08.2011), 2011.
- [10] <http://www.srbatom.gov.rs/srbatom/uputstva.htm>.

**SYSTEM OF AUTHORIZATION IN ACCORDANCE WITH THE  
LAW ON RADIATION AND NUCLEAR SAFETY AND SECURITY**

**Marijana BALIN KOVAČEVIĆ, Snežana ALEMPIJEVIĆ, Saša BAŠIĆ,  
Ivana BABOVIĆ and Milan VUJOVIĆ**

*Serbian Radiation and Nuclear Safety and Security Directorate, Belgrade, Serbia,  
[licence@srbatom.gov.rs](mailto:licence@srbatom.gov.rs)*

**ABSTRACT**

The Law on Radiation and Nuclear Safety and Security (herein after: the Law) entered into force on December 9, 2018. Adoption of the law brought changes in the field of radiation protection, and as it is partially in accordance with Council Directive 59/13 EURATOM, it also brought changes in the system of authorization of radiation practices and nuclear activities which are primarily reflected in use of graded approach in categorization and authorization. The Law establishes System of authorization of radiation practices and nuclear activities through exemption of practices from notification, notification of intention to perform practice, exemption of notified practice from authorization, registration and licensing. The law prescribes the general principles of responsibility and the obligations of the authorization holders, as well as the provisions regarding changes, suspension and revocation of authorizations.

## KOMPARATIVNA ANALIZA VREDNOSTI ZA CLEARANCE LEVELS U NACIONALNIM PRAVILNICIMA SA VREDNOSTIMA IZ AKTUELNE DIREKTIVE SAVETA EVROPSKE UNIJE

**Đorđe LAZAREVIĆ i Ivana MAKSIMOVIĆ**

*Javno preduzeće „Nuklearni objekti Srbije“, Beograd, Srbija,  
djordje.lazarevic@nuklearniobjekti.rs, ivana.maksimovic@nuklearniobjekti.rs*

### SADRŽAJ

*U Srbiji je nedavno usvojen novi Zakon o radijacionoj i nuklearnoj sigurnosti i bezbednosti (dalje: Zakon), tako da je u narednom periodu potrebno doneti nove i usaglasiti postojeće pravilnike sa novim Zakonom, ali i sa međunarodnom regulativom u ovoj oblasti. Nakon intenzivnog rada na harmonizaciji pristupa Evropske unije i Međunarodne agencije za atomsku energiju (IAEA), na međunarodnom nivou usvojene su vrednosti aktivnosti radionuklida u čvrstim materijalima koje predstavljaju granične vrednosti za oslobađanje od regulatorne kontrole, tzv. clearance levels. Cilj ovog rada je da predstavi komparativnu analizu vrednosti clearance levels datim u nacionalnim pravilnicima sa vrednostima iz Direktive Saveta Evropske unije 2013/59/Euroatom kojom se propisuju sigurnosni standardi za zaštitu od štetnog uticaja izlaganja jonizujućim zračenjima (dalje: Direktiva EU). Pored poređenja vrednosti za clearance levels, prikazana je metodologija za izračunavanje ovih vrednosti sa korišćenim scenarijima u dokumentima koji su izabrani za postojeće nacionalne pravilnike i u Direktivi EU.*

### 1. Uvod

U vreme izrade Pravilnika o granicama radioaktivne kontaminacije lica, radne i životne sredine i načinu sprovođenja dekontaminacije [1] (u daljem tekstu: Nacionalni pravilnik) koji uključuje *clearance levels* za čvrste materijale u svetu su preovladavala dva različita seta graničnih vrednosti za oslobađanje čvrstih materijala od regulatorne kontrole (*clearance levels*). Jedan set graničnih vrednosti je bio deo tada važećih preporuka za zemlje Evropske unije [2]-[5], a drugi deo preporuka Međunarodne agencije za atomsku energiju RS-G-1.7 [6] (u daljem tekstu: Standard IAEA RS-G-1.7). Naše regulatorno telo (Agencija za zaštitu od jonizujućih zračenja i nuklearnu sigurnost Srbije, od 2018. godine Direktorat za radijacionu i nuklearnu sigurnost i bezbednost Srbije) je u vreme izrade nacionalnog pravilnika poput regulatornih tela zemalja Evropske unije izabrao vrednosti *clearance levels* za čvrste materijale prema smernicama Evropske komisije za opšte *clearance levels* u praksi [2] (u daljem tekstu: Smernice EK).

Iako su scenariji za izračunavanja *clearance levels* u čvrstim materijalima veoma slični u dva pomenuta seta, uz neznatne razlike u ulaznim podacima koji se koriste u ovim

scenarijima, postojale su i suštinske razlike. Dve osnovne razlike koje su dominirale su sledeće:

- u Standardu IAEA RS-G-1.7 je uveden dodatni scenario koji uključuje uticaj podzemnih voda prema modelu koji se koristi u RESRAD softveru [7], što je dovelo do značajnog sniženja *clearance levels* za rastvorljive radionuklide;

- u Standardu IAEA RS-G-1.7 su za prirodne radionuklide ( $^{40}\text{K}$ , i radionuklide iz lanaca  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$  i  $^{232}\text{Th}$ ) vrednosti za *clearance levels* izabrane na osnovu pažljive analize njihovog prisustva na planeti i uticaja na stanovništvo. I najvažnije, za potomke iz lanaca ( $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$  i  $^{232}\text{Th}$ ) su izabrane iste vrednosti za *clearance levels* kao i za njihove roditelje. Ovo je dovelo do značajnog povećanja *clearance levels* za sve potomke NORM radionuklida ( $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$  i  $^{232}\text{Th}$ ) u Standardu IAEA RS-G-1.7.

Posle paralelnog korišćenja dva pomenuta seta za *clearance levels* (duže od jedne decenije), u svetu je intenzivno rađeno na harmonizaciji ova dva pristupa. Konačni rezultat je da su i Evropska unija u najnovijoj direktivi kojom se propisuju sigurnosni standardi za zaštitu od štetnog uticaja izlaganja jonizujućim zračenjima [8] (u daljem tekst: Direktiva EU), kao i IAEA u najnovijim preporukama [9], usvojile scenarije i vrednosti za *clearance levels* prema Standardu IAEA RS-G-1.7.

Budući da je nedavno u Srbiji usvojen novi Zakon [10] i da se očekuje donošenje novih pravilnika, u nastavku rada prikazana je komparativna analiza vrednosti *clearance levels* za čvrste materijale u Nacionalnom pravilniku i u aktuelnoj Direktivi EU sa osvrtnom na korišćene pristupe, scenarije i parametre za izračunavanje ovih vrednosti u oba dokumenta, po uzoru na studiju poređenja standarda Evropske komisije i IAEA [11].

## 2. Pristupi određivanju *clearance levels* vrednosti u Nacionalnom pravilniku i Direktivi EU

U Nacionalnom pravilniku za *clearance levels* se koristi termin nivoi za oslobađanje od regulatorne kontrole materijala koji sadrži radionuklide veštačkog porekla. Prema Smernicama EK koje su korišćene pri izradi Nacionalnog pravilnika za granične nivoe *clearance levels* dobijene vrednosti izvedene su iz analize rezultata proračuna za scenarije izlaganja (ukupno 8) koji su obuhvatili spoljašnje izlaganje (3 scenarija za radnika na deponiji sa prisutnim materijalima koji sadrže radionuklide, vozača kamiona koji prevozi materijal koji sadrži radionuklide i stanara stambenog objekta koji je napravljen od materijala koji sadrže radionuklide), inhalaciju (2 scenarija za radnike na deoniji i decu u kući iz grupe 0-1 godina), ingestiju (2 scenarija za radnike na deponiji i decu u kući iz grupe 1-2 godina) i kontaminaciju u potkožnom tkivu od prašine na radnom mestu. Proračuni vrednosti za *clearance levels* za pojedinačne radionuklide su zasnovani na kriterijumu da granična godišnja doza ne bude veća od  $10 \mu\text{Sv}$  za pojedinca. Zaokruživanje dobijenih vrednosti izračunavanjem je vršeno na red veličine odnosno na  $0.01, 0.1 \dots 10.000 \text{ Bq} \cdot \text{g}^{-1}$ , a proračunom su obuhvaćeni i potomci konkretnog radionuklida. Scenario izlaganja od sadržaja konkretnog radionuklida u čvrstom materijalu koji bi imao najveći doprinos dozi uzima se kao ograničavajući. Dobijena koncentracija ( $\text{Bq} \cdot \text{g}^{-1}$ ) radionuklida je zatim upoređivana sa vrednostima iz preporučenih kriterijuma Evropske komisije za recikliranje metalnih delova [3] i konstrukcionih materijala i ruševina objekata [4] sa demontiranih nuklearnih postrojenja. Konačno, najmanja od tih vrednosti za određeni radionuklid je uzimana za *clearance level* za sadržaj tog radionuklida u čvrstom materijalu [11].

Standard IAEA RS-G-1.7 implementiran u najnovijoj Direktivi EU, za utvrđivanje *clearance levels*, pre svega, pravi razliku između veštačkih i prirodnih radionuklida, i ne pravi razliku između uranijuma i torijuma iz prirode i iz proizvodnje kao što je to u Smernicama EK. Prirodne radionuklide čine  $^{40}\text{K}$  i radionuklidi iz lanaca raspada  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$  i  $^{232}\text{Th}$ . Svi ostali radionuklidi su označeni kao veštački. Za proračun vrednosti za *clearance levels* korišćeni su scenariji izlaganja radnika i stanovništva (detaljno prikazani u posebnom IAEA dokumentu [12]) sa dva seta vrednosti parametara - jedan za realistične, a drugi za manje verovatne scenarije, kao i dodatni scenario za uticaj podzemnih voda. Za realistične scenarije korišćeni su parametri koji odgovaraju uslovima realnog izlaganja (manje konzervativni) i kriterijum za graničnu godišnju dozu za pojedinca od  $10 \mu\text{Sv}$ , a za manje verovatne scenarije korišćeni su više konzervativni parametri i za graničnu godišnju dozu od  $1 \text{mSv}$ . Za uticaj podzemnih voda odnosno za izlaganje od unosa vode uzeto je u obzir ponašanje radionuklida u podzemnim slojevima.

Na identičan način kao u Smernicama EK i u Standardu IAEA RS-G-1.7 utvrđivani su ograničavajući scenariji izlaganja i vršena su zaokruživanja dobijenih koncentracija (uključeni su i potomci radionuklida roditelja). Vrednosti za *clearance levels* za prirodne radionuklide nisu izvedene iz scenarija, već su vrednosti od  $10 \text{Bq}\cdot\text{g}^{-1}$  za  $^{40}\text{K}$  i  $1 \text{Bq}\cdot\text{g}^{-1}$  za ostale prirodne radionuklide iz lanaca ( $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$  i  $^{232}\text{Th}$ ) izabrane na osnovu analize koncentracije ovih radionuklida u rudama, kamenu i drugim prirodnim materijalima na planeti [11].

Pristup radionuklidima prirodnog porekla se razlikuje u oba dokumenta. Standard IAEA RS-G-1.7 polazi od pretpostavke da prirodni radionuklidi nisu relevantni za praksu, odnosno da se radijacioni nivoi za takve radionuklide izvode samo na osnovu analize njihovog prirodnog prisustva, sadržaja u zemlji i NORM materijalima, dok su prema Smernicama EK vrednosti *clearance levels* za radionuklide prirodnog porekla određene prema scenarijima kao i za sve ostale radionuklide. Razliku u pristupima najbolje opisuju izabrane vrednosti za *clearance levels* za radionuklide  $^{232}\text{Th}$  i  $^{226}\text{Ra}$  koji su prisutni kao kontaminanti u industrijskoj instalaciji, pa je u Smernicama EK  $0.01 \text{Bq}\cdot\text{g}^{-1}$ , dok je  $1 \text{Bq}\cdot\text{g}^{-1}$  preporučeno od strane Standarda IAEA RS-G-1.7 [11].

U Nacionalnom pravilniku navedeno je da se materijali koji sadrže radionuklide prirodnog porekla ne mogu odlagati u životnu sredinu ako je sadržaj  $^{40}\text{K} > 10 \text{Bq}\cdot\text{g}^{-1}$ , a za ostale prirodne radionuklide  $> 1 \text{Bq}\cdot\text{g}^{-1}$ , te se ove vrednosti uzimaju kao *clearance levels* za radionuklide prirodnog porekla za čvrste materijale u domaćoj legislativi.

Poseban dodatni scenario u Standardu IAEA RS-G-1.7 koji opisuje uticaj podzemnih voda na vodu koja se upotrebljava iz privatnih bunara zasnovan je na vrlo restriktivnom modelu, što doprinosi nižim vrednostima za neke rastvorljive radionuklide kao što su  $^{14}\text{C}$  i  $^{129}\text{I}$ . Ovim scenarijom za sve volatilne radionuklide uzeto je u obzir njihovo ispiranje delovanjem padavina i njihovo prodiranje kroz kontaminiranu zonu između površine zemlje i podzemnih voda. Daljom upotrebom ove vode za navodnjavanje, piće i uzgoj ribe, radionuklidi preko lanca ishrane dospevaju do čoveka, što ovaj scenario čini kompleksnom ingestijom.

Standard IAEA RS-G-1.7 kod scenarija u kome je moguće istovremeno izlaganje na više načina, kao na primer, scenario za radnika na deponiji ili u livnici, uzima u obzir doprinose od spoljašnjeg izlaganja, direktne ingestije i inhalacije, i ove doprinose dozi sumira. U Smernicama EK ovi slučajevi se razmatraju odvojeno, odnosno onaj tip izlaganja od kog je najveći doprinos dozi tretira se kao ograničavajući za određivanje vrednosti *clearance levels* za dati radionuklid sadržan u čvrstom materijalu.

### 3. Poređenje numeričkih vrednosti *clearance levels* u Pravilniku i Direktivi EU

Numerička poređenja u vidu odnosa vrednosti *clearance levels* u Nacionalnom pravilniku i Direktivi EU za sadržaj radionuklida veštačkog porekla u čvrstim materijalim prikazana su u tabeli 1 (po uzoru na studiju Evropske komisije [11]). Vrednosti *clearance levels* za radionuklide prirodnog porekla iste su u oba dokumenta, s tim što je potrebno naglasiti da su u Pravilniku o granicama sadržaja radionuklida u vodi za piće, životnim namirnicama, stočnoj hrani, lekovima, predmetima opšte upotrebe, građevinskom materijalu i drugoj robi koja se stavlja u promet [13] u kom su definisane granice sadržaja prirodnih radionuklida u mineralnim đubrivima date više vrednosti za uranijum iz prirode i za uranijum iz proizvodnje. Prema Standardu IAEA RS-G-1.7 što je usvojeno i u Direktivi EU, za uranijum iz proizvodnje, tj. lanac  $^{238}\text{U} + (^{238}\text{U} - ^{234}\text{Th} - ^{234\text{m}}\text{Pm} - ^{234}\text{U})$ , i za prirodni uranijum, tj. lanac  $^{238}\text{Usec} (^{238}\text{U} - ^{234}\text{Th} - ^{234\text{m}}\text{Pm} - ^{234}\text{U} - ^{230}\text{Th} - ^{226}\text{Ra} - ^{222}\text{Rn} - ^{218}\text{Po} - ^{214}\text{Pb} - ^{214}\text{Bi} - ^{214}\text{Po} - ^{210}\text{Pb} - ^{210}\text{Bi} - ^{210}\text{Po})$  koristi se ista granična vrednost od  $1 \text{ Bq}\cdot\text{g}^{-1}$ . Ovako definisana granična vrednost sigurno olakšava korišćenje sistema graničnih vrednosti *clearance levels*, s tim da se sa aspekta zaštite od zračenja mora imati u vidu sa da bi specifična aktivnost od  $1 \text{ Bq}\cdot\text{g}^{-1}$  za lanac  $^{238}\text{U} +$  imala godišnji doprinos dozi za pojedinca od  $10 \mu\text{Sv}$ , dok bi za lanac  $^{238}\text{Usec}$  ovaj doprinos dozi iznosio oko  $600 \mu\text{Sv}$ .

**Tabela 1. Odnos vrednosti *clearance levels* za radionuklide veštačkog porekla Nacionalnog pravilnika i Direktive EU.**

Odnos vrednosti Direktiva EU / Nacionalni pravilnik	Radionuklidi
0,1	C-14, Mn-53, Zn-65, Nb-93m, Ru-106, Cd-109, Sb-125, I-129, Cs-137, Eu-155, Tl-204
1	H-3, Be-7, Na-22, S-35, Cl-36, Ca-45, Sc-46, Mn-54, Co-56, Co-57, Co-60, Ni-59, Ni-63, Ge-71, Se-75, Sr-85, Sr-90, Zr-93, Nb-94, Nb-95, Mo-93, Tc-97, Tc-99, Ru-103, Pd-103, Ag-105, Ag-110m, Sn-113, Te-123m, Te-127m, Te-129m, Cs-131, Cs-134, Ce-139, Ce-144, Eu-152, Eu-154, Gd-153, Hf-181, Ta-182, W-181, Os-185, Bi-207, Th-229, U-232, U-233, Pu-238, Pu-239, Pu-240, Pu-242, Pu-244, Am-241, Am-242m, Am-243, Cm-245, Cm-246, Cm-247, Cm-248, Cf-248, Cf-249, Cf-251, Es-254
10	P-32, P-33, Ca-47, Sc-47, Sc-48, V-48, Cr-51, Mn-52, Fe-55, Fe-59, Co-58, As-73, As-74, As-76, As-77, Br-82, Rb-86, Y-90, Y-91, Zr-95, Mo-99, Tc-96, Tc-97m, Ru-97, Rh-105, Ag-111, Cd-115, Cd-115m, In-111, In-114m, Sn-125, Sb-122, Sb-124, Te-125m, Te-131m, Te-132, Te-134, I-126, I-131, Cs-129, Cs-132, Cs-135, Cs-136, Ba-131, Ba-140, La-140, Ce-141, Ce-143, Pr-143, Nd-147, Pm-147, Pm-149, Sm-151, Sm-153, Tb-160, Dy-166, Ho-166, Er-169, Tm-170, Tm-171, Yb-175, Lu-177, W-185, Re-186, Os-191, Os-193, Ir-190, Ir-192, Pt-191, Pt-193m, Au-198, Au-199, Hg-197, Hg-203, Tl-200, Tl-201, Tl-202, Pb-203, Bi-206, Ra-225, Pa-230, Pa-233, U-230, U-231, U-236, U-237, Np-237, Np-239, Pu-236, Pu-237, Pu-241, Cm-242, Cm-243, Cm-244, Bk-249, Cf-250, Cf-252, Cf-254, Es-254m
100	Sr-89, I-125, Cf-246, Cf-253, Es-253



Tabela 1 ukazuje da je za najveći broj radionuklida granična vrednost za *clearance levels* u Direktivi EU 10 puta veća od vrednosti u Nacionalnom pravilniku. Za nešto manji broj radionuklida vrednosti su iste u ova dva dokumenta. Pet radionuklida imaju 100 puta manje vrednosti u Nacionalnom pravilniku, dok je za jedanaest radionuklida vrednost 10 puta veća u Nacionalnom pravilniku.

Razlike u odnosu ovih vrednosti potiču od razlika u pristupu i izabranim scenarijima u dokumentima. Korišćeni parametri u realističnim scenarijima za dobijene vrednosti date u Direktivi EU su manje konzervativni u odnosu na parametre za korišćene scenarije za dobijene vrednosti date u Nacionalnom pravilniku, dok su za manje verovatne scenarije u Direktivi EU konzervativniji parametri, ali je kriterijum granične godišnje doze 100 puta veći, tj. 1 mSv.

Odnos od 100 puta između vrednosti *clearance levels* za pet radionuklida je posledica korišćenja parametara koji realnije opisuju uticaj radionuklida kratkoživećih alfa emitera. Odnos od 0,1 za važnije veštačke radionuklide, kao što su lakorastvorljivi  $^{14}\text{C}$  i  $^{129}\text{I}$  ili fisioni produkt  $^{137}\text{Cs}$ , je posledica manje restriktivnih pretpostavki, dok odnos od 10 puta potiče pre svega od kriterijuma za dozu malo verovatnog scenarija od 1 mSv godišnje, iako su parametri za ovaj scenario konzervativniji.

#### 4. Zaključak

Evropska komisija je pre usvajanja Direktive EU polazeći od pristupa koji je razmatran i u ovom radu, sprovela analizu vrednosti *clearance levels* [11] navedene u Smernicama EK i ovih vrednosti u Standardu IAEA RS-G-1.7, i opredelila se za vrednosti iz Standarda IAEA RS-G-1.7. Vrednosti *clearance levels* za sadržaj radionuklida u čvrstim materijalima u Direktivi EU određene su iz scenarija izlaganja u kojima su korišćeni parametri koji više odgovaraju realnim uslovima izlaganja, kao i tipovima, količinama i namenama materijala uz dodatno uključivanje uticaja podzemnih voda. Ovakav primenjeni koncept izračunavanja vrednosti za *clearance levels* u Direktivi EU trebalo bi uzeti u razmatranje prilikom usvajanja novog nacionalnog pravilnika, zajedno sa razmatranjem trenutno prisutnih materijala sa radionuklidima na našim prostorima, a koji bi mogli da budu predmet oslobađanja od regulatorne kontrole u narednom periodu.

#### 5. Literatura

- [1] Pravilnik o granicama radioaktivne kontaminacije lica, radne i životne sredine i načinu sprovođenja dekontaminacije, Službeni glasnik RS br. 38, 2011.
- [2] Practical Use of the Concepts of Clearance and Exemption, Part I, Guidance on General Clearance Levels for Practices, Radiation Protection 122, European Commission, 2000.
- [3] Recommended Radiological Protection Criteria for the Recycling of Metals from the Dismantling of Nuclear Installations, Radiation Protection 89, European Commission, 1998.
- [4] Recommended Radiological Protection Criteria for the Clearance of Buildings and Building Rubble from the Dismantling of Nuclear Installations, Radiation protection 113, European Commission, 2000.
- [5] Basis for the Definition of Surface Contamination Clearance Levels for the Recycling or Reuse of Metals Arising from Dismantling of Nuclear Installations,"



- Radiation Protection 101, European Commission, 1998.
- [6] International Atomic Energy Agency, Application of the concepts of Exclusion, Exemption and Clearance, Safety Guide, Safety Standards Series no. RS-G-1.7, IAEA, Vienna, 2004.
- [7] C. Yu et al., *User's Manual for RESRAD Version 6*, Argonne National Laboratory, 2001.
- [8] COUNCIL DIRECTIVE 2013/59/EURATOM of 5 December 2013 laying down basic safety standards for protection against the dangers arising from exposure to ionising radiation, and repealing Directives 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom and 2003/122/Euratom, Official Journal of the European Union L 13/1, January 2014.
- [9] International Basic Safety Standards for Radiation Protection and Safety of Radiation Sources, Safety Standards Series No. GSR Part 3, International Atomic Energy Agency (IAEA), Vienna, 2014.
- [10] Zakon o radijacionoj i nuklearnoj sigurnosti i bezbednosti, Službeni glasnik RS br. 95, 2018. i Službeni glasnik RS br. 10, 2019.
- [11] Comparative Study of EC and IAEA Guidance on Exemption and Clearance Levels, Radiation Protection 157, European Commission, Directorate-General for Energy Directorate D — Nuclear Energy Unit D4 — Radiation Protection, 2010.
- [12] Derivation of activity concentration values for exclusion, exemption and clearance, International Atomic Energy Agency, Safety Reports Series No. 44 Vienna, 2005.
- [13] Pravilnik o granicama sadržaja radionuklida u vodi za piće, životnim namirnicama, stočnoj hrani, lekovima, predmetima opšte upotrebe, građevinskom materijalu i drugoj robi koja se stavlja u promet, Službeni glasnik RS br. 36 od 10.05.2018.

**COMPARATIVE ANALYSIS OF CLEARANCE LEVEL VALUES  
OF THE SERBIAN NATIONAL REGULATIVE AND THE ACTUAL  
COUNCIL DIRECTIVE OF THE EUROPEAN UNION**

**Đorđe LAZAREVIĆ and Ivana MAKSIMOVIĆ**

*Public Company Nuclear Facilities of Serbia, Belgrade, Serbia,*

*[djordje.lazarevic@nuklearniobjekti.rs](mailto:djordje.lazarevic@nuklearniobjekti.rs), [ivana.maksimovic@nuklearniobjekti.rs](mailto:ivana.maksimovic@nuklearniobjekti.rs)*

**ABSTRACT**

A new Law on Radiation and Nuclear Safety and Security was adopted recently in Serbia (hereinafter: the Law), so in the forthcoming period it is possible to adopt new ones and harmonize existing rulebooks with the new Law, as well as with international regulations in this field. Following the intensive work on the harmonization of the approach of the European Union and the International Atomic Energy Agency (IAEA), at the international level, the values of radionuclide activity in solid materials have been adopted, which represent limit values for releasing from regulatory control, clearance levels. The aim of this paper is a comparative analysis of the clearance level value of the national regulations and the actual Council Directive of the European Union 2013/59/Euroatom, which prescribes the safety standards for protection against the harmful effects of ionizing radiation exposure. In addition to the comparison of clearance level values, a methodology for calculating these values with the scenarios used in the documents selected for the existing national regulations and in the EU directive is presented.

## RADIATION PROTECTION TRAINING IN SLOVENIA

**Matjaž KOŽELJ**

*Jožef Stefan Institute, Ljubljana, Slovenia, [matjaz.kozelj@ijs.si](mailto:matjaz.kozelj@ijs.si)*

### ABSTRACT

*The system of radiation protection training has been defined in harmonised Slovenian legislation during the accession of to EU. Training is performed through authorised organisation. In these organisations management and infrastructure must be evaluated, programmes approved and authorised radiation protection experts involved in training. Programmes for training are defined in the relevant regulation and cover 17 different categories of exposed workers. Special courses are required for members of radiation protection staff in nuclear and radiation facilities, but no additional training is required for persons responsible for radiation protection in other organisations. In parallel with the implementation of the new EU Directive from year 2013, some changes related to training were implemented, and consequences of these changes are discussed.*

### 1. Introduction

The system of radiation protection training in Slovenia has been designed during the process of legal harmonisation with the European Union. Before that, radiation protection training was defined in more details only for occupationally exposed workers in Krško NPP, while for other workers just basic requirements related to the duration of training were regulated. Two organisations were authorised for radiation protection training, but this authorisation was universal and based on recognition of the competency for radiation protection tasks in general.

One of the segments in the harmonisation of Slovenian legislation before accession to European Union were also law and regulations in the field of radiation protection. Apart from Euratom Treaty [1], which is the regulatory basis for all EU legislation in this field, the most important documents at that time in EU were Council Directive 96/29/Euratom of 13 May 1996 [2] (EUBSS96), laying down basic safety standards for the health protection of the general public and workers against the dangers of ionizing radiation, and Communication from the Commission concerning the implementation of Council Directive 96/29/Euratom [3].

In all these documents, only the general request has been established for countries to arrange for relevant training in the field of radiation protection to be given to occupationally exposed workers, apprentices and students. Request for training and education of qualified experts has been elaborated in more details in [3] enlisting the basic knowledge of a person qualified for implementation of radiation protection principles in the practice. Consequently, radiation protection training in EU countries has been regulated and implemented in dissimilar ways, even if the main objectives of training have been compatible and achieved to the comparable level. Therefore, it was not possible for us simply to adopt some “standard” approach or introduce some

“standard” programs and our arrangements in the field of radiation protection training are different from arrangements in other EU countries.

### 2. Original system of training in harmonised legislation (2004 to 2017)

During the harmonisation process (mainly in the years 2002 to 2004), entire new legislation in the field of radiation protection and nuclear safety has been developed in Slovenia, including the basic law [4] and second level legislation. In the new legislation, rules, responsibilities and duties of all persons involved in radiation protection were defined and allocated. The law has introduced **authorised radiation protection experts, authorised medical physics experts and authorised dosimetric services**. The definition of authorised experts follows the definitions in EUBSS96.

Although it was not a requirement in EU directive, the law has also introduced Radiation protection officers (RPOs). The definition of this category of workers was taken from International Basic Safety Standards [5], where radiation protection officer is:

*“An individual technically competent in radiation protection matters relevant for a given type of practice who is designated by the registrant or licensee to oversee the application of the requirements of the Standards”.*

In Slovenian legislation accomplishing of this task has been ensured through the requirement for operation of the radiation protection unit in nuclear and radiation facilities (which was also anticipated in EUBSS96) and the requirement for appointment of persons responsible for radiation protection in other facilities.

At that time, radiation protection units were already operational in Krško NPP and in Jožef Stefan Institute, which operates research reactor TRIGA Mk II. Workers in these units have been trained previously according to requirements for **radiation protection staff in power reactors** and there was no need to redefine general training requirements for them. This also applies for exposed workers in Krško NPP, since the radiation protection training was already a part of their professional training designed to standards of US manufacturer.

Position of the second type of radiation protection officer, **a person responsible for radiation protection**, was something new in Slovenia. According to the legislation, for all practices (except in nuclear and radiation facilities, where radiation protection units shall be established) a person responsible for radiation protection shall be appointed. The person “shall ensure the implementation and planning of radiation protection measures and co-operate with the competent ministries in matters of radiation protection”. Considering the scope of duties and responsibilities of a person responsible for radiation protection, it was clear that more comprehensive training is required.

### 3. Implementation of training (2004-2017)

Only authorised legal persons (i.e. organisation that is authorised as radiation protection expert) could perform radiation protection training. Authorisation is responsibility of the Slovenian Radiation Protection Administration (it is a part of the Ministry of Health), and includes approval of training programs (for particular categories of exposed workers), organisation (requirements for infrastructure and implemented quality management system), and requirement, that at least half of the training is must be

performed by persons, who are authorised radiation protection experts, specially authorised for the radiation protection training.

In the relevant regulation extensive and comprehensive lists of training programs and topics to be covered has been defined. In the process of approval of a training programs, organisation applying for the authorisation shall demonstrate compliance of submitted program (this includes also course materials) with the recommended syllabus in the regulation. Altogether 17 programs were defined for different categories of practices, and for each category a programme for exposed workers was defined and additional programme for persons responsible for radiation protection. For the radiation protection unit staff in nuclear and radiation facilities special and extensive training was required. The duration of programmes for exposed workers was from 6 hours (air crew, workers exposed to radon) to 200 hours (staff of radiation protection units in NPPs and nuclear reactors). Most of the training programs were between 12 and 24 hours. Additional training for persons responsible for radiation protection consisted from the basic training for exposed workers and 4 hours supplement related to legislation.

Training should finish with the written exam that must be repeated every five years. Members of radiation protection unit's staff and certain categories of persons responsible for radiation protection should be re-examined every two years.

Considering that the possibility of shorter, 8 hours training was foreseen for certain categories of "minimally exposed workers" (e. g. workers of subcontractors in Krško NPP) it is obvious, that the system was quite complicated and challenging, and consequently expensive, especially considering that only for certain categories in medicine and workers in Krško NPP the number of workers that should be trained is not minimal.

#### **4. Current requirements for the radiation protection training in Slovenia (2017 -)**

Current law [6] and second level legislation has been approved in last two years and are the result of requirements in the new Council Directive 2013/59/EURATOM [7] (EUBSS14) and also changes which were introduced to compensate observed problems and improve some legal procedures.

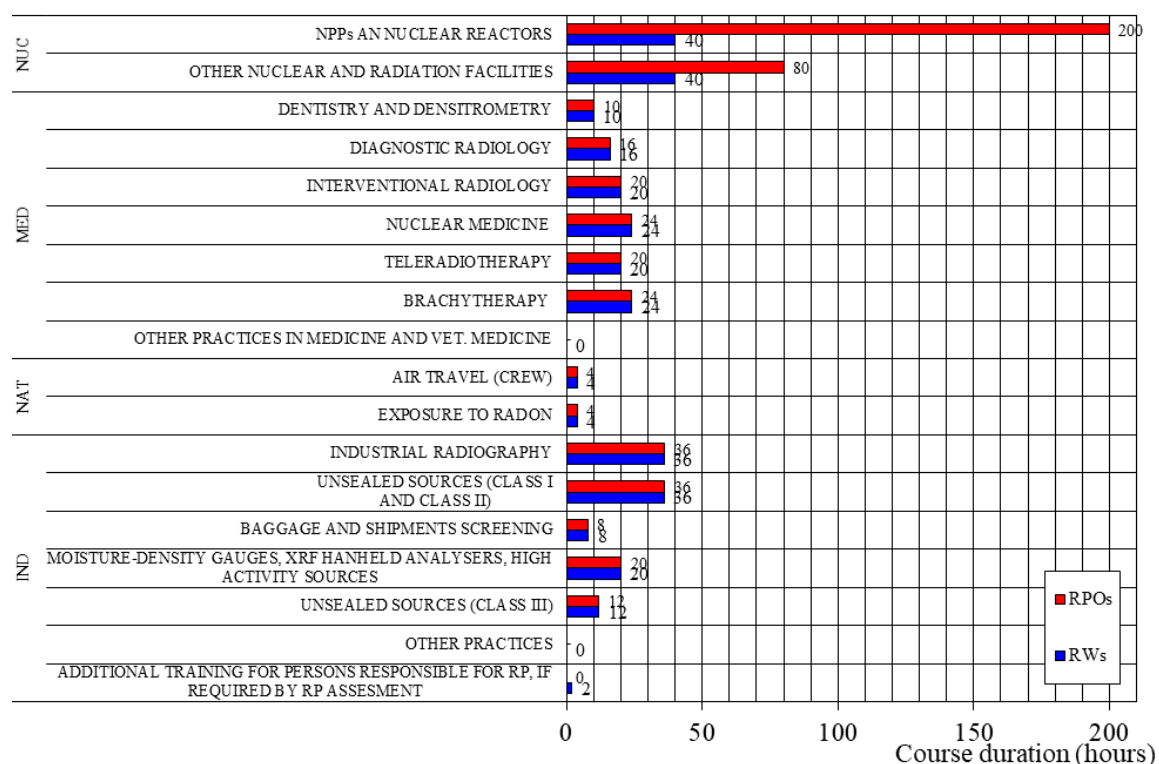
In general, the system of radiation protection training which is defined in the relevant regulation [8], has not been changed substantially. Total number of categories of workers is still 17, but since some categories of exposed workers and required duration of courses were changed, new approvals of programs and new authorisations for training organisations are required in the near future.

For workers in medicine and dental medicine additional training related to patient protection is required. Therefore, authorised medical physics expert must be involved in the preparation of a training programme and also in the course implementation. Authorisation for medical physics experts is valid only for particular areas (e.g. diagnostic and interventional radiology, teletherapy, radiotherapy, brachytherapy, and nuclear medicine). Authorisations for medical physics expert and also for other types of radiation protection experts are regulated in the law and in the special regulation.

In the Figure 1 all categories of radiation protection courses are presented. The duration of courses ranges from 4 hours (exposure to natural sources) to 200 hours (members of the radiation protection unit staff in NPPs and reactors). For some categories the duration of required courses has not been defined in the regulations. This should be done during licensing process for practice, when the document named *Assessment of*

*radiation protection* must be prepared by authorised radiation protection expert and submitted to regulatory body. In this document, all relevant issues regarding sources, use of sources, planned and potential exposures of workers, requirements for optimisation, dose constraints, etc. are defined. A part of the assessment is also determination of requirements for training of workers.

Required duration of courses for persons responsible for radiation protection for all categories are the same as for “normal” exposed workers. Although there is a possibility that short additional training is required in the assessment of radiation protection, this has not been done yet to our knowledge. Consequently, persons responsible for radiation protection are lacking training necessary for implementation of their duties, which are even more complex than before.



**Figure 1. Duration of courses for workers and radiation protection officers (RPOs) according to [8]. In all categories (except in those within NUC(lear) group) RPOs are persons responsible for radiation protection. In group NUC, RPOs are members of the radiation protection unit staff. For those categories without duration, see text.**

Re-examination of workers and persons responsible for radiation protection is required every five years. Before the re-examination, they attend refreshing course in our Nuclear training centre, while other training provider in Slovenia (presently, only two organisations provide radiation protection training) requires attendance of the initial course. We think that subject should be regulated consistently and unified, with the consideration of rules and requirements for continuous training.

Other “peculiarity” is also requirement that all people implementing radiological procedures in medicine should attend initial course every five years. It is also our

opinion, that decay of knowledge in this important category of exposed workers should be compensated in other way.

Workers in dental medicine are considered to be special category. They are not considered to be exposed workers, but only persons who manage radiation sources. Therefore, only training related to protection of patients is required.

Special category, “exposed workers, who work under supervision”, has been also defined in addition to “normal” exposed workers. These workers are, for example, workers of subcontractors in Krško NPP, or cleaning staff in research reactor TRIGA Mk II and other research laboratories in Jožef Stefan Institute. For this category of workers required radiation protection training is 8 hours. For training of workers of subcontractors in Krško NPP, authorisation was issued to NPP’s training department.

### 5. Conclusions

We have seen that the system of radiation protection training in Slovenia is elaborate and complicated. We have dedicated courses for 17 categories of workers, with additional requirements (and courses) for members of radiation protection unit staff in nuclear facilities, and workers who work under supervision.

While designing radiation protection courses to provide optimised contents for each category of workers must be praised, some practical problems have serious consequences for the implementation of the training. This is especially true for categories with minimal number of workers. Training for them is expensive and requires special planning and organisation of courses.

The highest numbers of exposed workers attend radiation protection courses for medicine and nuclear facilities. While courses for nuclear workers have not changed basically for years and courses are implemented regularly without special problems, the courses for medical staff were recently changed to include extended contents related to protection of patients with obligatory involvement of authorised medical physics expert. The training for persons responsible for radiation protection is limited to the basic training for exposed workers. Considering the duties and responsibilities of responsible persons, this training is too short and superficial and should be extended and broadened immediately.

Requirements for retraining of workers are limited to the request for re-examination, which is far from optimal. For workers involved in radiological procedures, full (initial) training is required every five years. This approach also is not in accordance with requirements and practice for continuous professional training and education.

### 6. References

- [1] Treaty establishing the European Atomic Energy Community (EAEC or EURATOM Treaty) signed in Rome on 25 March 1957.
- [2] Council Directive 96/29/Euratom of 13 May 1996 laying down basic safety standards for the protection of the health of workers and the general public against the dangers arising from ionising radiation, Official Journal of the European Communities, No. L 159, 29/06/1996, 1996, 1–114.
- [3] Communication from the Commission concerning the implementation of Council Directive 96/29/Euratom laying down basic safety standards for the protection of the health of the workers and the general public against the dangers arising from



ionising radiation, Official Journal of the European Communities, No. C 133, 30/04/1998, 1998, 3–22.

- [4] Act on Ionising Radiation Protection and Nuclear Safety, Official Gazette of Republic of Slovenia, No. 67, 2002, 7603–7635.
- [5] IAEA, ILO, OECD, PAHO, WHO, International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources, Safety Series No. 115, IAEA, Vienna, 1996.
- [6] Ionising Radiation Protection and Nuclear Safety Act (ZVISJV-1), Official Gazette of the Republic of Slovenia, No. 76/2016, 2016.
- [7] Council Directive of 5 December 2013 laying down basic safety standards for protection against the dangers arising from exposure to ionising radiation, and repealing Directives 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom and 2003/122/Euratom, Official Journal of the European Union L-13 of 17/01/2014, 2014.
- [8] Rules on the obligations of the person carrying out a radiation practice and person possessing an ionizing radiation source, Official Gazette of the Republic of Slovenia, No. 43/2018, 2018.

### **OBUKE ZA ZAŠTITU OD ZRAČENJA U SLOVENIJI**

**Matjaž KOŽELJ**

*Institut Jožef Stefan, Ljubljana, Slovenija, [matjaz.kozelj@ijs.si](mailto:matjaz.kozelj@ijs.si)*

#### **SADRŽAJ**

Sistem obuke za zaštitu od zračenja definisan je u usklađenom slovenačkom zakonodavstvu tokom pristupanja EU. Obuka se vrši preko ovlašćenih organizacija. U ovim organizacijama menadžment i infrastruktura moraju biti ocenjeni, a programi i ovlašćeni stručnjaci za zaštitu od zračenja koji su uključeni u obuku odobreni. Programi za obuku su definisani odgovarajućim propisom i obuhvataju 17 različitih kategorija izloženih radnika. Za članove osoblja u nuklearnim i radijacionim postrojenjima potrebni su specijalni kursevi i obuke, dok dodatna obuka za osobe odgovorne za zaštitu od zračenja u drugim organizacijama nije potrebna. Paralelno sa primenom nove direktive Evropske unije od 2013. godine, sprovedene su i neke promene vezane za obuku, a posledice ovih promena su diskutovane u ovom radu.

## KORIŠĆENJE VIRTUELNIH PROGRAMSKIH APLIKACIJA U EDUKACIJI

**Mirjana ĐURAŠEVIĆ<sup>1</sup>, Zorica OBRADOVIĆ<sup>1</sup> i Katarina RAJKOVIĆ<sup>2</sup>**

1) *Institut za nuklearne nauke „Vinča”, Centar za permanentno obrazovanje, Univerzitet u Beogradu, Beograd, Srbija, [mirad@vin.bg.ac.rs](mailto:mirad@vin.bg.ac.rs), [zoobradovic@gmail.com](mailto:zoobradovic@gmail.com)*

2) *Visoka tehničko tehnološka škola strukovnih studija, Kruševac, [katar1970@yahoo.com](mailto:katar1970@yahoo.com)*

### SADRŽAJ

*Centar za permanentno obrazovanje kao deo Instituta za nuklearne nauke „Vinča” se dugi niz godina bavi dopunskim stručnim obrazovanjem i osposobljavanjem stručnjaka multidisciplinarnih profila koji u svom radu koriste radioaktivne materijale i generatore jonizujućih zračenja. Zajedničko za sve kurseve u Centru, osim visokog kvaliteta obuke, je i stalno praćenje i uvođenje savremenih i novih metoda edukacije.*

*Sve veći razvoj informacionih tehnologija uticao je i na razvoj metoda i tehnika u samom obrazovanju. Najnoviji trend u edukaciji je da se realne laboratorije zamenjuju virtuelnim laboratorijama. Zaposleni u Centru za permanentno obrazovanje odlučili su da svoje kurseve oplemene i obogate primenom virtuelnih programskih aplikacija koje će pomoći da se polaznicima kurseva na jednostavan, lak i zabavan način približe osnovni pojmovi vezani za siguran i bezbedan rad sa radioaktivnim izvorima i generatorima jonizujućih zračenja poštujući sve mere zaštite od jonizujućih zračenja. U ovom radu prikazane su neke od virtuelnih aplikacija koje se koriste u okviru praktičnih vežbi na kursovima iz oblasti osnova radijacione fizike i osnovnih principa zaštite od jonizujućih zračenja.*

### 1. Uvod

Radioaktivnost i jonizujuće zračenje sastavni su deo našeg prirodnog okruženja pa se rizici od izloženosti jonizujućem zračenju ne mogu eliminisati u potpunosti, ali se mogu značajno smanjiti. Sve veća primena izvora jonizujućih zračenja u medicini, industriji i naučnoistraživačkoj oblasti dovela je do potrebe za razvojem koncepta zaštite od jonizujućih zračenja. Stoga je od ključnog značaja da rukovanje radioaktivnim izvorima i generatorima jonizujućih zračenja, kao i rukovanje nuklearnim otpadom, bude u skladu sa određenim standardima bezbednosti koji imaju za cilj da zaštite one koji su izloženi jonizujućem zračenju. Trenutno važeći princip zaštite je zasnovan na činjenici da je izlaganje ljudi zračenju neophodno smanjiti na najmanji mogući nivo. Ovaj princip naziva se ALARA (As Low As Reasonably Achievable) i uveden je kroz publikacije Međunarodne komisije za zaštitu od zračenja (ICRP) [1].

Međunaradni standardi koje izdaje Međunarodna agencija za atomsku energiju (IAEA) - Basic Safety Standards, predstavljaju međunarodna dokumenta u kojima su dati osnovni principi, zahtevi i preporuke za zaštitu ljudi i životne sredine od radijacionog rizika [2]. Implementacija Standarda u punoj meri zavisi od postojanja regulatornog tela koje je u svakoj državi odgovorno za radijacionu i nuklearnu sigurnost i bezbednost.

Direktorat za radijacionu i nuklearnu sigurnost i bezbednost Srbije je nezavisno regulatorno telo koje vrši regulatorne, stručne i sa njim povezane izvršne poslove u oblasti radijacione i nuklearne sigurnosti i bezbednosti, u skladu sa Zakonom o radijacionoj i nuklearnoj sigurnosti i bezbednosti Srbije [3]. Jedan od aspekata delovanja Direktorata odnosi se i na kontinuirano obrazovanje i obuku lica koja rukuju izvorima zračenja ili se kreću u polju izvora jonizujućih zračenja. Direktorat imenuje ovlašćena pravna lica za dopunsko obučavanje i osposobljavanje koja sprovode dopunska obučavanja u skladu sa pravilnikom Sl. gl. RS 31/2011 u kome je detaljnije definisan program za dopunsko obučavanje i osposobljavanje profesionalno izloženih lica i lica odgovornih za sprovođenje mera zaštite od jonizujućih zračenja. Obavezan deo svakog programa dopuskog obučavanja su i praktične vežbe koje se mogu realizovati u vidu demonstracija, laboratorijskih vežbi ili simulacija. Celokupna zakonska regulativa koja se odnosi na permanentno obrazovanje profesionalno izloženih lica i lica odgovornih za sprovođenje mera zaštite od jonizujućih zračenja oslanja se na međunarodne preporuke i standarde [4, 5].

Centar za permanentno obrazovanje Instituta za nuklearne nauke „Vinča” je ovlašćeno pravno lice za dopunsko obučavanje i osposobljavanje profesionalno izloženih lica i lica odgovornih za sprovođenje mera zaštite od jonizujućih zračenja. U okviru praktičnih vežbi koje se sprovode u Centru uvedeno je i korišćenje virtuelnih programskih aplikacija čiji je cilj da se polaznicima kurseva na jednostavan, lak i zabavan način približe osnovni pojmovi vezani za siguran i bezbedan rad sa radioaktivnim izvorima i generatorima jonizujućih zračenja poštujući sve mere zaštite od jonizujućih zračenja. U ovom radu prikazane su neke od korišćenih virtuelnih programskih aplikacija.

## 2. Virtuelni programi

Savremeni razvoj nauke i tehnologije nameće i potrebu stalnog usavršavanja i edukacije. Doživotno učenje promovisano je tokom sastanka Evropskog saveta u Briselu 2005. godine. U novije vreme pojavljuje se pojam „andraversiti”, koji se odnosi na kontinuirano obrazovanje. Ovakav oblik obrazovanja se u praksi vezuje za netradicionalne oblike visokog obrazovanja koji je uglavnom usmeren na obrazovanje odraslih i predstavlja dopunu neformalnog modela obrazovanja [6].

Uporedna istraživanja koja su sprovedena u Americi, Evropskoj uniji i Kini pokazala su da stalna edukacija i dobra obučenost radnika značajno doprinosi rastu produktivnosti [7]. Savremeni trendovi u obrazovanju su da se u procesu edukacije klasične praktične vežbe laboratorijskog tipa zamenjuju sa praktičnim vežbama uz korišćenje virtuelnih programskih aplikacija. Prednosti ovakvih praktičnih vežbi ogledaju se u tome što su uslovi eksperimenta strogo kontrolisani i što korišćenje virtuelnih programskih aplikacija omogućava korisnicima uvid u način i dinamiku funkcionisanja različitih opcija rešenja određenog problema. Ovakva vrsta praktičnih vežbi donosi uštedu i vremena i novca.

U oblasti korišćenja izvora jonizujućih zračenja edukacija se odnosi na praktičan rad sa radioaktivnim izvorima i generatorima jonizujućih zračenja, poštujući osnovne principe zaštite od jonizujućih zračenja. Korišćenje virtuelnih programskih aplikacija u sistemu edukacije u određenoj meri može da zameni praktičan rad sa radioaktivnim izvorima i samim tim smanji nepotrebna izlaganja jonizujućem zračenju lica na obuci. Značaj virtuelnih programskih aplikacija se ogleda i u tome što može omogućiti profesionalno

izloženim licima da provere postupak i proceduru rada pre praktičnog rada sa radioaktivnim izvorima.

### **3. Primena virtuelnih programa u edukacijama Centra za permanentno obrazovanje**

Centar za permanentno obrazovanje je deo Instituta za nuklearne nauke „Vinča” koji se već 60 godina bavi dopunskim stručnim obrazovanjem. Kursevi koji se organizuju u Centru, a pokrivaju oblast jonizujućeg zračenja, namenjeni su stručnjacima multidisciplinarnih profila koji rade u industriji, medicini i naučnoistraživačkoj oblasti i koji u svom svakodnevnom radu koriste radioaktivne materijale i generatore jonizujućih zračenja. Najvažniji zadatak svakog kursa jeste da se polaznicima približe osnovni principi i mere zaštite od jonizujućih zračenja. Cilj mera zaštite pri radu sa otvorenim i zatvorenim izvorima jonizujućih zračenja je da se izlaganje svede na najmanji prihvatljivi nivo. Da bi se to postiglo treba znati kako vreme, rastojanje i zaštitni ekrani utiču na dozu koju mogu primiti profesionalno izložena lica na svom radnom mestu. Primita doza u polju izvora jonizujućih zračenja je direktno proporcionalna vremenu izlaganja, dok je obrnuto proporcionalna kvadratu rastojanja od izvora jonizujućeg zračenja. Uloga zaštitnih ekrana je da smanji intenzitet zračenja do graničnog nivoa.

Sastavni deo svakog kursa koji se organizuje u Centru predstavljaju praktične vežbe čiji je zadatak da se polaznici upoznaju sa dozimetrijskom instrumentacijom i da im se približe sve mere zaštite od jonizujućih zračenja.

Težnja zaposlenih u Centru za permanentno obrazovanje, prateći najnovije trendove u edukaciji, je da se realne laboratorije kada god je to moguće zamene virtuelnim laboratorijama.

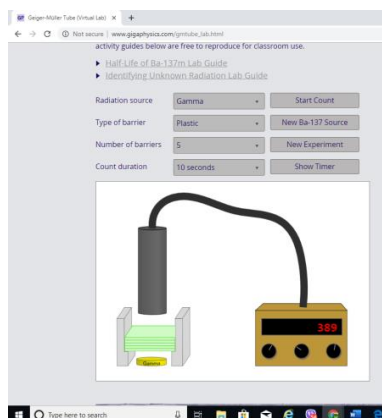
Primena virtuelnih programskih aplikacija u Centru za permanentno obrazovanje dominantna je u nastojanju da se na jednostavan i bezbedan način polaznicima kurseva približe osnovni pojmovi radijacione fizike (vrste jonizujućih zračenja, zakon radioaktivnog raspada, interakcija zračenja sa materijom) kao i osnovni principi zaštite od jonizujućih zračenja. Za tu svrhu se koriste dve programske aplikacije dostupne na internetu [8, 9]. Jedna od tih programskih aplikacija se nalazi na sajtu GigaPhysics/ Geiger-Müller Tube [8], dok je druga razvijena na Univerzitetu Kolorado kao virtuelna hemijska laboratorija/ nuklearna hemija [9]. Na Slici 1 i 2 prikazane su eksperimentalne postavke aparatura koje se koriste u ovim programskim aplikacijama. Osnovni delovi aparatura su detektor zračenja, izvor zračenja i različiti apsorberi. Kao detektor zračenje i u jednoj i u drugoj aplikaciji koristi se GM brojač. Izvor zračenja može se izabrati tako da bude alfa emiter, beta emiter, ili alfa-gama ili beta-gama emiter, dok se kao apsorberi zračenja mogu koristiti papir, karton, aluminijum i olovo različitih debljina.

Kada je reč o zakonu radioaktivnog raspada u okviru programske aplikacije GigaPhysics/ Geiger-Müller Tube moguće je odrediti vreme poluraspada ukoliko za izvor zračenja postavimo Ba-137m. Potrebno je odrediti odbroj na GM brojaču bez prisutnog izvora i sa izvorom Ba-137m. Vreme merenja takođe biramo sami, i u ovom slučaju može biti 10s. Kada stavimo radioaktivni izvor potrebno je da svakih 30s zabeležimo odbroj na GM brojaču i tako bar dvadeset puta. Kada se dobijeni odbroj umanji za odbroj fona dobija se broj raspada koji se desio za 10s. Dobijene vrednosti mogu se uneti u tabelu i ucrtati na grafiku, sa koga je onda moguće odrediti vreme za koje se broj raspada u posmatranom izvoru smanjio na pola [8].

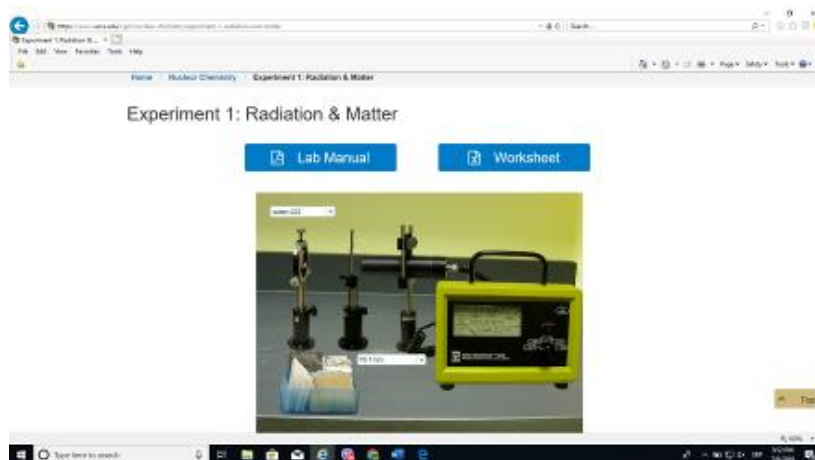
U okviru mera zaštite od jonizujućih zračenja obe virtuelne programske aplikacije se mogu koristiti za ispitivanje uticaja zaštitnih ekrana kao jedne od mera zaštite od jonizujućih zračenja. Jedan deo vežbi odnosi se na merenje određenog izvora bez zaštitnog ekrana i sa različitim vrstama zaštitnih ekrana. Razlika u odbroju koja se dobije na GM brojaču jasno će pokazati koja vrsta materijala se može koristiti kao zaštita od alfa, beta ili gama zračenja. Ovakva vežba može se koristiti i u slučaju merenja nepoznatog izvora, kako bi se odredila karakteristika izvora koja govori o vrsti emitovanog zračenja.

Drugi deo vežbi odnosi se na merenje određenog izvora bez zaštitnog ekrana i sa određenim zaštitnim ekranom ali različitim debljina. Na ovaj način moguće je odrediti poludebljinu apsorbera, tj. debljinu apsorbera koja intezitet zračenja smanjuje na polovinu. Promenom debljine zaštitnog ekrana moguće je odrediti i debljinu koja ostvaruje optimalnu zaštitu od posmatranog izvora jonizujućeg zračenja [8, 9].

U okviru programske aplikacije razvijene na Univerzitetu Kolorado postoji i deo vežbe koji se odnosi na uticaj rastojanja u zaštiti od jonizujućeg zračenja. Zadatak je da se promenom rastojanja izvora prati promena odbroja na GM brojaču i uoči zakonitost koja prati tu promenu [9].



Slika 1. Korišćenje GM brojača u virtuelnoj softverskoj aplikaciji [8].



Slika 2. Korišćenje GM brojača za usvajanje i bolje razumevanje znanja iz osnova radijacione fizike [9].

### 4. Zaključak

Prateći savremene trendove u obrazovanju Centar za permanentno obrazovanju Instituta za nuklearne nauke „Vinča“ radi na stalnom osavremenjavanju svojih kurseva. Kursevi koji se organizuju za potrebe edukacije profesionalno izloženih lica koji rukuju sa izvorima jonizujućih zračenja, ili se kreću u polju zračenja podrazumeva teorijske časove i praktične vežbe. U sistemu edukacije praktičnim vežbama se daje poseban značaj. Jedan oblik praktičnih vežbi su klasične laboratorijske vežbe dok je drugi savremeniji oblik organizacije praktičnih vežbi zasnovan na primeni virtuelnih programskih aplikacija. Cilj korišćenja programskih aplikacija je da se polaznicima kursa približe osnovni pojmovi vezani za osnove radijacione fizike, kao i osnovne mere zaštite pri radu sa izvorima jonizujućih zračenja. U radu su prikazane dve programske aplikacije dostupne na internetu koje se koriste na kursovima koje organizuje Centar za permanentno obrazovanje. Jedna se nalazi na internet sajtu GigaPhysics a druga je razvijena na Univerzitetu Kolorado. Obe programske aplikacije su vrlo jednostavne ali u isto vreme i vrlo korisne kao pomoć predavačima u realizaciji predviđenih tema. Sledeći korak u osavremenjavanju edukacija koje organizuje Centar za permanentno obrazovanje je razvoj novih programskih aplikacija koje će biti primenjene u situacijama u kojima nije moguće organizovati praktične vežbe.

### 5. Zahvalnica

Ovaj rad je urađen u okviru projekta 171018 koji finansira Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

### 6. Literatura

- [1] 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 60, International Commission on Radiological Protection (ICRP), Oxford, Pergamon Press, 1991.
- [2] Fundamental Safety Principles, Safety Fundamentals No. SF-1, IAEA, Vienna, 2006.
- [3] Zakon o radijacionoj i nuklearnoj sigurnosti i bezbednosti. Sl. glasnik RS br. 95/2018 i 10/2019, 2019.
- [4] Diagnosis and Treatment of Radiation Injuries, Safety Reports Series No 2, IAEA, Vienna, 1998.
- [5] Establishing the Infrastructure for Radiation Safety, Specific Safety Guide No. SSG-44, IAEA, Vienna, 2018.
- [6] J. M. Molina Jorda. Virtual tools: virtual laboratories for experimental science – an experience with VLC tool, *Procedia – Soc. Behav. Sci.* 106, 2013, 3355 – 3365.
- [7] G. Chryssolouris, D. Mavrikios, D. Mourtzis. Manufacturing Systems: Skills & Competencies for the Future, *Procedia CIRP* 7, 2013, 17 – 24.
- [8] D. Harshbarger. GigaPhysics, Virtual Labs - Geiger-Müller Tube., internet adresa: [http://www.gigaphysics.com/gmtube\\_lab.html](http://www.gigaphysics.com/gmtube_lab.html), Updated July 18, 2016



- [9] D. R. Anderson. University of Colorado at Colorado Springs, Virtual General Chemistry Laboratories – Nuclear Chemistry, internet adresa <https://www.uccs.edu/vgcl/nuclear-chemistry>, 2005.

### USING VIRTUAL SOFTWARE APPLICATIONS IN EDUCATION

**Mirjana ĐURAŠEVIĆ<sup>1</sup>, Zorica OBRADOVIĆ<sup>1</sup> and Katarina RAJKOVIĆ<sup>2</sup>**

1) *Vinča Institute of Nuclear Sciences, Center for Permanent Education, University of Belgrade, Belgrade, Serbia, [mirad@vin.bg.ac.rs](mailto:mirad@vin.bg.ac.rs), [zoobradovic@gmail.com](mailto:zoobradovic@gmail.com)*

2) *College of Applied Studies of Technics and Technology, Kruševac, Serbia, [katar1970@yahoo.com](mailto:katar1970@yahoo.com)*

#### ABSTRACT

Center for permanent education (CPE) of the “Vinča” Institute of nuclear sciences is a unique educational institution in Serbia. The main objective of the CPE is an additional and complementary education of various profiles of specialists who use radioactive isotopes and sources of ionizing radiation in their everyday work. The CPE aims to improve the quality of its services and strives to continuously follow and introduce modern and new methods of education.

The increasing development of information technologies has influenced the development of methods and techniques in the education itself. The latest trend in education is to replace the real laboratories with the virtual ones. The employees of the Center for Permanent Education have, therefore, decided to enrich the CPE courses with virtual software applications. Their use explains the basic concepts of ionizing radiation protection and safety in a simple, easy and fun way. In this paper, we describe some of the virtual software applications that are used in the laboratory curriculum of the CPE courses aimed at furthering education of professionals who work with radioactive sources and generators of ionizing radiation.



## OVERVIEW OF THE EXISTING UAV REGULATORY FRAMEWORK IN EUROPEAN COUNTRIES IN THE CONTEXT OF AN EMERGENCY RESPONSE AND EMERGENCY RESPONSE EXERCISES

Miloš DAVIDOVIĆ<sup>1</sup>, Alexandra HELBIG<sup>2</sup>, Jiří NOHÝL<sup>3</sup>  
and Miloš ŽIVANOVIĆ<sup>1</sup>

- 1) *Vinča Institute of Nuclear Sciences, University of Belgrade, Belgrade, Serbia, davidovic@vinca.rs, milosz@vinca.rs*
- 2) *Federal Office for Radiation Protection, Oberschleissheim, Germany*
- 3) *VTÚ – Military Technical Institute, Praha, Czech Republic*

### ABSTRACT

*Unmanned aerial vehicles - UAVs, more colloquially known as drones, can be of great help in high resolution data acquisition, especially in situations where direct, on-the-ground involvement of trained personnel would be strongly undesirable. One such case is an emergency response following a nuclear or radiological event. Drone mounted with array of compact sensors, which may include specialized equipment not commonly found in the payload, such as gamma spectrometer, would be of great help to first responders, of course under assumption of a reliable data link in a complicated environment. Issue that complicates use of drones in emergency situations, and maybe even more so in research and exercises (that must precede any realistic use) is heterogeneous regulatory framework that currently exists in European countries. This fragmentation originated from the fact that European Commission left regulation of drones under 150kg to Member States. While new harmonizing legislation is under discussion, various national UAV regulations are still in place, with strong similarities but also with contrasting elements. This work summarizes current status of various national UAV regulations in the context of emergency response and also gives perspective into future trends.*

### 1. Introduction

The need for use of drones in emergency response is almost self-evident. Their use in such situations can bring a number of advantages, such as an increased spatial and temporal resolution for environmental measurements, especially if it would not be safe to involve trained personnel directly on-the-ground, e.g. in an emergency response following a nuclear or radiological event. However, development of drones and specialized payloads suitable for emergency situations is a very demanding task, often requiring involvement of a number of research groups that, unfortunately, may come from areas with different legal framework for drone use, thus bringing additional layer of complexity to an already non-trivial task. This fragmentation in legal framework initially came from the fact that European Commission left regulation of drones with maximum take-off mass under 150kg to Member States. Fragmentation led to some

contrasting elements in UAV regulations, which, strictly speaking would not pose a significant issue in emergency situations where exemption could be promptly granted by authorities, however this may not be the case for testing and exercises which must precede any realistic use. Furthermore, heterogenous legal framework that was based on UAV maximum take-off mass (MTOM) criteria reduces competitiveness of European drone manufacturers.

These are one of the main reasons why harmonization of legislation targeting drones is an important topic in both industry and research, since eliminating heterogenous legal environment would make pan-European cooperation simpler and increase competitiveness of the European drone industry. This problem was recognized at the EU level, and large efforts were put into development of a harmonized drone legislation across all member states. The efforts were led by the European Agency of Safety Aviation (EASA). The main goal of this effort, besides increasing competitive advantage and cooperation potential of manufacturers and research groups was also to ensure the safety and security of all European citizens who could potentially be affected by drone activities. This approach is aiming to make Europe the “first region in the world to have a comprehensive set of rules ensuring safe, secure and sustainable operations of drones both, for commercial and leisure activities” [9]. This was (partly) done by distinguishing drones by associated risk and not solely by their mass. Thus, the required procedures and rules to be applied when conduction UAV operation, are made in such a way to be in accordance and proportion to the “nature and risk of the operation or activity and adapted to the operational characteristics of the unmanned aircraft”. The rules also must acknowledge specificities of the area of operations e.g. population density, surface topology and the presence of buildings.

“16ENV04 Preparedness, Metrology for mobile detection of ionising radiation following a nuclear or radiological incident” (in the following text – Preparedness) is a project within EMPIR framework. EMPIR is co-financed by Horizon 2020 and is specifically aimed at metrology institutes. One of the main goals of the Preparedness project is development of Unmanned Aerial Measurement Systems (UAMS), along with the novel methods and procedures for their use. As already introduced, one of the limiting factors for application of UAMS for emergency response is the legislative regarding UAVs, which is not entirely harmonized in Europe, thus the outline of this work is the following. First, we will briefly describe Preparedness project. Then we will give a brief introduction to the upcoming harmonizing EU legislative, and also give examples of some of the contrasting elements in current legislative in selected EU member states in the context of an emergency response. Finally, we will conclude with a set of minimum requirements needed for drones and their operators that takes into account requirement from both existing national and unifying European regulations.

### **2. Preparedness project**

Preparedness project is a three-year project that started in 2017. The project involves 17 partners – 3 National Metrology Institutes, 3 Designated Institutes, European Commission Joint Research Centre, and 10 other research institutes, testing laboratories, universities and private companies. The main goal of Preparedness project is to prepare to adequately respond to nuclear and radiological events. Need for preparedness, for fast and reliable response and for exchange of information is stated in the several

International Atomic Energy Agency and European Commission documents, among others [5, 6, 7].

These events may cause exposure of public to ionising radiation and widespread radioactive contamination. In such cases, it is of critical importance to obtain appropriate measurement data, which will enable radiation protection authorities and other decision makers to deal with the situation in a timely manner. Large scale decontamination is often not possible to perform, and in such cases, it is necessary to perform monitoring of the affected areas. Due to the possible impact on human health, but also possible tremendous economic and political consequences, the measured data need to be metrologically sound. Measurements in the field are difficult, due to the wide range of different scenarios which entail many different radionuclides in different matrices and different measurement geometries. It is therefore necessary in many cases to improve the existing methods and procedures and to develop new ones.

Within Preparedness, several main goals will be pursued. Transportable air sampling systems will be developed and tested, citizen networks will be investigated and possibility to use the data provided by such networks in emergency response will be evaluated, the use of passive dosimeters for long term area monitoring will be evaluated and new harmonized procedures will be developed and the results of the project will be disseminated to stakeholders to improve uptake. Finally, new UAMS will be developed, extensive testing will be performed and new methods will be created. This will allow reliable calibration, metrological traceability and efficient use of such systems.

### **3. Overview of relevant legislative in Europe**

Unmanned aerial systems use in radiological and nuclear events is on the increase. Such systems can be used in case of widespread contamination [4], and for search for uncontrolled radioactive sources [8]. However, as previously stated, one of the impediments to the development of drone systems is heterogenous legal framework that exists in Europe. Since harmonizing EU regulatory framework will (final version is published in June 2019, [9]) largely reduce the contrasting elements in individual member states, and will be legally binding we will first state main points of this new regulatory framework.

While previous version of regulations had maximum take-off mass as an important criterion, the new unifying regulation introduces UAV operation categories based on the “risk level criteria as well as other criteria” that can be associated to vehicle when it is used. New regulation recognizes three categories of UAS (unmanned aircraft system) operations: ‘open’, ‘specific’ and ‘certified’ category. Each category brings additional level of needed authorization for drone use. The least stringent UAS operations are categorized in the ‘open’ category, and are not subject to any prior operational authorization, nor it is required that the UAS operator make any declaration before the beginning of operation. The next category of operations - ‘specific’ category requires authorization issued by the competent authority, or a declaration made by a UAS operator. These operations cover use cases that present a higher risk and for which “a thorough risk assessment should be conducted to indicate which requirements are necessary to keep the operation safe”. In the third category of operations - ‘certified’ category, the demands are most stringent and require the certification of the operator, licensing of remote pilots and certification of the aircraft.

Regarding use of UAVs for emergency response, it seems that the most suitable category for these kinds of operations would be to comply with the requirements of the 'specific' category in terms of design and operation of the UAS. This would ensure proper and risk aware development and testing of the UAV measurement system, thus making them ready for use in the case of an emergency response.

We will now briefly discuss the contrasting/heterogeneous elements in the existing national regulations. Legislation can be accessed at the website of JARUS [2]. These contrasting elements will be stated for several categories including weight limit, VLOS (visual line of sight) operation, BVLOS (beyond the visual line of sight) operation, and also height limit and lateral distance during operation. We will also state some of the operational limitations required by existing national regulations.

Most states limit maximum mass (mass of aircraft, payload and fuel) of an UAV to 150kg. Some states, such as Czech Republic are more liberal allowing unlimited MTOM for experimental and research aircrafts. Finland, Germany, Lithuania and Portugal limit MTOM to 25kg, and in Finland and Portugal for mass of drone between 25 and 150kg a special permit is needed. It is also possible to introduce certain categories of drones depending of the mass. For example, Serbian legislation recognizes 4 categories of drones, where in the context of an emergency response most interesting are Category 3 which denotes "an unmanned aircraft which has an operating mass from 5 kg to 20 kg, with a maximum height of flight to 500 m, the maximum flight speed of up to 55 m/s and maximum range of up to 2,500 m"; and also Category 4 which denotes "an unmanned aircraft which has an operating mass from 20 kg to 150 kg, without limitations as regards height, flight speed and long range" [2].

While VLOS operation is possible in all states, allowing also for the possibility extended VLOS (examples of Finland and Italy), if only VLOS would be used in emergency response such restriction would defeat one of the main purposes of drone use – avoiding personnel exposure in the aftermath of a nuclear or radiological event. Therefore, regulatory framework for BVLOS of operation is of more interest to us in this particular context. Since this use case self-evidently has elevated risk it is strictly regulated. For example, in Belgium, BVLOS is only possible with derogation to rules of the air. Drone operations under such conditions are immediately considered a class 1a (high risk) activity, requiring a prior authorization with additional restrictions. Czech Republic, Finland, Germany, Poland, Romania Sweden allows BVLOS use only in segregated airspace (closed for all other air traffic) and over clear ground, reserving this application for research and development. Some countries require presence of Detect and avoid system (DAA) for BVLOS operations such as UK and Ireland, while some prohibit BVLOS use completely, such as Netherlands and Latvia. Switzerland allows BVLOS use if Guidance for Authorization for Low-Level Operation rules (GALLO) are honored. Spain requires that BVLOS operated drones have mass under 2kg, which significantly reduces options for measurement system within the payload.

Height and lateral distance of drone are more relevant to VLOS operation, while as we have already established our use case is more suitable to BVLOS operation. However, for purposes of completeness we will give examples of some of the common restrictions that are typically found regarding height and lateral distance. Most typically encountered height restriction is in the range from 90m to 150m above ground level, often demanding VLOS. There are states with more liberal approach, e.g. in Croatia there is no height limit, but there is still a VLOS limit of maximal 500m. In France, limit is dependent on the scenario of use. Most permissive scenario in France is

VLOS/BVLOS use over unpopulated areas, where maximum distance is 1km, maximum height is 50m (or up to 150m but only if drone has a mass less than  $< 2$  kg). If drone is used over populated areas, VLOS is required with maximum distance 100m, maximal mass of 8kg and height up to 150m with additional safety perimeter. In Czech Republic height of up to 300m above ground level is allowed (in Class G uncontrolled airspace), but this is reduced to 100m in controlled airspace. Lateral distance requires VLOS of not more than 500m. In Serbia, drones are allowed to be flown only during the day, and under the condition of VLOS. Height is restricted to up to 100 m above the ground, unless exemption is approved. The maximum permissible lateral (horizontal) distance of the unmanned aircraft from the person operating the unmanned aircraft is limited to 500 m.

Besides limits of height and lateral distance, there are also operational limits. In typical use drones are not allowed near strategic objects, such as for example airports, or highways, railways, water reservoirs, natural reservations, prohibited, restricted, dangerous areas (see for example restriction in Czech Republic and Germany [2]). Drone operation is also typically restricted near people or crowds. Regulations typically include some precise numerical limit, for example in Slovenia, under assumption of daylight visual flight rules drone use is restricted to Class G airspace with condition of distance to drone being more than 300 meter above crowds, and more than 50 meters from power lines, roads, railways etc. In Serbia, the unmanned aircraft is “not permitted to operate within the portion of airspace extending to 5 km from the airport reference point located in class D airspace”. Exemptions are possible if authorized by the Civil Aviation Directorate of the Republic of Serbia.

#### 4. Conclusions

Based on the previous discussion some common guidelines that are in accordance with both national regulations and EU harmonizing regulations can be established. Operation of the drone should be done by trained and licensed pilot, where licensing will certainly be needed for pilots operating drones suitable for larger payloads and emergency situations. Pilot typically must ensure that the flight of the drone doesn't pose threat to lives, ensure that the flight is carried out fully within the allocated portion of airspace, ensure functionality of the systems of the unmanned aircraft prior to the flight and for certain categories of drones must be available to the air traffic control unit for necessary communication. Approved operator which is to be responsible for complying with regulations is also needed. Typically, development, testing and training should be done strictly according to regulations, possibly needed exemptions from strict regulations should be planned in advance in such a way that in the case of an emergency response temporary permissions, e.g. needed air space allocation, could be promptly granted by authorities. Drone also must have some kind of a registration mark/license plate, and must be registered with the relevant authority. For example, in Serbia, Class 3 and 4 drones operated for non-commercial purposes must be registered in the aircraft register maintained by the Civil Aviation Directorate of the Republic of Serbia, and have a registration mark.

Also, all planned drone use cases must have elaborate risk assessment. Note that before maximum take-off mass was an important criterion in drone classification, while the new unifying EU regulation introduces UAV operation categories based on the “risk level criteria”. Since the use of drones in emergency response would almost certainly



require BVLOS conditions, which significantly increases associated risks, it is desirable/necessary to have integrated collision avoidance systems. While a human operator can assist in collision avoidance, use of personnel on the ground might be strongly ill advised in some types of emergency responses. It is also necessary to honor no-fly-zones such as airport or other important infrastructure, if possible, in a given emergency situation.

### 5. Acknowledgement

The research presented in this paper was realized within 16ENV04 Preparedness project. This project has received funding from the EMPIR programme co-financed by the Participating States and from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme.

### 6. References

- [1] C. Stöcker, B. Rohan, N. Francesco, G. Markus, Z. Jaap. Review of the current state of UAV regulations. *Rem. sens.* 9, 2017, 459.
- [2] JARUS - Joint Authorities for Rulemaking on Unmanned Systems, <http://jarus-rpas.org/regulations>
- [3] de M. Molina, M. del Rosario, V. Santamarina Campos, eds. Ethics and Civil Drones: European Policies and Proposals for the Industry. Springer Open, 2018.
- [4] P. Royo, E. Pastor, M. Macias, R. Cuadrado, C. Barrado and A. Vargas. An Unmanned Aircraft System to Detect a Radiological Point Source Using RIMA Software Architecture. *Rem. Sens.* 10, 2018, 1-21.
- [5] Preparedness and response for a nuclear or radiological emergency: general safety requirements, IAEA safety standards series, no. GSR part 7, STI/PUB/1708. IAEA, Vienna, 2015.
- [6] Council Directive 2013/59/Euratom, laying down basic safety standards for protection against the dangers arising from exposure to ionising radiation. European Council, *Official Journal of European Union* L13, 2014, 1-73.
- [7] Convention on Early Notification of a Nuclear Accident, IAEA- INFCIRC/335. IAEA, Vienna, 1986.
- [8] B. Li, Y. Zhu, Z. Wang, C. Li, Z.-R. Peng, L. Ge. Use of Multi-Rotor Unmanned Aerial Vehicles for Radioactive Source Search. *Rem. Sens.* 10, 728, 2018, doi:10.3390/rs10050728
- [9] „EU wide rules on drones published“, <https://www.easa.europa.eu/>, 11. June 2019 press release.

**PREGLED POSTOJEĆEG REGULATORNOG OKVIRA ZA  
BESPILOTNE LETELICE U EVROPSKIM ZEMLJAMA U  
KONTEKSTU REAGOVANJA I VEŽBI REAGOVANJA U  
VANREDNIM SITUACIJAMA**

**Miloš DAVIDOVIĆ<sup>1</sup>, Alexandra HELBIG<sup>2</sup>, Jiří NOHÝL<sup>3</sup> i Miloš ŽIVANOVIĆ<sup>1</sup>**

1) *Institut za nuklearne nauke Vinča, Univerzitet u Beogradu, Beograd, Srbija,*  
 *davidovic@vinca.rs, milosz@vinca.rs*

2) *Federal Office for Radiation Protection, Oberšlajshajm, Nemačka*

3) *VTÚ – Military Technical Institute, Prag, Češka*

**SADRŽAJ**

*Bespilotne letelice, kolokvijalno poznatije kao dronovi, mogu biti od velike pomoći prilikom prikupljanja podataka visoke rezolucije, naročito u slučajevima kada direktno uključivanje obučenog osoblja na lokaciji od interesa ne bi bilo poželjno. Takav je slučaj sa reagovanjem u slučaju nuklearnog ili radiološkog akcidenta. Dron koji bi imao niz kompaktnih senzora, koji bi sadržali i specijalizovanu opremu koja nije deo standardnog tovara drona, kao što je npr. gama spektrometar, bi bio od velike pomoći, naravno pod pretpostavkom pouzdanog linka za prenos podataka u izazovnom okruženju kakvo je i očekivano u tom slučaju. Pitanje koje komplikuje upotrebu dronova u ovakvim situacijama, a možda i više u slučaju istraživanja i vežbi (koje moraju prethoditi bilo kakvoj realnoj upotrebi) je heterogeni regulatorni okvir koji postoji u evropskim zemljama. Ova fragmentacija je potekla od činjenice da je Evropska komisija ostavila regulisanje dronova mase ispod 150kg zemljama članicama. Iako je nova, harmonizujuća regulativa u procesu donošenja i primene, različiti nacionalni regulatorni okviri su još uvek na snazi, i oni imaju i slučajnosti ali i kontrastirajuće elemente. U ovom radu je dat pregled odabranih nacionalnih regulativa u kontekstu reagovanja u vanrednim situacijama kao i uvid u neke buduće trendove.*



## MOGUĆNOST ANALIZE IZLAGANJA JONIZUJUĆIM ZRAČENJIMA ZA RAZLIČITE IZVORE ELEKTRIČNE ENERGIJE U SRBIJI

**Dorđe LAZAREVIĆ, Ivana MAKSIMOVIĆ i Dalibor ARBUTINA**

*Javno preduzeće „Nuklearni objekti Srbije“, Beograd, Srbija,  
[djordje.lazarevic@nuklearniobjekti.rs](mailto:djordje.lazarevic@nuklearniobjekti.rs), [ivana.maksimovic@nuklearniobjekti.rs](mailto:ivana.maksimovic@nuklearniobjekti.rs),  
[dalibor.arbutina@nuklearnihobjekti.rs](mailto:dalibor.arbutina@nuklearnihobjekti.rs)*

### SADRŽAJ

*U radu je prikazana metodologija analize izlaganja stanovništva i profesionalno izloženih lica jonizujućim zračenjima za različite tehnološke cikluse proizvodnje električne energije zasnovana na istraživanjima Naučnog komiteta Ujedinjenih nacija za procenu efekata zračenja (UNSCEAR). Cilj rada je da se na osnovu ove metodologije ukaže na moguće pristupe analizi izlaganja jonizujućim zračenjima za različite tehnološke izvore električne energije. Analizom su obuhvaćena izlaganja jonizujućim zračenjima u toku proizvodnje električne energije tehnologijama koje su trenutno komercijalno dostupne u svetu: nuklearna energija, sagorevanje uglja, nafte ili gasa, geotermalna energija, solarna energija, energija vetra i biomase. Postojanje ovakvih istraživanja na nacionalnom nivou značajno je za kreiranje strategije razvoja energetike sa aspekta zaštite od zračenja, jer pružaju podatke o dozama izlaganja jonizujućim zračenjima iz izvora električne energije dostupnih u zemlji.*

### 1. Uvod

Pouzdan i pristupačno snabdevanje električnom energijom značajno za zdravlje ljudi i za blagostanje u svetu, prepoznato je kao jedan od milenijumskih ciljeva za razvoj i održivi razvoj u dokumentima Ujedinjenih Nacija [1]. U isto vreme javnost i vlade širom sveta zainteresovane su za značaj uticaja proizvodnje električne energije na ljude i životnu sredinu. Globalna kretanja u pogledu razvoja različitih tehnologija za proizvodnju električne energije menjaju se tokom vremena kao odgovor na tehnološke, klimatske, ekološke, političke i ekonomske izazove. Vlade zemalja i istraživači sprovode različite komparativne studije koje između ostalih pitanja u obzir uzimaju spektar mogućih posledica po stanovništvo i okolinu izazvanih upotrebom različitih tehnologija u proizvodnji električne energije. Jedan od faktora koji se uzima u obzir pri istraživanjima je izlaganje jonizujućim zračenjima od proizvodnje električne energije relevantnih komercijalnih tehnologija, nuklearnih i nenuklearnih.

U periodu 1980-2014. dominantan način dobijanja električne energije u svetu predstavljalo je sagorevanje uglja, što čini približno 40% od ukupno generisane električne energije. U isto vreme ukupna proizvedena električna energija se povećala tri puta. Procenat korišćenja prirodnog gasa i nuklearnog goriva za dobijanje električne energije je povećan u posmatranom periodu, dok je udeo korišćenja nafte smanjen. Korišćenje drugih izvora za dobijanje električne energije, a koji uključuju obnovljive

izvorne energije (geotermalne, vetar, sunce i biomasa), povećano je sa 1% na 7% tokom proteklih 34 godine [5].

Proizvodnja električne energije u Srbiji ostvaruje se u termoelektranama, hidroelektranama i iz obnovljivih izvora energije. Prema zvaničnim podacima iz 2018. godine najveći udeo u ukupnoj proizvodnji električne energije od približno 40 000 GWh imaju termoelektrane sa oko 70% [6]. Za dobijanje električne energije iz termoelektrana kao osnovni energent sa udelom od 98% učestvuje ugalj lignit koji se proizvodi u površinskim kopovima rudarskih basena u neposrednoj blizini termoelektrana [7]. Od obnovljivih izvora energije koristi se samo energija vetra, ali u ukupnoj proizvodnji električne energije vetroelektrane daju doprinos manji od 1% [6].

Termoelektrane koje koriste ugalj kao energent, predstavljaju velike zagađivače vazduha u smislu emitovanja enormnih količina sumpor-dioksida, nitrogen-oksida i drugih čestičnih zagađenja. Njihov uticaj na životnu sredinu je posebno zabrinjavajući, imajući u vidu da su termoelektrane u Srbiji starijeg datuma, neefikasne i ispod standarda [9]. Srbija je na prvom mestu u Evropi po posledicama koje upotreba uglja u termoelektranama ima na zdravlje stanovništva [9].

Za razliku od analize na kvalitet vazduha, u Srbiji do sada nisu sprovedena istraživanja za potrebe procene izlaganja stanovništva zračenju nastalom usled ispuštanja radioaktivnosti tokom gorivnog ciklusa u procesu proizvodnje električne energije u termoelektranama, a koji obuhvata sve faze od kopanja uglja lignita do skladištenja ostataka sagorelog uglja. Metodologija korišćena u istraživanjima Naučnog komiteta Ujedinjenih nacija za procenu efekata zračenja, koja je prikazana u nastavku ovog rada može predstavljati polaznu osnovu u kreiranju sličnih istraživanja u Srbiji. Prikazan metodološki okvir može biti korišćen kao mogući pristup u istraživanju ove teme u Srbiji, a sve u cilju dolaženja do značajnih informacija potrebnih za izradu strategije razvoja energetike u zemlji, kao i planiranja konkretnih mera u svrhu energetske efikasnosti i zaštite životne sredine. Značaj postojanja ovakvih istraživanja u našoj zemlji nalazimo i u postojećoj strategiji razvoja energetike Republike Srbije u kojoj je istaknuto da bi „za smanjenje emisije gasova sa efektom staklene bašte bilo neophodno uvođenje i nuklearnih postrojenja u energetiku Republike Srbije“ [9].

## **2. Metodološki okvir za ispitivanje procene izlaganja jonizujućim zračenjima od proizvodnje električne energije**

Naučni komitet Ujedinjenih nacija za procenu efekata zračenja (UNSCEAR) izradio je izveštaj o izlaganjima jonizujućim zračenjima u toku proizvodnje električne energije tehnologijama koje su trenutno komercijalno dostupne. U pitanju su tehnologije zasnovane na dobijanju električne energije od:

- a) nuklearne energije,
- b) sagorevanja uglja, nafte ili gasa,
- c) geotermalne energije, solarne energije, energije vetra ili biomase.

Metodologija izračunavanja procene izlaganja jonizujućim zračenjima od svih aktivnosti u procesu dobijanja električne energije navedenim tehnologijama, zasnovana je na prikupljanju podataka tokom tri faze procesa: priprema za rad, rad i dekomisija.

Na kraju izveštaja prikazana je komparativna analiza rezultata procene izlaganja stanovništva i profesionalno izloženih lica za svaku pojedinačnu tehnologiju proizvodnje električne energije, ali sa sveobuhvatnim osvrtom na dobijanje električne energije iz konvencionalnih izvora, kao što su ugalj i nuklearna energija.

Analizom su za dobijanje električne energije iz nuklearne energije tj. iz nuklearnog gorivnog ciklusa, uzeti u obzir doprinosi izlaganja zračenju od procesa vađenja rude uranijuma, mlevenja i odlaganja jalovine rude uranijuma, rada nuklearne elektrane i reprocessinga iskorišćenog goriva. Do ispuštanja prirodnih radionuklida, pre svih radona i njegovih potomaka dolazi prilikom vađenja i obrade rude kao i iz jalovine, dok do ispuštanja plemenitih gasova, aerosola, tricijuma ( $^3\text{H}$ ), ugljenika ( $^{14}\text{C}$ ), joda ( $^{131}\text{I}$ ) dolazi tokom rada nuklearne elektrane i reprocessinga goriva.

Analiza u slučaju proizvodnje električne energije sagorevanjem uglja u termoelektrani obuhvata doprinos izlaganja zračenju od procesa (a) vađenja rude uglja i nastalog otpada tokom vađenja rude, (b) ispuštanja radioaktivnosti tokom rada termoelektrane i (c) recikliranja i korišćenja ili odlaganja depozita pepela od sagorelog uglja. Ugalj sadrži značajne količine prirodnih radionuklida iz uranijumskog i torijumskog lanca, kao i kalijum ( $^{40}\text{K}$ ), a koncentracija ovih radionuklida zavisi od karakteristika geoloških formacija porekla uglja. Najveće koncentracije ( $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) radionuklida  $^{238}\text{U}$  nalaze se u uglju poreklom iz Grčke, Mađarske i Rumunije, značajno iznad svetskog proseka za kvalitetan ugalj koji iznosi  $20\text{-}25 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$  [5]. Pri sagorevanju uglja u termoelektrani dolazi do ispuštanja radioaktivnih gasova i formiranja pepela sa uvećanom koncentracijom prirodnih radionuklida. Pepeo od sagorelog uglja lignita sadrži radionuklide iz lanaca  $^{238}\text{U}$  i  $^{232}\text{Th}$  sa aktivnošću iznad  $70 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$  [10]. U cilju zaustavljanja ispuštanja nusprodukata u atmosferu u modernim termoelektranama se koriste sistemi za efikasno filtriranje efluenata, te se doprinos izlaganja zračenju stanovništva smanjio u odnosu na termoelektrane starije generacije. Filtrima nije moguće smanjiti ispuštanje radona  $^{222}\text{Rn}$ , ali je za 15 puta smanjeno ispuštanje veoma štetnih radionuklida  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{210}\text{Po}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{234}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$  i  $^{232}\text{Th}$ . Glavni doprinos kolektivnoj dozi od inhalacije  $^{222}\text{Rn}$  nastaje u procesima kopanja uglja i recikliranja ili od odlagališta pepela. Kod starijih termoelektrana doprinosi dozi od sva tri procesa (vađenja rude uglja, rada termoelektrane i odlagališta pepela) je jednak, dok je kod modernih doprinos od rada termoelektrane svega 10% u odnosu na preostala dva procesa.

Kod tehnologija sagorevanja prirodnog gasa i nafte za proizvodnju električne energije doprinos kolektivnoj dozi potiče od prisustva  $^{222}\text{Rn}$  u prirodnom gasu, odnosno od  $^{222}\text{Rn}$  kao potomka prisutnih prirodnih radionuklida iz uranijumskog i torijumskog lanca. Korišćenje nafte kao energenta dodatno doprinosi dozi i zbog prisustva radionuklida radijuma ( $^{226}\text{Ra}$  i  $^{228}\text{Ra}$ ) i njihovih potomaka akumuliranih u ostacima i mulju od prerade nafte.

Za tehnologije dobijanja električne energije od solarne energije, vetra i biomase, jedina aktivnost koja je analizirana u ovom kontekstu je vađenje ruda metala potrebnih za konstrukciju postrojenja, a koja doprinosi znatno manjoj dozi u odnosu na druge tehnologije i to samo kod profesionalno izloženih lica angažovanih na ovoj aktivnosti.

### 3. Kolektivne doze od različitih tehnoloških ciklusa dobijanja električne energije

Za izvođenje komparativne procene, u tabelama 1. i 2. prikazane su vrednosti iz izveštaja o izlaganju stanovništva i profesionalno izloženih lica jonizujućim zračenjima od različitih tehnoloških ciklusa proizvodnje električne energije za kolektivnu dozu (jedinica:  $\text{manSv}$ ) i normiranu kolektivnu dozu ( $\text{man Sv}/(\text{GW a})$ ) na dobijenu električnu energiju u toku 2010. godine za svaku tehnologiju. Kolektivna doza za stanovništvo odnosi se na integralnu efektivnu dozu za odrasle osobe (20-70 godina) od spoljašnjeg

izlaganja, inhalacije i ingestije tokom perioda od 100 godina na rastojanju od 1500 km (lokalna komponenta do 100km i regionalna komponenta 100-1500km) od tačke nastajanja [5].

**Tabela 1. Kolektivna doza za svetsko stanovništvo i normirana kolektivna doza za 2010. godinu integrisana na 100 godina [5].**

Tehnologija proizvodnje električne energije <sup>*)</sup>	Kolektivna doza (man Sv)	Normirana kolektivna doza (man Sv/(GW a))	% od ukupno proizvedene električne energije u svetu u 2010.
Nuklearni gorivni ciklus	130	0.43	13
Ugalj, starije elektrane	1400	1.4	40
Ugalj, moderne elektrane	670	0.7	
Prirodni gas	55	0.1	22
Nafta	0.03	0.0003	4.6
Geotermalni izvori	5-160	1-20	0.3

<sup>\*)</sup> od vađenja i obrade rude, rada elektrane do reprocessinga ili odlaganja ostataka

**Tabela 2. Kolektivna doza za profesionalno izložena lica i normirana kolektivna doza za 2010. godinu integrisana na 100 godina [5].**

Tehnologija proizvodnje električne energije <sup>*)</sup>	Kolektivna doza (man Sv)	Normirana kolektivna doza (man Sv/(GW a))
Nuklearni gorivni ciklus	788	2.7
Ugalj, starije termoelektrane	11000	11
Ugalj, moderne termoelektrane	11000	11
Prirodni gas	7	0.01
Nafta	17	0.15
Geotermalni izvori	0.4-0.8	0.05

<sup>\*)</sup> od vađenja i obrade rude, rada elektrane do reprocessinga ili odlaganja ostataka

Izveštaj UNSCEAR je pokazao da je kolektivna doza od jonizujućih zračenja po jedinici proizvedene električne energije kod starijih termoelektrana 3 puta veća, a kod modernih 1,5 puta veća u odnosu na nuklearne elektrane, iako javno mnjenje poistovećuje nuklearne elektrane sa izvorom radioaktivnih zračenja. Jedan od zadataka nuklearnih elektrana budućnosti (generacija IV) je minimiziranje ispuštanja, a samim tim i smanjenje doprinosa kolektivnoj dozi, pa je prednost nuklearnih u odnosu na termoelektrane sasvim očigledna po pitanju izlaganja zračenju. Pored toga, poznato je da termoelektrane značajno doprinose negativnom efektu staklene bašte na klimatske

uslove i загађење животne sredine kao veliki emiter štetnih gasova ugljen-dioksida (CO<sub>2</sub>), sumpor-dioksida (SO<sub>2</sub>) i drugih. Naravno, ovo важи bez diskusije da akcidenti kakvi su se desili na nuklearnim elektranama *Three Mile Island*, *Chernobyl* i *Fukushima* menjaju ovaj zaključak u potpunosti. Otuda je kod nuklearnih elektrana budućnosti jedan od primarnih zadataka eliminisanje mogućnosti za nastajanje akcidenata.

Budući da se u našoj zemlji električna energija uglavnom proizvodi u termoelektranama, sagorevanjem uglja lignita sa površinskih kopova u neposrednoj blizini elektrana, sa aspekta zaštite od zračenja izuzetno je značajno postojanje podataka o koncentraciji radionuklida u uzorcima lignita sa svih kopova u zemlji, kao i sprovođenje merenja ispuštanja radioaktivnih gasova i aerosola iz elektrana tokom njihovog rada. Ovo je od velike važnosti, imajući u vidu da ugalj u okolnim zemljama sadrži velike koncentracije <sup>238</sup>U i da se ovaj radionuklid ispušta u atmosferu u značajnoj koncentraciji prilikom sagorevanja uglja. U našoj zemlji postoji odgovarajuća oprema i metode sa visokom pouzdanošću utvrđivanja prisustva i koncentracije prirodnih radionuklida u uzorcima, što se može i pokazati kroz publikovana merenja uzoraka zemlje uzetih sa različitih lokacija [12] i iz okoline termoelektrana u Srbiji [13]. Dati rezultati merenja u ovim referencama u uzorcima zemljišta na teritoriji Srbije ukazuju da radionuklida iz lanaca <sup>238</sup>U i <sup>232</sup>Th ima na nivou prosečnih koncentracija u zemljinoj kori. S obzirom na pomenute veće koncentracije <sup>238</sup>U u uglju u okruženju naše zemlje i na značajan doprinos dozi zračenja od ovog radionuklida prilikom sagorevanja, sigurno bi bilo veoma korisno da se sprovedu merenja koncentracije prirodnih radionuklida u uzorcima uglja lignita sa površinskih kopova u zemlji.

Takođe, u dostupnim javnim registrima može se videti da u Srbiji postoje laboratorije sa akreditovanim metodama za kontinualno merenje radioaktivnih gasova i aerosola u vazduhu. Ovakva merenja bi, korišćenjem UNSCEAR metodologije, omogućila uvid u nivo ispuštanja radioaktivnosti u atmosferu prilikom sagorevanja uglja u termoelektranama u zemlji.

#### 4. Zaključak

Istraživanje koje bi imalo za cilj analizu izlaganja stanovništva i profesionalno izloženih lica jonizujućim zračenjima za različite tehnološke cikluse proizvodnje električne energije u našoj zemlji bi moglo da bude značajno u okviru razmatranja strategije razvoja energetike i zaštite životne sredine u Srbiji, s posebnim osvrtom na nalaženje alternative termoelektranama na ugalj, upotrebu obnovljivih izvora energije, te mogućnosti uvođenja modernih nuklearnih postrojenja. Rezultati iz UNSCEAR izveštaja govore o prosečnim podacima na svetskom nivou, a podaci iz Srbije mogli bi da ukažu gde se nalazimo na mapi sveta po pitanju izlaganja zračenju iz trenutno dostupnih izvora energije u našoj zemlji i koliko je ono u odnosu na zračenje iz nuklearnih elektrana prikazanih u pomenutom istraživanju.

Kako u Srbiji postoje laboratorije, oprema i metode za merenje prisustva i koncentracije prirodnih radionuklida u uzorcima, kao i radioaktivnih gasova i aerosola u vazduhu, korišćenjem UNSCEAR metodologije mogli bismo dobiti jasnu sliku o izlaganjima jonizujućim zračenjima u toku proizvodnje električne energije.

Ukoliko se analizom dođe do rezultata sličnih onim u izveštaju UNSCEAR, koji ukazuju da je izlaganje zračenju od nuklearnih elektrana manje nego u slučaju termoelektrana, ovu činjenicu bi trebalo uzeti kao značajan podatak u debati o korišćenju nuklearne energije u Srbiji.

### 5. Literatura

- [1] The energy challenge for achieving the millennium development goals, UN Energy Paper June 22, 2005. United Nations Energy, 2005.
- [2] UNDP and energy access for the poor: energizing the millennium development goals, United Nations Development Programme, 2010.
- [3] Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development, Resolution adopted by the General Assembly on 25 September 2015. General Assembly, Seventieth session, Agenda item
- [4] s 15 and 116 (A/RES/70/1)
- [5] Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation, UNSCEAR 2016 Report, Annex A. Methodology for estimating public exposures due to radioactive discharges. Annex B. Radiation exposures from electricity generation, United Nations, January 2017.
- [6] Godišnji tehnički izveštaj za 2018. godinu, Akcionarsko društvo „Elektromreža Srbije“ Beograd, mart 2019.
- [7] Energetski bilans Republike Srbije za 2019, Službeni glasnik RS broj 105/2018.
- [8] Chronic coal pollution - EU action on the Western Balkans will improve health and economies across Europe. HEAL, CAN Europe, Sandbag, CEE Bankwatch Network and Europe Beyond Coal, 2019.
- [9] Strategija razvoja energetike Republike Srbije do 2025. godine sa projekcijama do 2030. godine, Službeni glasnik RS, broj 101/2015, 2015.
- [10] Practical Use of the Concepts of Clearance and Exemption, Part I, Guidance on General Clearance Levels for Practices, Radiation Protection 122, European Commission, 2000.
- [11] J. Ilić, M. Eremić-Savković, V. Arsić, S. Bogojević, Lj. Javorina, I. Tanasković, Sadržaj prirodnih radionuklida i procena radijacionog rizika u okolini termoelektrana u Srbiji, *Zbornik radova XXVII Simpozijum DZZ SCG*, Vrnjačka Banja, 2-4. oktobar 2013, pp. 83–87.
- [12] D. Čekerevac-Mirković, I. Maksimović, M. J. Milošević, Activity Measurement of Soil Samples Taken in The Vicinity of the RA Research Reactor, *Proceedings of 4th International Conference on Electrical, Electronics and Computing Engineering, IcETRAN 2017*, pp. NT12.3.1-6, Kladovo, Serbia, June 05-08, 2017.
- [13] M. Janković, D. Todorović, J. Nikolić, M. Rajačić, G. Pantelić i N. Sarap, Radioaktivnost zemljišta u okolini termoelektrana u Srbiji, *Zbornik radova XXVII Simpozijum DZZ SCG*, Vrnjačka Banja, 2-4. oktobar 2013, pp. 83–87.



**POSSIBILITY OF ANALYSIS OF IONIZING RADIATION  
EXPOSURE FOR DIFFERENT ELECTRICITY GENERATION  
SOURCES IN SERBIA**

**Đorđe LAZAREVIĆ, Ivana MAKSIMOVIĆ and Dalibor ARBUTINA**

*Public Company Nuclear Facilities of Serbia, Belgrade, Serbia,  
[djordje.lazarevic@nuklearniobjekti.rs](mailto:djordje.lazarevic@nuklearniobjekti.rs), [ivana.maksimovic@nuklearniobjekti.rs](mailto:ivana.maksimovic@nuklearniobjekti.rs),  
[dalibor.arbutina@nuklearnihobjekti.rs](mailto:dalibor.arbutina@nuklearnihobjekti.rs)*

**ABSTRACT**

This paper presents the methodology of analyzing exposure of population and occupationally exposed persons to ionizing radiation for different technological cycles of electricity generation based on research by the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). The aim of this paper is to provide the rationale for the use of this methodology and possible approach to the analysis of ionizing radiation exposure for different technological electricity generation sources. The analysis includes exposure to ionizing radiation during the production of electricity by currently commercially technologies available in the world: nuclear energy, coal, oil or gas combustion, geothermal energy, solar energy, wind energy and biomass. The existence of such research at the national level is important for the creation of an energy development strategy from the aspect of radiation protection, because they provide data on doses of ionizing radiation exposure from electricity generation sources available in the country.





## **НЕЈОНИЗУЈУЋА ЗРАЧЕЊА**



## PREGLED AKTIVNOSTI U OBLASTI NEJONIZUJUĆIH ZRAČENJA TOKOM PROTEKLIH SIMPOZIJUMA

**Branislav VULEVIĆ, Aco JANIĆIJEVIĆ**

Akreditaciono telo Srbije, Beograd, Srbija, [branislav.vulevic@ats.rs](mailto:branislav.vulevic@ats.rs),  
[aco.janicijevic@ats.rs](mailto:aco.janicijevic@ats.rs)

### SADRŽAJ

*Poslednje tri i po decenije predstavljaju period ekspanzionizacije primene novih tehničko-tehnoloških rešenja u svim oblastima čovekovog bitisanja. Razvoj novih tehnologija je u punom zamahu i skoro da ga je teško pratiti. Atraktivnost novih tehničkih dostignuća kao da prikriva drugu stranu medalje koja pretil novim vidovima zagađivanja životne sredine. Jedan od takvih vidova je i "nevidljivo zagađivanje" tzv. nejonizujućim zračenjima. U drugoj polovini XX veka započela su intenzivna istraživanja i epidemiološke studije o biološkim efektima nejonizujućih zračenja. Paralelno sa ovim istraživanjima počeo je da raste i interes javnosti za moguće rizike po zdravlje usled izlaganja veštačkim izvorima nejonizujućih zračenja, uslovljavajući, uglavnom, negativan stav javnog mnjenja.*

*Sadržaj ovog rada vezan je prvenstveno za pregled objavljenih radova u domenu zaštite od nejonizujućih zračenja u proteklih 29 simpozijuma Društva za zaštitu od zračenja Srbije i Crne Gore. Na kraju, umesto zaključka dat je i generalni kritički osvrt na aktuelne činjenice vezane za potencijalne teme radova na narednim simpozijumima.*

### 1. Uvod

Preko pola veka rada jednog stručnog udruženja i održanih 29 simpozijuma u našim uslovima predstavlja činjenicu za respekt i ujedno vreme za rekapitulaciju ostvarenih rezultata.

Vremenom se nametnula ideja da se na ovom jubilarnom tridesetom Simpozijumu objave radovi koji predstavljaju sažet dokumentarni prikaz objavljenih radova na dosadašnjim simpozijumima - po oblastima.

Ovaj rad je posvećen oblasti pod nazivom „nejonizujuća zračenja“ koja je, po svom razvoju, novijeg datuma u odnosu na ostale oblasti koje su tradicionalno prisutne u prethodnim simpozijumima našeg Društva za zaštitu od zračenja.

Izloženost nejonizujućim zračenjima, moguće štetne posledice po zdravlje ljudi i zaštita od istih, predstavljaju trenutno aktuelne teme u najrazvijenijim zemljama sveta. Veliki broj multidisciplinarnih ekipa stručnjaka radi na sveobuhvatnom posmatranju i proučavanju široke lepeze problema zaštite od nejonizujućih zračenja, jer se radi o izuzetno složenim pitanjima koja svoj odgovor treba da dobiju u budućnosti.

Težište problema u ovom radu baziran je na onim vrstama nejonizujućeg zračenja koje se, zahvaljujući sve većoj primeni novih tehnologija u poslednjih nekoliko decenija, javljaju kao novi toksični agensi koji povećavaju radijaciono opterećenje životne sredine.

Rad je koncipiran tako da obuhvata tematiku od generalne podele i primarnih izvora nejonizujućih zračenja preko pregleda broja radova po simpozijumima odnosno

aktualnosti tema tokom prethodnih godina do zaključaka vezanih za potencijalne aktuelne teme koje nas očekuju u budućnosti, imajući u vidu rapidni porast novih tehničko-tehnoloških primena u svim oblastima života.

## 2. Podela nejonizujućih zračenja i primarni izvori

Generalno, ustanovljena je praktična podela nejonizujućih zračenja koja se koristi na međunarodnom nivou [1].

U zavisnosti od talasnih dužina, ili u zavisnosti od frekvencija, nejonizujućim zračenjima u integralnom elektromagnetskom spektru pripadaju:

- ultraljubičasto zračenje (UV),
- vidljiva svetlost,
- infracrveno zračenje (IC),
- radiofrekvencijsko zračenje (RF) i
- električna i magnetska polja ekstremno niskih frekvencija (ELF).

Jedan deo spektra nejonizujućih zračenja (UV, vidljivo, IC) može da se manifestuje u obliku koherentnih snopova zračenja (tzv. *lasersko zračenje*).

U okviru zaštite od nejonizujućih zračenja, iz čisto pragmatičnih razloga, uključena su i elektrostatičko i statičko magnetsko polje ( $f \approx 0 - 0,1$  Hz).

Iako ne pripadaju EM zračenju, u nejonizujuća zračenja uključene su i *mehaničke ultrazvučne vibracije* (tzv. *ultrazvuk*). To je urađeno isključivo zbog toga što su biološki efekti i problemi zaštite od ultrazvuka vrlo slični onima kod EM zračenja.

Frekvencije, talasne dužine energije fotona karakteristične za nejonizujuća zračenja date su u tabeli 1 [2].

**Tabela 1. Generalna podela zračenja.**

Vrsta zračenja	Frekvencija ( $f$ )	Talas. dužina ( $\lambda$ )	Energija fotona ( $E$ )
<b>Jonizujuće zračenje</b>	>3000 THz	< 100 nm	>12,40 eV
<b>UV zračenje</b>	3000 - 750 THz	100 - 400 nm	12,40 - 3,10 eV
<b>Vidljiva svetlost</b>	750 - 385 THz	400 - 780 nm	3,10 - 1,59 eV
<b>IC zračenje</b>	385 - 0,3 THz	0,78 - 1000 $\mu$ m	1590 - 1,24 meV
<b>RF zračenje</b>	300 GHz - 3 kHz	1 mm - 100 km	1,24 meV-12,4 peV
<b>ELF polja</b>	< 0,3 kHz	> 1000 km	< 1,24 peV

**Tabela 2. Prirodni izvori nejonizujućih zračenja.**

Vrsta zračenja	Prirodni izvori
<b>UV zračenje</b>	- <b>Sunce</b> (temperatura 6000K), koje šalje ka Zemlji veoma širok kontinualan spektar UV-zračenja. Usled apsorpcije u atmosferi a posebno u sloju ozona u stratosferi, do Zemlje stiže samo UV zračenje talasnih dužina većih od 290nm.
<b>IC zračenje</b>	- <b>Sunce</b> predstavlja najjači prirodni izvor. Prolaskom kroz atmosferu intenzitet IC-zračenja opada dok prisustvo vodene pare naročito zadržava IC-zračenje talasnih dužina iznad 1 $\mu$ m.
<b>RF zračenje</b>	- <b>Sunce i drugi izvori iz svemira</b>
<b>ELF polja</b>	- <b>Prirodna električna polja:</b> a)stacionarna; b)promenljiva. - <b>Prirodna magnetska polja:</b> a) unutrašnje; b) spoljašnja.

Izvore nejonizujućih zračenja delimo na prirodne i veštačke (tehnološke). Radi preglednosti, u tabelama 2 i 3 prikazani su tipični prirodni i veštački izvori respektivno [2].

**Tabela 3. Veštački (tehnološki) izvori nejonizujućih zračenja.**

Vrsta zračenja	Veštački izvori
<b>UV zračenje</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- izvori sa električnim pražnjenjem kroz gasove (lampe sa živinom parom, lampe sa plemenitim gasovima, fleš cevi, hidrogenske lampe, elektrolučno zavarivanje);</li> <li>- usijani izvori (halogene lampe);</li> <li>- fluorescentne lampe;</li> <li>- laseri.</li> </ul>
<b>IC zračenje</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- zagrejani i usijani izvori (industrijske peći, zagrejani tečni metali i staklo, plamenici, gorionici, grejači, aparati za gasno zavarivanje, uređaji za plazmenu obradu metala)</li> <li>- izvori sa električnim pražnjenjem kroz gasove (lučne lampe i elektrolučno zavarivanje)</li> <li>- laseri (CO<sub>2</sub>).</li> </ul>
<b>RF zračenje</b>	- električni i elektronski uređaji prisutni u svim oblastima savremenog života (radio-veze, radio-difuzija, televizija, radari, radio-lokacija, radio-navigacija, radio-telemetrija) a u upotrebi su i u industriji, medicini, naučnoistraživačkom radu itd.
<b>ELF polja</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- glavni – nadzemni i podzemni vodovi visokog napona (preko 35kV) uređaji i postrojenja visokog napona koja se koriste u proizvodnji, prenosu i distribuciji električne energije, pri tzv. industrijskim frekvencijama 50/60Hz;</li> <li>- ostali - sve vrste električnih vodova, industrijskih električnih mašina i postrojenja, elektromotora, električnih aparata (medicina, naučna istraživanja, domaćinstva), rasvetnih uređaja itd.</li> </ul>

### 3. Radovi iz oblasti nejonizujućih zračenja na proteklim simpozijumima

Poznato je da je naše Društvo za zaštitu od zračenja prošlo kroz izuzetno turbulentan period od svog osnivanja, 1963. godine. Od tada do danas menjalo je i svoje zvanične nazive:

JDRZ - Jugoslovensko društvo za radiološku zaštitu od 1963 - 1970. godine;

JDZZ – Jugoslovensko društvo za zaštitu od zračenja od 1970 – 2005. godine;

DZZSCG – Društvo za zaštitu od zračenja Srbije i Crne Gore od 2005. godine do danas.

Korisne informacije koje oslikavaju jedan čitav period razvoja zaštite od zračenja na našim prostorima, mogu se naći u literaturi [3,4] i na sajtu DZZSCG [5].

Na I Simpozijumu Jugoslovenskog društva za radiološku zaštitu održanom u Portorožu u oktobru 1963. od ukupno 162 rada po prvi put se pojavljuje saopštenje grupe autora koji svojom problematikom pokriva deo elektromagnetskog spektra koji će se kasnije klasifikovati u oblast „nejonizujuća zračenja“. Reč je o radu koji se nalazi pod brojem 67 u Zborniku saopštenja sa Simpozijuma [6].

Od osnivanja Društva do danas, na simpozijumima se objavljuju radovi u zavisnosti od aktuelizacije primene nejonizujućih zračenja u radnoj i životnoj sredini. Vremenom se formira i multidisciplinarna grupa autora koja redovno informiše o savremenim

tendencijama razvoja oblasti zaštite od nejonizujućih zračenja. Tako nastaje sekcija pod nazivom NEJONIZUJUĆA ZRAČENJA koja u kontinuitetu postoji od VII Simpozijuma JDZZ održanog u oktobru 1973. godine do danas.

U tabeli 4 dat je pregled radova iz oblasti nejonizujućih zračenja u proteklih 29 simpozijuma.

**Tabela 4. Pregled radova u oblasti nejonizujućih zračenja na 29 simpozijuma u periodu 1963-2017. godine.**

Broj	Godina	Mesto održavanja	Broj radova	Vrsta zračenja i naučno-stručna oblast na koju se radovi odnose*
I	1963	Portorož	1	UV zračenje (B)
II	1965	Mostar	-	-
III	1967	Banja Luka	-	-
IV	1969	Baško Polje	-	-
V	1970	Bled	-	-
VI	1972	Ohrid	-	-
VII	1973	Kaštel Stari	4	RF zračenje (B) Lasersko zračenje (T) i (Z) Ultrazvuk (M)
VIII	1975	Herceg Novi	2	RF zračenje (Z) Ultrazvuk (M)
IX	1977	Jajce	6	RF zračenje 4 x (Z) RF zračenje (V) Lasersko zračenje (M)
X	1979	Arandelovac	1	Istraživanje zaštite od jonizujućih i nejonizujućih zračenja u okviru "Programa naučno-istraživačke aktivnosti na zaštiti i unapređenju prirode i životne sredine u SR Srbiji
XI	1981	Portorož	1	-/-
XII	1983	Ohrid	5	Lasersko zračenje (P), 2x(V), (M) RF zračenje (M)
XIII	1985	Pula	10	- <i>Osnovne higijenske norme</i> [7] RF zračenje 2 x (M), (Z), (T), (V) Lasersko zračenje 2 x (M), (V) UV zračenje (B)
XIV	1987	Novi Sad	15	RF zračenje 5 x (M), 4 x (T) Ultrazvuk (Norme), (M) IC zračenje (Z) Lasersko zračenje (V), (M) UV zračenje (Z)
XV	1989	Priština	1	RF zračenje (Merenja)
XVI	1991	Neum	6	UV zračenje Sunca (M) koža 2 x Zračenje videoterminala (T) IC zračenje i efekat staklene bašte Laseri u medicini (Z) RF zračenje (M)

\*U zagradama se nalaze skraćenice za svaki rad ponaosob:

(B) - Biologija; (M) - Medicina; (V) – Veterina;

(T) – Tehnika; (P) - Primena; (Z) – Zaštita



**Tabela 4. Nastavak**

Broj	Godina	Mesto održavanja	Broj radova	Vrsta zračenja i naučno-stručna oblast na koju se radovi odnose*
XVII	1993	Beograd	2	RF zračenje u vojn. vazduhoplovstvu (Z) ELF (M)
XVIII	1995	Bečići	-	-
XIX	1997	Golubac	5	Lasersko zračenje (Z) RF zračenje u vojnom vazduhoplov. (Z) ELF 2 x (Z) Modifikovani sistem zaštite (Z)
XX	1999	Tara	7	Izloženost NJZ (Z) Statička MP (Z) 2 x RF (Z - mobilna telefonija) UV zračenje (Z-solarijumi) Vidljivo zračenje (Značaj merenja) Statičko MP i RF (Uređaji za MRI)
XXI	2001	Kladovo	6	Lasersko zračenje (Z), (M) UV zračenje 2 x (T) ELF (M) Merenja u okolini videoterminala (Z)
XXII	2003	Petrovac	5	ELF i RF merenja u teren. uslovima (Z) RF zračenje (Z) RF polja kućnih aparata ELF polja (T) Lasersko zračenje (B)
XXIII	2005	Donji Milanovac	1	Novi pravci u zaštiti od nejon. zračenja
XXIV	2007	Zlatibor	1	RF zračenje (mob. telefonija - merenja)
XXV	2009	Kopaonik	5	RF zračenje (B), 3 x (mobilni telefoni) ELF Mpolja (dalekovodi-merenja)
XXVI	2011	Tara	2	Lasersko zračenje (Z) RF zračenje (B)
XXVII	2013	Vrnjačka Banja	2	RF zračenje 2 x (T)
XXVIII	2015	Vršac	1	UV zračenje (Z-solarijumi)
XXIX	2017	Srebrno Jezero	4	RF zračenje (mob. telefonija - merenja) UV zračenje Sunca 2 x (Z - merenja) UV zračenje Sunca – (edukacija dece)
<b>UKUPAN BROJ RADOVA</b>			<b>93</b>	

\*U zgradama se nalaze skraćenice za svaki rad ponaosob:

(B) - Biologija; (M) - Medicina; (V) – Veterina;

(T) – Tehnika; (P) - Primena; (Z) - Zaštita

Generalno, radove vezane za nejonizujuća zračenja možemo podeliti u tri grupe.

Prva grupa radova vezana je za period do 1977. godine kada uglavnom dominiraju istraživanja vezana za determinističke biološke efekte na osnovu kojih se donose odgovarajuće granične vrednosti vezane za ograničavanje izlaganja ljudi.

Druga grupa radova vezana je za istraživanja koja su sve više usmerena na moguće korekcije ustanovljenih granica izlaganja imajući u vidu broj izvora nejonizujućih zračenja u čovekovom okruženju koji se drastično povećava od sredine osamdesetih godina XX veka. Kao kruna navedene dve grupe radova, sredinom devedesetih godina

pojavljuje se knjiga (videti u Literaturi [8]) koja predstavlja osnovu za sveobuhvatno posmatranje problematike zaštite od nejonizujućih zračenja na našim prostorima.

Za treću grupu radova, tokom devedesetih godina XX veka do danas, sve značajniju ulogu igraju odgovarajuća merenja zahvaljujući ubrzanom razvoju merne instrumentacije. U navedenom periodu javljaju se otvorena pitanja vezana za tzv. stohastičke biološke efekte vezane za izlaganje niskim nivoima nejonizujućih zračenja. Ovo se posebno odnosi na RF zračenja usled rapidnog razvoja telekomunikacija.

#### 4. Umesto zaključka

Zahvaljujući ubrzanom razvoju novih tehnologija, mernih uređaja i njihovog povezivanja u merne sisteme, prve dve dekade XXI veka karakteriše pojava različitih pristupa merenjima u oblasti nejonizujućih zračenja. Jednostavno rečeno, kvalitetna merenja „pomeraju granice znanja“ u svim oblastima pa i u oblasti nejonizujućih zračenja. Ovo posebno implicira potrebu za usaglašavanjem mernih metoda. Zbog toga se velika važnost poklanja standardizaciji i harmonizaciji mernih metoda. To bi, na primer, bila jedna od osnovnih ideja za buduće radove u ovoj oblasti.

Paralelno sa daljim razvojem, standardizacijom i harmonizacijom mernih metoda, sve veći značaj u budućnosti dobijaju razvoj 24-časovnog (kontinualnog) monitoring sistema. Kao kuriozitet, nedavno je, u Republici Srbiji realizovan i pušten u rad sistem koji obavlja kontinualni monitoring nivoa elektromagnetskih polja, pod nazivom EMF RATEL, kojim upravlja Regulatorna agencija za elektronske komunikacije i poštanske usluge (RATEL). Nakon prikupljanja i obrade, rezultati merenja se prikazuju krajnjim korisnicima putem grafikona na odgovarajućem Internet sajtu [9]. Dalje, kontinuirano merenje UV zračenje se u Srbiji meri nezavisno u Beogradu i Novom Sadu, što je detaljno opisano u radu objavljenom u Zborniku radova DZZSCG sa prošlog Simpozijuma [10].

Osnovni zadatak savremene zaštite od zračenja je da se pouzdano odredi nivo stvarnog rizika kome se pojedinac izlaže tokom svog boravka u polju zračenja [3]. Dakle, kao i u slučaju zaštite od jonizujućih zračenja, tako i u oblasti nejonizujućih zračenja ne treba zanemariti primarnu ulogu individualnog izlaganja. Jedan od pozitivnih primera rada vezanog za nivo individualne izloženosti UV zračenju, objavljen je takođe u Zborniku radova DZZSCG sa prošlog Simpozijuma [11].

Pored navedenog, treba istaći i negativnu činjenicu da na međunarodnom nivou ima sve manje nezavisnih i nepristrasnih biofizičkih i biomedicinskih istraživanja vezanih za uticaj nejonizujućih zračenja na ljudsku populaciju. To je jedan od razloga zbog koga se decenijama uglavnom ponavlja neosporna konstatacija da savremena medicina još uvek ne daje pouzdan odgovor po pitanju rizika po zdravlje ljudi usled izlaganja nejonizujućim zračenjima, posebno kada je reč o električnim, magnetskim i elektromagnetskim poljima. Dakle, budući radovi koji bi pratili savremena međunarodna kretanja na ovom polju bili bi od velike koristi.

Sa stanovišta zaštite na radu, u praksi su prisutni različiti pristupi i metodologije u proceni profesionalnog rizika, što zavisi od cilja i namene procene rizika, kao i kvantitativnih i kvalitativnih pokazatelja uslova radne sredine [12]. U domenu zaštite od nejonizujućih zračenja, to može biti izazov za publikaciju novih radova u narednom periodu.

I na kraju, ali možda i najbitnije, uprkos poplavi informacija kojima smo izloženi razvojem interneta, stanovništvo je slabo informisano o realnoj opasnosti koju sobom nosi izloženost nejonizujućim zračenjima. Uglavnom se radi o lošem i senzacionalistič-

kom informisanju koje dovodi do uznemirenja javnog mnjenja. Dugogodišnje iskustvo autora ovih redova ukazuje na potrebu sistematskog informisanja i edukacije stanovništva.

### 5. Zahvalnica

Autor se zahvaljuje organizacionom odboru XXX Simpozijuma DZZSCG i dr Gordani Pantelić na ukazanom poverenju i pozivu za pisanje i prezentaciju ovoga rada na jubilarnom Simpozijumu.

### 6. Literatura

- [1] ICNIRP, The International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. <https://www.icnirp.org/>.
- [2] B. Vulević. Zaštita od nejonizujućih zračenja – Problem budućnosti. *Bilten Vinča* 7, 2002, 7 – 20.
- [3] M. M. Нинковић. Заштита од зрачења – Значајни датуми и догађаји. *Зборник радова XXVII Симпозијума Друштва за заштиту од зрачења Србије и Црне Горе*, 2-4. октобар 2013, Врњаčka Бања, 2013, 9–26.
- [4] O.Ciraj-Bjelac, G.Pantelić, M.Kovačević. On the Occasion of the 50th Anniversary of Organised Radiation Protection. *Зборник радова XXVII Симпозијума Друштва за заштиту од зрачења Србије и Црне Горе*, 2-4. октобар 2013, Врњаčka Бања, 2013, 27–34.
- [5] DZZSCG, Друштво за заштиту од зрачења Србије и Црне Горе. <http://dzz.org.rs/>.
- [6] D. Kanazir, LJ. Kostić i O. Đorđević ( Institut za nuklearne nauke “Boris Kidrič”, Vinča). Uticaj UV zračenja na preživljavanje i metabolizam nukleinskih kiselina i mogućnosti reparacije nastalih oštećenja kod L ćelija. *Kratki sadržaji saopćenja I Jugoslovenskog simpozijuma o radiološkoj zaštiti*, 8-12. oktobar 1963, Portorož, 1963, 27.
- [7] J.Simonović, R.Radovanović. Osnovne higijenske norme za rad sa nejonizujućim zračenjem. *Zbornik radova (II knjiga) XIII Jugoslovenskog društva za zaštitu od zračenja*, 10 – 13 jun 1985, Pula, 1985, 708-715.
- [8] M.Jeremić, *Nejonizujuća zračenja i zaštita*, Medicinska knjiga, Beograd, 1995.
- [9] RATEL, Regulatorna agencija za elektronske komunikacije i poštanske usluge. <http://emf.ratel.rs>.
- [10] P.Kolarž, Z.Mijatović i A.Vlajić. Kontinualno merenje UV zračenja i ozona u Srbiji. *Zbornik radova XXIX Društva za zaštitu od zračenja Srbije i Crne Gore*, 27 – 29 septembar 2017, Srebrno Jezero, 2017, 609-617.
- [11] J.Ajtić, S.Blesić, M.Allen, C.Wright i Đ.Stratimirović. Merenje izlaganja sunčevom ultravioletnom zračenju: Stara Planina, Srbija i Val Soni, Francuska. *Zbornik radova XXIX Društva za zaštitu od zračenja Srbije i Crne Gore*, 27 – 29 septembar 2017, Srebrno Jezero, 2017, 600-608.
- [12] I. Krstić, D. Krstić, A. Kusalo. Analiza pokazatelja za procenu profesionalnog rizika. *Inžinjerstvo zaštite* 1, 2011, 45-58.

**REVIEW OF ACTIVITY IN THE FIELD OF NON-IONIZING  
RADIATION DURING OVERPAST SYMPOSIUMS**

**Branislav VULEVIĆ, Aco JANIĆIJEVIĆ**

*Accreditation Body of Serbia, Belgrade, Serbia, [branislav.vulevic@ats.rs](mailto:branislav.vulevic@ats.rs),  
[aco.janicijevic@ats.rs](mailto:aco.janicijevic@ats.rs)*

**ABSTRACT**

The content of this paper is primarily related to the review of published papers in the domain of protection against non-ionizing radiation in the past 29 symposia of the Society for Radiation Protection of Serbia and Montenegro. Finally, instead of the conclusion, a general critical review of the current facts related to the potential topics of the papers at the next symposiums is given.

## **СЛОБОДНЕ ТЕМЕ**



# PROCENA TEMPERATURSKOG PROFILA ATMOSFERE NA OSNOVU DETEKTOVANOG FLUKSA KOSMIČKIH MIONA

Mihailo SAVIĆ, Vladimir UDOVIČIĆ, Dimitrije MALETIĆ,  
Aleksandar DRAGIĆ, Radomir BANJANAC, Dejan JOKOVIĆ,  
Nikola VESELINOVIĆ i David KNEŽEVIĆ

Institut za fiziku u Beogradu, Institut od nacionalnog značaja za Republiku Srbiju,  
Beograd, Srbija, [msavic@ipb.ac.rs](mailto:msavic@ipb.ac.rs), [udovicic@ipb.ac.rs](mailto:udovicic@ipb.ac.rs), [maletic@ipb.ac.rs](mailto:maletic@ipb.ac.rs),  
[dragic@ipb.ac.rs](mailto:dragic@ipb.ac.rs), [banjanac@ipb.ac.rs](mailto:banjanac@ipb.ac.rs), [yokovic@ipb.ac.rs](mailto:yokovic@ipb.ac.rs), [veselinovic@ipb.ac.rs](mailto:veselinovic@ipb.ac.rs),  
[davidk@ipb.ac.rs](mailto:davidk@ipb.ac.rs)

## SADRŽAJ

*Uticaj atmosferskih parametara na intenzitet mionske komponente sekundarnog kosmičkog zračenja dobro je poznat. Dominantan doprinos varijaciji fluksa kosmičkih miona usled atmosferskih parametara daju dva meteorološka efekta - barometarski (usled varijacije atmosferskog pritiska) i temperaturski (usled varijacije temperature atmosfere). Postoji više teorijskih i empirijskih modela koji dobro opisuju ove zavisnosti. Obično se na osnovu ovih modela vrši korekcija kako bi se eliminisala varijacija fluksa kosmičkih miona atmosferskog porekla.*

*Obrnuto, osetljivost mionskih detektora na varijacije atmosferskih parametara može se iskoristiti da se na osnovu poznatih parametara modela i poznatog odbroja kosmičkih miona odredi temperatura različitih nivoa atmosfere. U ovom radu ćemo demonstrirati ovaj pristup na osnovu podataka merenih mionskim monitorima Niskofonske laboratorije za nuklearnu fiziku Instituta za fiziku u Beogradu i primenom empirijskog modela meteoroloških efekata, zasnovanog na tehnici dekompozicije na osnovne komponente.*

## 1. Uvod

Intenzitet pljusкова sekundarnog kosmičkog zračenja zavisi od atmosferskih meteoroloških parametara. To se naročito odnosi na mionsku komponentu sekundarnog kosmičkog zračenja. Dva efekta dominantno utiču na fluks sekundarnih miona: barometarski koji opisuje antikorelaciju fluksa kosmičkih miona sa atmosferskim pritiskom [1] i temperaturski koji se odnosi na uticaj varijacije atmosferske temperature na detektovani intenzitet miona [2].

Osim fundamentalnog, detaljno poznavanje meteoroloških efekata ima značaj u proceduri korekcije na date efekte, čime se povećava osetljivost zemaljskih detektora kosmičkog zračenja na varijacije neatmosferskog porekla. Alternativno, dobar model meteoroloških efekata bi u principu omogućio predviđanje atmosferskih parametara na osnovu merenja fluksa miona. Ovo je potencijalno značajno za određivanje temperatura pojedinih slojeva atmosfere u slučaju da su druge metode nedostupne.

Postoji više predloženih metoda za predikciju atmosferskih meteoroloških parametara na osnovu merenja intenziteta kosmičkog zračenja zemaljskim detektorima. Mogu se



bazirati na merenju različitih komponenti fluksa kosmičkih miona [3, 4], simultanom merenju neutronske i mionske komponente [5] ili upotrebi mionskog teleskopa sposobnim da meri ugaonu distribuciju intenziteta [6]. Sve pomenute metode karakteriše relativna kompleksnost eksperimentalne postavke i analize. Takođe, zajedničko svim pomenutim metodama je da se u proceduri određivanja atmosferskih temperatura oslanjaju na teorijski izračunate koeficijente za opisivanje zavisnosti inenziteta miona od temperaturskog profila atmosfere. Ovaj pristup ima određenih ograničenja usled nužno aproksimativnog karaktera i neprilagođenosti konkretnom detektorskom sistemu.

U ovom radu, mi ćemo demonstrirati upotrebljivost jednostavnije eksperimentalne postavke i primenu empirijskog modela meteoroloških efekata na određivanje temperaturskog profila atmosfere.

### 2. Eksperimentalni podaci i obrada

U Niskofonskoj laboratoriji za nuklearnu fiziku Instituta za fiziku u Beogradu mionski fluks se meri kontinualno od 2009. godine, na nivou zemlje i na dubini od 25 m.w.e. Eksperimentalna postavka se sastoji od scintilacionog detektora i sistema za akviziciju. Detektor je plastični scintilator dimenzija  $100\text{cm}\times 100\text{cm}\times 5\text{cm}$  sa četiri fotomultiplikatora postavljena na čoškove. U srcu sistema za akviziciju nalazi se brzi analogno-digitalni konverter sposoban da u realnom vremenu precizno određuje vreme detekcije i amplitudu signala [7]. U ovoj analizi korišćeni su podaci snimljeni detektorom na nivou zemlje u periodu od 01.06.2010. do 31.05.2011. godine.

Za opisivanje meteoroloških efekata na kosmičke mione, u okviru Niskofonske laboratorije razvijen je empirijski model baziran na tehnici dekompozicije na osnovne komponente (Principal Component Analysis - PCA) [8]. Metod se zasniva na ideji da se u analizi meteoroloških efekata sa skupa visoko korelisanih meteoroloških parametara pređe na skup linearno nezavisnih promenljivih, kao i potencijalno smanji dimenzionalnost problema zadržavanjem samo statistički značajnih osnovnih komponenti u analizi. Koeficijenti zavisnosti detektovanog odbroja miona od tako određenih osnovnih komponenti su pouzdaniji, jer su manje podložni statističkim fluktuacijama. Ovde ćemo primeniti ovaj model kako bismo na osnovu odbroja miona merenog u nadzemnoj laboratoriji odredili temperature različitih nivoa atmosfere.

Neka je  $C_X$  matrica tipa  $n\times m$  koja predstavlja  $m$  merenja  $n$  različitih meteoroloških parametara. Dekompozicijom na osnovne komponente se sa skupa  $n$  meteoroloških varijabli prelazi na skup  $n$  osnovnih komponenti, čije vrednosti su reprezentovane matricom  $C_Y$ , takođe tipa  $n\times m$ . Ova relacije se može predstaviti jednačinom:

$$C_Y = PC_X, \quad (1)$$

gde je  $P$  matrica transformacije čiji redovi predstavljaju kompoziciju osnovnih komponenti.

Na slici 1 prikazana je kompozicija prvih 9 osnovnih komponenti. Na x-osi su meteorološke promenljive: pritisak, temperature 24 izobarna nivoa (10, 20, 30, 50, 70, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500, 550, 600, 650, 700, 750, 800, 850, 900, 925 i 975 mb) i temperatura na nivou tla. Na y-osi su prikazane vrednosti kosinusa uglova rotacije pri prelasku sa skupa meteoroloških varijabli na skup osnovnih komponenti.

Na osnovu statističke i korelacione analize zaključeno je da su za meteorološke efekte od značaja samo pet osnovnih komponenti, i to komponente 1, 3, 4, 5 i 6 [8].

Zavisnost varijacije detektovanog odbroja miona od ovih komponenti, usled meteoroloških efekata, data je jednačinom:

$$\delta N_{PC} = \sum_i k_i PC_i, \quad i=1,3,4,5,6 \quad (2)$$

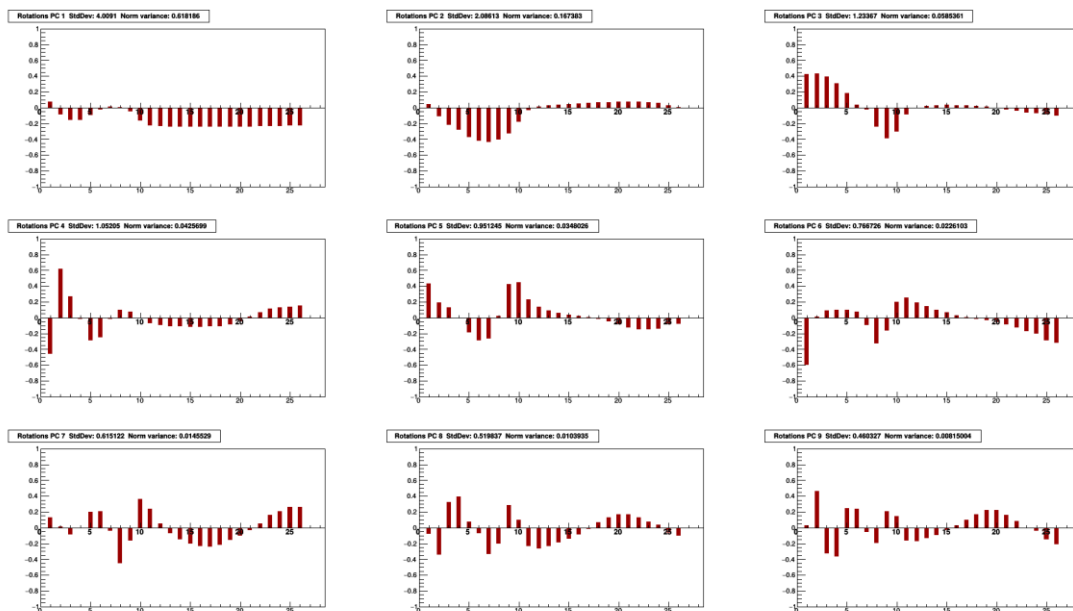
gde su  $PC_i$  osnovne komponente a  $k_i$  odgovarajući koeficijenti.

Pomoću ove relacije u principu je moguće proceniti vrednosti osnovnih komponenti na osnovu poznatog odbroja.

Dalje, transformišući jednačinu 1 kao:

$$C_X = P^{-1} C_Y = P^T C_Y \quad (3)$$

na osnovu procenjenih vrednosti osnovnih komponenti sada je moguće odrediti procenjene vrednosti meteoroloških parametara.



**Slika 1. Kompozicija prvih devet osnovnih komponenti.** Na x-osi su meteorološke promenljive: pritisak, temperatura 24 izobarna nivoa (10, 20, 30, 50, 70, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500, 550, 600, 650, 700, 750, 800, 850, 900, 925 i 975 mb) i temperatura na nivou tla. Na y-osi su prikazane vrednosti uglova rotacije.

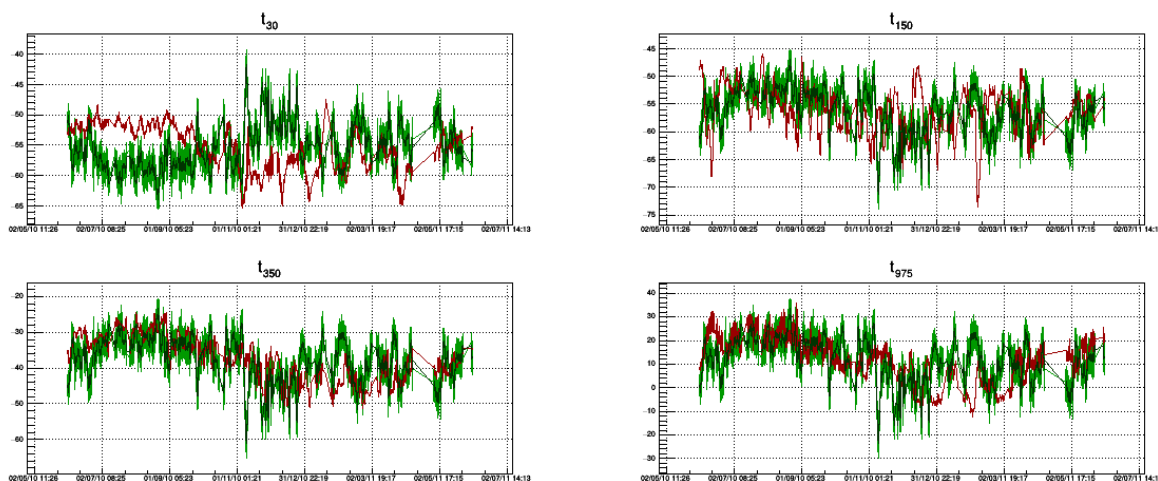
### 3. Rezultati i diskusija

Za pomenuti referentni period određeni su koeficijenti u jednačini 2, uzimajući u obzir samo geomagnetno mirne dane [8]. Pomoću ovako određenih koeficijenata i merenog odbroja određene su procenjene vrednosti za pet signifikantnih osnovnih komponenti za ceo referentni period. Zatim su na osnovu jednačine 3 određene procenjene vrednosti meteoroloških parametara. Na slici 2 prikazane su vremenske serije merenih i procenjenih vrednosti meteoroloških parametara za izabrane izobarne nivoe.

Zbog preglednosti, prikazani su grafici za četiri različita nivoa. Kao referentni izabrani su nivoi od 30 mb (stratosfera), 150 mb (tropopauza/gornja troposfera), 350 mb (troposfera) i 975 mb (u blizini zemlje). Na plotovima crvenom linijom prikazane su merene vrednosti a svetlo zelenom vrednosti procenjene na osnovu merenog odbroja miona. Takođe, kako bi se dala jasnija slika i smanjio efekat fluktuacija merenog odbroja, vremenska serija predviđenih vrednosti je smutovana (*smoothing*) i prikazana na graficima tamno zelenom bojom.

Na slici 3 prikazana je raspodela razlika merenih i procenjenih vrednosti meteoroloških parametara.

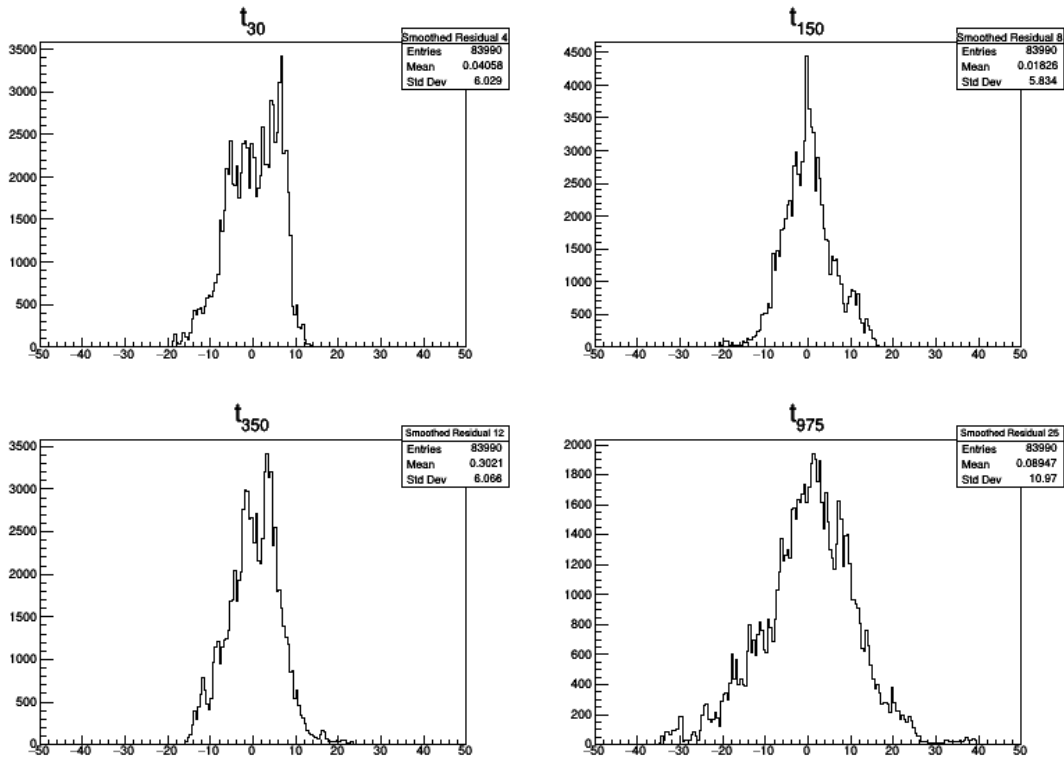
Osim analize vremenskih serija, još jedan kriterijum za određivanje efikasnosti predviđanja temperature pojedinih nivoa mogao bi biti na osnovu širine prikazanih raspodela. Međutim, varijacija temperatura različitih nivoa nije ista tako da ovo može dati nepotpunu sliku. Stoga su u tabeli 1 prikazane vrednosti standardnih devijacija ovih raspodela, standardnih devijacija merenih vrednosti, kao i relativan odnos ove dve veličine koji daje bolji uvid u efikasnost predikcije temperatura pojedinih nivoa atmosfere.



**Slika 2. Vremenske serije merenih i procenjenih vrednosti meteoroloških parametara za izabrane nivoje od 30, 150, 350 i 975 mb. Merene vrednosti - crvena linija, procenjene - svetlo zelena linija i smutovane procenjene - tamno zelena linija.**

Na osnovu predstavljenih grafika i tabela možemo videti da se najbolje slaganje dobija za sloj atmosfere od 300 do 600 mb. Nešto slabije slaganje dobija se za nivoje u blizini tla, što je u skladu sa kompleksnijom dinamikom temperatura u ovih slojevima, kao i za slojeve od 100 do 200 mb, u kojima dominantno dolazi do produkcije miona. Ovaj drugi podatak je moguća posledica činjenice da je za mione detektovane na površini zemlje značajniji negativni temperaturski efekat, asociran sa jonizacionim gubicima i verovatnoćom raspada miona u nižim slojevima atmosfere, dok pozitivni temperaturski efekat u vezi sa verovatnoćom nastanka miona u sloju između 100 i 200 mb ima manji doprinos. Najslabije slaganje dobija se za neke od nivoa u stratosferi i tropopauzi, što se može videti na primeru temperature nivoa od 30 mb koji je u značajnom delu godine antikorelisan sa procenjenom temperaturom. Ovo je možda uslovljeno manjim varijacijama temperature na ovim nivoima kao i činjenicom da postoji značajna

varijacija temperature ovih nivoa koja nije korelisana sa intenzitetom kosmičkih miona, sadržana u osnovnoj komponenti 2 (slika 1).



Slika 3. Raspodela razlika merenih i procenjenih vrednosti meteoroloških parametara za izobarne nivoe od 30, 150, 350 i 975 mb.

Tabela 1. Standardna devijacija raspodela razlika merenih i procenjenih vrednosti ( $\sigma_r$ ), raspodele vrednosti merenih temperatura ( $\sigma_t$ ) i relativan odnos ove dve vrednosti ( $\sigma_r/\sigma_t$ ).

	t <sub>10</sub>	t <sub>20</sub>	t <sub>30</sub>	t <sub>50</sub>	t <sub>70</sub>	t <sub>100</sub>	t <sub>150</sub>	t <sub>200</sub>	t <sub>250</sub>	t <sub>300</sub>	t <sub>350</sub>	t <sub>400</sub>
$\sigma_r$	9,314	5,246	6,029	3,645	3,940	4,032	5,834	7,455	5,761	5,679	6,066	6,297
$\sigma_t$	7,154	4,844	3,669	3,320	2,862	3,055	4,012	5,754	5,111	5,658	6,237	6,460
$\sigma_r/\sigma_t$	1,302	1,083	1,643	1,098	1,377	1,320	1,454	1,296	1,127	1,004	0,973	0,975

t <sub>450</sub>	t <sub>500</sub>	t <sub>550</sub>	t <sub>600</sub>	t <sub>650</sub>	t <sub>700</sub>	t <sub>750</sub>	t <sub>800</sub>	t <sub>850</sub>	t <sub>900</sub>	t <sub>925</sub>	t <sub>975</sub>	t <sub>ground</sub>
6,386	6,415	6,389	6,387	6,504	6,863	7,340	8,085	8,985	9,956	10,40	10,97	11,20
6,518	6,510	6,466	6,415	6,428	6,616	6,841	7,253	7,793	8,456	8,810	9,444	9,523
0,980	0,985	0,988	0,996	1,012	1,037	1,073	1,115	1,153	1,177	1,181	1,161	1,176

### 4. Zaključak

Preliminarna analiza je pokazala da postoji dosta dobro slaganje merenih i procenjenih atmosferskih temperatura za veći broj nivoa. Procenjene temperature imaju uglavnom konzistentne vremenske serije i dobro opisuju godišnju varijaciju. Najbolje slaganje sa merenim vrednostima dobija se u višim slojevima troposfere. Stoga, prikazani rezultati predstavljaju dobru polaznu osnovu za dalju analizu.

### 5. Zahvalnica

Ovaj rad je realizovan uz podršku Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije u okviru projekta pod brojem OI 171002.

### 6. Literatura

- [1] L. Myssowsky, L. Tuwim. Unregelmäßige Intensitätsschwankungen der Höhenstrahlung in geringer Seehöhe. *Zeitschrift für Physik* 39, 1926, 2-3.
- [2] A Duperier. The Temperature Effect on Cosmic-Ray Intensity and the Height of Meson Formation. *Proc. Phys. Soc.* 61, 1948, 34-40.
- [3] Y. Miyazaki, M. Wada. Simulation of cosmic ray variation due to temperature effect. *Acta phys. Acad. Sci. hung.* 29, 1970, 591-595.
- [4] T. Kohno, K. Imai, A. Inue, M. Kodama, M. Wada. Estimation of the Vertical Profile of Atmospheric Temperature from Cosmic-Ray Components. *Proceedings of the 17th International Cosmic Ray Conference, held in Paris, France.* Volume 10., p.289.
- [5] L.I. Dorman. *Cosmic Rays in the Earth's Atmosphere and Underground*, Springer 2004.
- [6] V.V. Borog, O.V. Belonosova, A.S. Davydov, G.M. Kruchenitskii, S.P. Perov, V.G. Yanke. Study of Atmospheric Temperature at Different Altitudes using Muon Angular Distribution at Sea Level. *29th International Cosmic Ray Conference Pune, 2005*, 381-384.
- [7] A. Dragić, V. Udović, R. Banjanac, D. Joković, D. Maletić, N. Veselinović, M. Savić, J. Puzović. The New Setup in the Belgrade Low-Level and Cosmic-Ray Laboratory. *Nucl. Tech. Radiat. Protect.* 26, 2011, 181-192.
- [8] M. Savić, A. Dragić, D. Maletić, N. Veselinović, R. Banjanac, D. Joković, V. Udović. A novel method for atmospheric correction of cosmic-ray data based on principal component analysis. *Astropart. Phys.* 109, 2019, 1-11.

**ATMOSPHERIC TEMPERATURE PROFILE ESTIMATION  
BASED ON MEASURED COSMIC RAY MUON FLUX**

**Mihailo SAVIĆ, Vladimir UDOVIČIĆ, Dimitrije MALETIĆ,  
Aleksandar DRAGIĆ, Radomir BANJANAC, Dejan JOKOVIĆ,  
Nikola VESELINOVIĆ and David KNEŽEVIĆ**

*Institute of Physics Belgrade, University of Belgrade, Belgrade, Serbia,  
msavic@ipb.ac.rs, udovicic@ipb.ac.rs, maletic@ipb.ac.rs, dragic@ipb.ac.rs,  
banjanac@ipb.ac.rs, yokovic@ipb.ac.rs, veselinovic@ipb.ac.rs,  
davidk@ipb.ac.rs*

**ABSTRACT**

The effect of atmospheric parameters in secondary cosmic ray muon component is well known. This is mainly through two dominant meteorological effects - barometric (due to atmospheric pressure variation) and temperature (due to atmospheric temperature variation). There are several theoretical and empirical models that describe these effects well. Usually this knowledge is used to correct for secondary cosmic ray variations due to atmospheric effects.

Alternatively, once model parameters are established, sensitivity of cosmic ray muon detectors to variations of atmospheric origin can be used to estimate temperatures for different layers of the atmosphere. In this work we will demonstrate this procedure using cosmic ray data measured in Low Background Laboratory for Nuclear Physics at Institute of Physics Belgrade, combined with parameters of empirical model for meteorological effects based on principal component analysis.





**ИНДЕКС АУТОРА**



## A

Aleksandar DLABAČ, 227  
 Aleksandar DRAGIĆ, 233, 649  
 Aleksandar KANDIĆ, 44  
 Aleksandar MILOVANOVIĆ, 510, 529, 535  
 Aleksandar VUKADINOVIĆ, 366  
 Aleksandra JOVANOVIĆ, 483  
 Aleksandra MILATOVIĆ, 422, 466  
 Aleksandra SOKIĆ, 304  
 Alexandra HELBIG, 622  
 Amra ŠABETA, 472  
 Ana ČUČULOVIĆ, 58  
 Andrea KOJIĆ, 478  
 Andrej VRANIČAR, 155  
 Andrija ĐUROVIĆ, 227  
 Ann FEGHALI JOËLLE, 386  
 Antonije ONJIA, 162  
 Aoife GALLAGHER, 386  
 Aco JANIĆIJEVIĆ, 639

## B

Bakhanova ELENA, 458  
 Becker FRANK, 458  
 Benard BERIŠAJ, 422, 466  
 Benjamin ZORKO, 344  
 Bertolini MARCO, 458  
 Biljana DOJČINOVIĆ, 561  
 Biljana MILENKOVIĆ, 89, 240, 288  
 Biljana VUČKOVIĆ, 258, 266  
 Boban RAKIĆ, 510, 517, 529, 535  
 Bojan MILJEVIĆ, 155, 168, 251  
 Bojan PAVIČAR, 453  
 Bojan RADAK, 584  
 Boris LONČAR, 436  
 Borjana VRANJEŠ, 53  
 Boško GAJIĆ, 110  
 Branislav VULEVIĆ, 639  
 Branislava MITROVIĆ, 21, 53  
 Branko BAJIĆ, 589  
 Branko VODENIK, 344

## C

Carlo MACCIA, 386

## D

Dalibor ARBUTINA, 122, 554, 629  
 Danijela SOLDATOVIĆ, 554  
 David KNEŽEVIĆ, 233, 649  
 Dejan JOKOVIĆ, 233, 649  
 Denis STANIĆ, 220  
 Dimitrije MALETIĆ, 233, 649  
 Đorđe IVANOVIĆ, 258  
 Đorđe LAZAREVIĆ, 77, 82, 603, 629  
 Dragan VESELINOVIĆ, 58  
 Dragana KRSTIĆ, 240, 483  
 Dragana TODOROVIĆ, 21, 34, 40, 71, 138, 215, 273, 357  
 Dragoslav NIKEZIĆ, 89, 177, 240, 279, 288, 483  
 Dražan JAROŠ, 453  
 Drina JANKOVIĆ, 366  
 Dubravka VUKOVIĆ, 50  
 Dušan MRĐA, 3, 103, 208

## E

Emil FULAJTAR, 110  
 Erika BRATTICH, 29

## F

Faj DARIO, 458  
 Ferrari PAOLO, 458  
 Francesca DE MONTE, 386  
 Françoise MALCHAIR, 386

## G

Georgios SIMANTIRAKIS, 386  
 Giorgia IURLARO, 297  
 Goran KOLAREVIĆ, 453  
 Gorana KARANOVIC, 337  
 Gordan NIŠEVIĆ, 436  
 Gordana PANTELIĆ, 21, 34, 40, 50, 71, 138, 144, 192, 200, 215, 273, 297, 357, 417

**I**

Igor ČELIKOVIĆ, 44, 192, 177, 200, 208, 215  
Igor MIKLAVČIĆ, 220  
Ines KRAJCAR BRONIĆ, 12  
Irena TANASKOVIĆ, 96, 129, 150, 428  
Irina KANDIĆ, 44  
Ištván BIKIT, 3  
Ivana AVRAMOVIĆ, 575, 584, 589  
Ivana BOBOVIĆ, 596  
Ivana СОНА, 330, 337  
Ivana JELIĆ, 567  
Ivana MAKSIMOVIĆ, 77, 116, 122, 603, 629  
Ivana SMIČIKLAS, 330, 543, 561, 567  
Ivana TUCAKOVIĆ, 344  
Ivana VUKANAC, 21, 34, 40, 71, 138, 192, 200, 215, 273, 357  
Ivanka ANTOVIĆ, 64

**J**

Jan HANSMAN, 155  
Jasmina MIHAJLOVIĆ, 483  
Jasmina MILOVANOVIĆ, 589  
Jelena AJTIĆ, 29, 53  
Jelena KRNETA NIKOLIĆ, 21, 34, 40, 71, 138, 192, 200, 215, 273, 357  
Jelena PAJIĆ, 499, 510, 517, 529, 535  
Jelena PETROVIĆ, 110, 162  
Jelena STAJIĆ, 89, 240, 288  
Jelena STANKOVIĆ PETROVIĆ, 144, 417  
Jelena STANOJKOVIĆ, 58  
Jelena ŽIVKOVIĆ RADOVANOVIĆ, 266  
Jelica KALJEVIĆ, 417  
Jérémie DABIN, 386  
Jiří NOHÝL, 622  
Johann PLAGNARD, 386  
Jovana ILIĆ, 21, 96, 129, 150, 428  
Jovana KNEŽEVIĆ, 155, 168, 251  
Jovana NIKOLOV, 3, 155, 168, 251, 266, 394, 401  
Jovanovic ZORAN, 458

**K**

Katarina RAJKOVIĆ, 616  
Katja MAGDIĆ KOŠIČEK, 344  
Khan SHAHED, 458  
Kristina BIKIT-ŠREDER, 3, 103, 208  
Kristina KALKAN, 103  
Krstić DRAGANA, 458

**L**

Leposava FILIPOVIĆ PETROVIĆ, 155, 168, 251  
Ljiljana GULAN, 258, 266  
Ljiljana JANKOVIĆ MANDIĆ, 110, 162  
Ljudmila BENEDIK, 344

**M**

Magdalena RADOVIĆ, 366  
Maja EREMIĆ SAVKOVIĆ, 584, 589  
Maja EREMIĆ-SAVKOVIĆ, 233  
Marija EGERIĆ, 561  
Marija JANKOVIĆ, 21, 34, 40, 71, 138, 215, 273, 357  
Marija JEREMIĆ, 483  
Marija LEKIĆ, 122  
Marija MAJER, 417  
Marija MIRKOVIĆ, 366  
Marija ŠLJIVIĆ-IVANOVIĆ, 330, 543, 561, 567  
Marijan NEČEMAR, 344  
Marijana BALIN KOVAČEVIĆ, 596  
Marina POJE SOVILJ, 220  
Marine DELEU, 386  
Mariotti FRANCESCA, 458  
Marko KRAJINOVIĆ, 489  
Marko PERIĆ, 366  
Marta SANŠ MERCE, 386  
Matjaž KOŽELJ, 610  
Miguel Angel HERNÁNDEZ CEBALLOS, 29  
Mihailo SAVIĆ, 233, 649  
Mihajlo JOVIĆ, 330, 543, 567, 561

## O

Mihajlo VIĆENTLIJEVIĆ, 50  
 Milan ĐORĐEVIĆ, 110  
 Milan GAVRILOVIĆ, 44  
 Milan VUJOVIĆ, 584, 589, 596  
 Milana MARJANOVIĆ, 394, 401  
 Milenko ĐUKIĆ, 517, 523  
 Milica RAJAČIĆ, 21, 34, 40, 71, 138,  
 215, 273, 357  
 Milomir MILAKOVIĆ, 453  
 Miloš ĐALETIĆ, 297, 304, 312, 318,  
 323, 441  
 Miloš DAVIDOVIĆ, 144, 622  
 Miloš VIĆIĆ, 478  
 Miloš ŽIVANOVIĆ, 144, 192, 200, 215,  
 297, 304, 386, 417, 436, 441, 447, 472,  
 622  
 Milutin JEVREMOVIĆ, 554  
 Miodrag MILENOVIĆ, 82, 116  
 Mirjana ČUJIĆ, 110, 162  
 Mirjana ĐURAŠEVIĆ, 616  
 Mirjana RADENKOVIĆ, 21, 34, 40,  
 71, 138, 215, 273, 357  
 Mrđan ĐOKIĆ, 110

## N

Nataša LAZAREVIĆ, 122  
 Nataša SARAP, 21, 34, 40, 71, 138, 215,  
 273, 357  
 Nataša TODOROVIĆ, 3, 155, 168, 251,  
 266, 394, 401  
 Nebojša NIKOLIĆ, 483  
 Nenad RADAKOVIĆ, 58  
 Nenad STEVANOVIĆ, 240, 279, 288  
 Nevena ZDJELAREVIĆ, 122  
 Nevenka ANTOVIĆ, 64, 245, 350  
 Nikezić DRAGOSLAV, 458  
 Nikola KRŽANOVIĆ, 144, 297, 304,  
 386, 417, 436, 441, 447, 472  
 Nikola SVRKOTA, 64, 227, 245, 350,  
 422, 466  
 Nikola VESELINOVIĆ, 233, 649

Oliver HUPE, 472  
 Olivera CIRAJ BJELAC, 144, 375,  
 386, 417, 489

## P

Peđa JANAČKOVIĆ, 44  
 Perko VUKOTIĆ, 227, 245  
 Pierotti LUISA, 458  
 Predrag BOŽOVIĆ, 447  
 Predrag KUZMANOVIĆ, 155, 168,  
 251, 394, 401  
 Principi SARA, 458

## R

Radomir BANJANAC, 233, 649  
 Radovan ILIĆ, 483  
 Ranko DRAGOVIĆ, 110  
 Ranko ZEKIĆ, 227, 245  
 Robert LAKATOŠ, 103, 208  
 Rodoljub ČUČULOVIĆ, 58

## S

Sanja VRANJEŠ-ĐURIĆ, 366  
 Saša BAŠIĆ, 596  
 Saša NESTOROVIĆ, 58  
 Seleno SAMARDŽIĆ, 103, 208  
 Sergej ANDRUHOVIĆ, 350  
 Silvija LUČIĆ, 394, 401  
 Slađan VELINOV, 584, 589  
 Slađana VUKOVIĆ, 499, 517, 523  
 Slavko DIMOVIĆ, 543, 567  
 Slobodan MARKOVIĆ, 103  
 Snežana ALEMPIJEVIĆ, 596  
 Snežana DRAGOVIĆ, 110, 162  
 Sofija FORKAPIĆ, 3, 21, 103, 155,  
 177, 208, 251  
 Srboljub STANKOVIĆ, 436, 447  
 Stefan NEUMAIER, 144  
 Stevan KARIMANOVIĆ, 323

Steven BELL, 297  
Suzana BOGOJEVIĆ, 96, 129, 150,  
428  
Svetlana GRDOVIĆ, 53

## T

Tatjana IGNIĆ, 453  
Tomislav ANĐELIĆ, 227, 245  
Turk TAJANA, 458

## V

Valentin BLIDÉANU, 386  
Vanja RADOLIĆ, 220  
Vedrana MAKARIĆ, 441, 472  
Vedrana PROKIĆ, 517  
Vesna ARSIĆ, 96, 129, 150, 177, 428  
Viacheslav MOROSH, 297  
Vladimir DJURDJEVIC, 29  
Vladimir JANJIĆ, 584  
Vladimir MARKOVIĆ, 240, 279, 288  
Vladimir UDOVIČIĆ, 177, 233, 649  
Vojislav ANTIĆ, 408  
Vojislav STANIĆ, 567

## Z

Željka KNEŽEVIĆ, 386, 417  
Željko GRAHEK, 330, 337  
Zorana MILANOVIĆ, 366  
Zorica OBRADOVIĆ, 616

## САДРЖАЈ





**САДРЖАЈ:**

<b>ОПШТИ ПРОБЛЕМИ ЗАШТИТЕ ОД ЗРАЧЕЊА .....</b>	<b>1</b>
Metode ispitivanja radioaktivnosti životne sredine i akcidenti .....	3
Challenges in radiation protection – the point of view of a small radiation protection society .....	12
<b>РАДИОЕКОЛОГИЈА И ИЗЛАГАЊЕ СТАНОВНИШТВА .....</b>	<b>19</b>
Radioekologija i izlaganje stanovništva – prvih 55 godina .....	21
Petnaestogodišnji trendovi specifične aktivnosti berilijuma-7 u vazduhu u Evropi .....	29
Uticaj kosmičkog zračenja na koncentraciju $^7\text{Be}$ u ukupnom depozitu .....	34
Sadržaj radioaktivnog izotopa vodonika u padavinama sa referentnih meteoroloških stanica u Srbiji .....	40
Specifična aktivnost radionuklida $^{40}\text{K}$ , $^{137}\text{Cs}$ , $^{210}\text{Pb}$ i efektivna doza ingestije iz odabranih lekovitih biljaka sa područja Majdanpeka .....	44
Gamaspektrometrijsko ispitivanje čajeva iz uvoza u periodu od 2015. do 2018. godine .....	50
Sadržaj radionuklida u mahovinama na području prigradskih opština grada Beograda .....	53
Radioaktivnost u mahovinama i zemljištu sakupljenom 2018. godine u NP Đerdap .....	58
Koncentracije aktivnosti radionuklida u diskriminantnoj analizi i u hijerarhijskom grupisanju južnojadranskih mugilida.....	64
Procena radioekoloških parametara za radioizotop $^{90}\text{Sr}$ u agroekosistemu .....	71
Određivanje aktivnosti radionuklida i doze od Ra-226 u brazilskom orahu .....	77
Određivanje aktivnosti radionuklida u plodu banane.....	82
Koncentracija prirodnih radionuklida i $^{137}\text{Cs}$ duž reke lepenice .....	89
Monitoring radioaktivnosti zemljišta i procena radijacionog rizika za stanovništvo .....	96
Procena brzine erozije zemljišta na osnovu aktivnosti $^{137}\text{Cs}$ na Titelskom lesnom platou .....	103
Assessment of soil erosion rates in southeastern Serbia using nuclear techniques .....	110
Određivanje aktivnosti radionuklida U-235 i U-238 u jamskoj vodi zatvorenog rudnika Gabrovnica kod Kalne.....	116
Radioaktivnost u zemljištu na lokaciji hidrometalurškog postrojenja u Gabrovnici kod Kalne .....	122
Радиоактивност радне и животне средине термоелектране „Морава“ у периоду 2015 – 2018. године .....	129
Ispitivanje kontaminacije životne sredine osiromašenim uranijumom u Srbiji, 20 godina kasnije .....	138
Empir project 16ENV04 Preparedness – main goals and research directions .....	144
Међународна интеркомпарација гамаспектроскопске анализе и укупне алфа и укупне бета активности вода .....	150
Radijacioni aspekti primene fosfogipsa u građevinarstvu .....	155
Prirodni radionuklidi u građevinskom materijalu u Srbiji .....	162
Radioaktivnost nus-proizvoda hemijske industrije .....	168

<b>РАДОН</b> .....	<b>175</b>
Pregled istraživanja radona u prethodnih 29 simpozijuma Društva za zaštitu od zračenja Srbije i Crne Gore .....	177
MetroRADON- пројекат за унапређење мерења радона у Европи .....	192
Izvori nesigurnosti pri klasifikaciji radonskih zona .....	200
Problem torona i predlog direktne metode određivanja koncentracije toronovih potomaka .....	208
Сезонске варијације концентрације радона.....	215
Seasonal radon variations in some selected dwellings in the Republic of Croatia – preliminary results .....	220
Radon u školama i dječijim vrtićima u Crnoj Gori .....	227
Distribucija koncentracije radona po spratnosti stambenih zgrada .....	233
Merenje koncentracije radona na teritoriji grada Kragujevca .....	240
Upoređenje rezultata mjerenja koncentracija aktivnosti radona pasivnim detektorima Radtrack2 i RSKS .....	245
Određivanje emanacije <sup>222</sup> Rn iz prirodnog gipsa i fosfogipsa .....	251
Анализа утицаја различитих грађевинских материјала на ниво радона у кућама старије градње .....	258
Radon u vodi za piće na području opštine Zvečan na severu Kosova i Metohije .....	266
Merenje radona u vodi – REM 2018 radon-in-water pt .....	273
Vremenska zavisnost efikasnosti detekcije radona i njegovih potomaka u difuzionim komorama ....	279
Густина трагова чврстих траг детектора излаганим у дифузионим коморама .....	288
<b>МЕТОДЕ ДЕТЕКЦИЈЕ И МЕРНА ИНСТРУМЕНТАЦИЈА</b> .....	<b>295</b>
Evaluation of dose rate data provided by non-governmental networks .....	297
Ispitivanje aktivnih ambijentalnih dozimetara upoljima pozadinskog zračenja niskog inteziteta .....	304
Унапређења digitalnog merača radioaktivnog zračenja DMRZ-M15 i prototip stacionarnog alarmnog merača DMRZ-M15A .....	312
Унапређење softvera uređaja GMC7 za kontinualno merenje jačine doze gama zračenja u životnoj sredini .....	318
Interfejs za povezivanje dozimetara na računar i slanje podataka na veb-sajt .....	323
Novi materijali za separaciju radioaktivnog stroncijuma iz morske vode .....	330
Čerenkovljev efekt u određivanju <sup>89,90</sup> Sr.....	337
Combination of an automated isolation method and gamma spectrometry for determination of <sup>55</sup> Fe in complex samples.....	344
Ефикасност детекције двоstrukih koincidencija intenzivnih gama zraka iz raspada Ba-133 sistemom sa dva i tri NaI(Tl) detektora.....	350
Procena nesigurnosti rezultata merenja usled postupka uzorkovanja .....	357
Procena merne nesigurnosti pri merenju aktivnosti radiofarmaceutika u doze kalibratoru .....	366
<b>ЗАШТИТА ОД ЗРАЧЕЊА У МЕДИЦИНИ</b> .....	<b>373</b>
Zaštita od zračenja u medicini: prvih 55 godina .....	375
VERIDIC: validation and estimation of radiation skin dose in interventional cardiology .....	386

Primena $^{177}\text{Lu}$ u terapiji neuroendokrinih tumora na institutu za onkologiju Vojvodine - prva zapažanja i predlog mera zaštite od zračenja.....	394
Izloženost zračenju pri radu sa $^{18}\text{F-FDG}$ na odeljenju nuklearne medicine .....	401
Koncept za klasifikaciju, evaluaciju, sistem kontrole i mere prevencije vanrednih situacija u nuklearnoj medicini .....	408
<b>ДОЗИМЕТРИЈА .....</b>	<b>415</b>
Harmonisation of dose measurement procedures using passive dosimeters: use of passive $\text{H}^*(10)$ dosimetry systems in Europe .....	417
Preliminarna ispitivanja izloženosti pacijenata u stomatološkoj praksi u Crnoj Gori.....	422
Elementi procene izlaganja radnika jonizujućim zračenjima prirodnog porekla - pristup i metodologija na primeru rudara u rudniku mrkog uglja “Soko” .....	428
Izabrane metode proračuna buildup faktora u zaštiti od gama i X zračenja .....	436
Determination of uniformity and field size of reference x-ray beams .....	441
Provera apsorbovanih doza u vodi u radioterapijskim ustanovama Srbije od 2017. do 2019. godine .	447
Provjera tačnosti apsorbovanih doza u centru za radioterapiju International Medical Centers Banja Luka .....	453
Report of EURADOS activity of WG12 in interventional radiology procedures.....	458
Rezultati međulaboratorijskog poređenja ličnog ekvivalenta doze $\text{H}_p(10)$ .....	466
EURAMET DOSEtrace project and supplementary comparison .....	472
Uticaj vazdušne šupljine na raspodelu doze u radijacionoj terapiji fotonskim snopom.....	478
Monte Carlo dozimetrija u brahiterapiji kancera cerviksa .....	483
Mapiranje doze na površini kože u interventnoj kardiologiji .....	489
<b>БИОЛОШКИ ЕФЕКТИ ЈОНИЗУЈУЋИХ ЗРАЧЕЊА.....</b>	<b>497</b>
Biološki efekti zračenja, radiotoksikologija, medicinski nadzor - pregledni rad .....	499
Pet decenija radijacione citogenetike u Srbiji .....	510
Procena profesionalne ekspozicije u različitim oblastima primene jonizujućih zračenja u medicini ..	517
Uticaj profesionalne ekspozicije jonizujućim zračenjima na stanje hematopoeznog sistema.....	523
Evaluacija referentnih vrednosti mikronukleus testa za profesionalno izložena lica u Srbiji .....	529
Međulaboratorijska poređenja biodozimetrijskih laboratorija – procena doze dicentrik i mikronukleus testom .....	535
<b>РАДИОАКТИВНИ ОТПАД И ДЕКОНТАМИНАЦИЈА.....</b>	<b>541</b>
Radioaktivni otpad i dekontaminacija: retrospektiva radova prezentovanih na Simpozijumima Društva za zaštitu od zračenja u periodu 1963.-2017. godine .....	543
Puštanje u rad postrojenja za preradu radioaktivnog otpada.....	554
Biodostupnost mn u zemljištu nakon <i>in situ</i> remedijacije apatitnim aditivom .....	561
Modelovanje sorpcionih izoterma jona $\text{Ni(II)}$ na otpadnim cementnim materijalima.....	567
<b>РЕГУЛАТИВА, ЕДУКАЦИЈА И ЈАВНО ИНФОРМИСАЊЕ.....</b>	<b>573</b>
Регулатива на Симпозијумима Друштва за заштиту од зрачења .....	575
Nacionalna strategija radijacione i nuklearne sigurnosti – prioriteti i izazovi .....	584

Закон о радијационој и нуклеарној сигурности и безбедности нови правни оквир .....	589
Систем издавања одобрења према закону о радијационој и нуклеарној сигурности и безбедности .....	596
Komparativna analiza vrednosti za <i>clearance levels</i> u nacionalnim pravilnicima sa vrednostima iz aktuelne direktive saveta Evropske unije.....	603
Radiation protection training in Slovenia .....	610
Korišćenje virtuelnih programskih aplikacija u edukaciji .....	616
Overview of the existing UAV regulatory framework in European countries in the context of an emergency response and emergency response exercises .....	622
Mogućnost analize izlaganja jonizujućim zračenjima za različite izvore električne energije u Srbiji .	629
<b>НЕЈОНИЗУЈУЋА ЗРАЧЕЊА .....</b>	<b>637</b>
Pregled aktivnosti u oblasti nejonizujućih zračenja tokom proteklih Simpozijuma .....	639
<b>СЛОБОДНЕ ТЕМЕ.....</b>	<b>647</b>
Procena temperaturskog profila atmosfere na osnovu detektovanog fluksa kosmičkih miona.....	649
<b>ИНДЕКС АУТОРА .....</b>	<b>657</b>
<b>САДРЖАЈ .....</b>	<b>663</b>