

# ЗБОРНИК РАДОВА



## XXXI Симпозијум Друштва за заштиту од зрачења Србије и Црне Горе



**06-08. октобар 2021.  
Београд, Србија**

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



# **ЗБОРНИК РАДОВА**

**XXXI СИМПОЗИЈУМ ДЗЗСЦГ  
Београд  
06-08. октобар 2021.**

**Београд  
2021.**

**RADIATION PROTECTION SOCIETY OF  
SERBIA AND MONTENEGRO**



**PROCEEDINGS**

**XXXI SYMPOSIUM RPSSM  
Belgrade  
6<sup>th</sup> - 8<sup>th</sup> October 2021**

**Belgrade  
2021**

ЗБОРНИК РАДОВА

XXXI СИМПОЗИЈУМ ДЗЗСЦГ

06-08.10.2021.

Издавачи:

Институт за нуклеарне науке „Винча“  
Друштво за заштиту од зрачења Србије и Црне Горе

За извршног издавача:

Проф. Др Снежана Пајовић

Уредници:

Др Ивана Вуканац  
Др Милица Рајачић

e-ISBN 78-86-7306-161-0

©Institut za nuklearne nauke „Vinča“

Техничка обрада:

Милица Рајачић, Милош Ђалетић, Наташа Сарап

Електронско издање:

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

Година издања:

Октобар 2021.



Овај Зборник као и сви радови у њему подлежу лиценци:

Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License, <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Ова лиценца дозвољава само преузимање и дистрибуцију дела, ако/док се правилно назначавача име аутора, без икаквих промена дела и без права комерцијалног коришћења дела.

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

Београд, 06-08.10.2021.

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: Ивана Вуканац

Чланови:

Гордана Пантелић, Институт за нуклеарне науке „Винча“, Београд  
Софија Форкапић, Природно математички факултет, Нови Сад  
Маја Еремић Савковић, Директорат за радијациону и нуклеарну сигурност и безбедност Србије, Београд  
Милица Рајачић, Институт за нуклеарне науке „Винча“, Београд  
Милош Ђалетић, Институт за нуклеарне науке „Винча“, Београд  
Наташа Сарап, Институт за нуклеарне науке „Винча“, Београд  
Андреа Којић, Институт за нуклеарне науке „Винча“, Београд  
Јелена Станковић Петровић, Институт за нуклеарне науке „Винча“, Београд  
Војислав Станић, Институт за нуклеарне науке „Винча“, Београд  
Предраг Божовић, Институт за нуклеарне науке „Винча“, Београд  
Велибор Андрић, Институт за нуклеарне науке „Винча“, Београд  
Кристина Бикит, Природно математички факултет, Нови Сад  
Ивана Максимовић, Нуклеарни објекти Србије, Београд

Научни одбор:

др Драгана Тодоровић, Институт за нуклеарне науке „Винча“, Београд  
др Душан Мрђа, Природно математички факултет, Нови Сад  
др Никола Свркота, ЦЕТИ, Подгорица, Црна Гора  
др Драгана Крстић, Природно математички факултет, Институт за физику, Крагујевац  
др Биљана Миленковић, Институт за информационе технологије, Крагујевац  
др Јелена Стајић, Институт за информационе технологије, Крагујевац  
др Јелена Ајтић, Факултет ветеринарске медицине, Београд  
др Владимир Удовичић, Институт за физику, Земун, Београд  
др Наташа Лазаревић, Нуклеарни објекти Србије, 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 Игор Челиковић, Институт за нуклеарне науке „Винча“, Београд  
др Александар Кандић, Институт за нуклеарне науке „Винча“, Београд  
др Србољуб Станковић, Институт за нуклеарне науке „Винча“, Београд  
др Милош Живановић, Институт за нуклеарне науке „Винча“, Београд

Организацију су помогли:

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

Министарство просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије

*Овај Зборник је збирка радова саопштених на XXXI Симпозијуму Друштва за заштиту од зрачења Србије и Црне Горе који је одржан у Београду 06-08.10.2021. Радови су разврстани у десет секција. Поред тога што су сви радови у Зборнику рецензирани од стране Научног одбора, за све приказане резултате и тврдње одговорни су сами аутори.*

*Југословенско друштво за заштиту од зрачења основано је 1963. године у Порторожу, а од 2005. носи име "Друштво за заштиту од зрачења Србије и Црне Горе". Ове године Друштво обележава 58 година организоване заштите од зрачења на простору бивше Југославије. Као и до сада, симпозијум Друштва за заштиту од зрачења представља прилику да се кроз стручни програм представе резултати истраживања у области заштите од зрачења, анализирају актуелна дешавања, дефинишу проблеми и правци даљег унапређивања наше професионалне заједнице. Поред тога, Симпозијум друштва представља и прилику да сретнемо старе и упознамо нове пријатеље, обновимо старе и започнемо нове професионалне сарадње.*

*Симпозијум је, због специфичних услова рада изазваних пандемијом Корона вируса, по први пут одржан у комбинованом режиму – уживо и виртуелно. Организациони одбор се захваљује ауторима и коауторима научних и стручних радова на доприносу и уложеном труду да се квалитетним и корисним радовима саопштеним на XXXI Симпозијуму очува континуитет у раду Друштва за заштиту од зрачења Србије и Црне Горе.*

*Организациони одбор  
XXXI Симпозијума ДЗЗСЦГ*

**ОПШТИ ПРОБЛЕМИ  
ЗАШТИТЕ ОД ЗРАЧЕЊА**



## KOMPARACIJA RAZLIČITIH MODELA U PROCENI BRZINE EROZIVNIH PROCESA NA LOKALITETU TITELSKOG LESNOG PLATOA

Sofija FORKAPIĆ<sup>1</sup>, Kristina KALKAN<sup>2</sup>, Slobodan MARKOVIĆ<sup>2</sup>,  
Radislav TOŠIĆ<sup>3</sup>, Kristina BIKIT<sup>1</sup>, Jan HANSMAN<sup>1</sup> i Dušan MRĐA<sup>1</sup>

- 1) Prirodno-matematički fakultet, Univerzitet u Novom Sadu, Departman za fiziku, Trg Dositeja Obradovića 4, Novi Sad, [sofija@df.uns.ac.rs](mailto:sofija@df.uns.ac.rs), [kristina.bikit@df.uns.ac.rs](mailto:kristina.bikit@df.uns.ac.rs),  
[jan.hansman@df.uns.ac.rs](mailto:jan.hansman@df.uns.ac.rs), [mrdjad@df.uns.ac.rs](mailto:mrdjad@df.uns.ac.rs)
- 2) Prirodno-matematički fakultet, Univerzitet u Novom Sadu, Departman za geografiju, turizam i hotelijerstvo, Trg Dositeja Obradovića 3, Novi Sad, [kristina.kalkan@dgt.uns.ac.rs](mailto:kristina.kalkan@dgt.uns.ac.rs), [slobodan.markovic@dgt.uns.ac.rs](mailto:slobodan.markovic@dgt.uns.ac.rs)
- 3) Prirodno-matematički fakultet, Univerzitet u Banja Luci, Katedra za fizičku geografiju i geologiju, Mladena Stojanovića 2, Banja Luka, [rtošic@gmail.com](mailto:rtošic@gmail.com)

### SADRŽAJ

U ovom radu dato je poređenje rezultata procene brzina erozivnih procesa primenom gama-spektrometrijskih metoda određivanja aktivnosti cezijuma <sup>137</sup>Cs u vertikalnim zemljišnim profilima sa metodom potencijala erozije - Gavrilovićevom metodom, na istraživanim lokacijama u kombinaciji sa Geografskim informacionim sistemima. Za istraživanje erozije zemljišta odabran je kompleksni sistem jaruga kod geolokaliteta Lesna piramida nedaleko od naselja Titel na Titelskom lesnom platou (TLP), koji predstavlja značajan naučni paleo-lokalitet za koji su poslednjih decenija potvrđeni dokazi o klimatsko-ekološkim događajima poslednjih pet glacijalnih i interglacijalnih perioda. Godišnje brzine erozije/depozicije su procenjene primenom tri konverzionog modela za nekultivisano zemljište u istraženim transportnim zonama lokaliteta TLP: model profila vertikalne distribucije (Profile Distribution Model – PDM) sa dve različite godine dominantnog taloženja iz atmosfere (1963. i 1986. godina) i model difuzije i migracije (Diffusion and Migration Model – DMM). S obzirom na veliki uticaj adekvatnog odabira referentne tačke na rezultate ovih nuklearnih metoda, zbog potvrde validnosti, rezultati su upoređeni sa najrelevantnijim empirijskim modelom na ovim prostorima koji se bavi proračunom erozivnih procesa u bujičnim dolinama - Gavrilovićevim modelom (Erosion Potential Model - EPM). Dobijeni rezultati daju realnu sliku erozivnih procesa jer sva četiri modela ukazuju na dominantnu nisku godišnju vrednost brzine erozije na svim eksperimentalnim lokacijama. Primenom linearne regresione analize najbolja korelacija EPM dobijena je za DMM model ( $r=0,59$ ) dok je sa PDM (1986) i PDM (1963) dobijen nešto niži koeficijent korelacije ( $r=0,57$ ), pošto ovaj model ne uzima u obzir naknadnu redistribuciju zemljišta. Takođe, ispitane su i diskutovane moguće korelacije godišnjih procena brzina erozije sa različitim topografskim parametrima, kao što su: apsolutna visina, nagib, profilna i planarna zakrivljenost, pokrivenost zemljišta vegetacijom. Za razliku od vrednosti godišnjih brzina erozivnih procesa dobijenih nuklearnim metodama na koje statistički značajan uticaj ima nagib terena, u slučaju EPM najveći uticaj na veličinu erozije ima karakter pokrivenosti zemljišta.

### 1. Uvod

Gavrilovićeva metoda (Erosion Potential Model - EPM) je empirijski model razvijen sedamdesetih godina prošlog veka koji procenjuje brzinu erozije na osnovu: geološko-pedoloških karakteristika terena, nagiba, klimatskih karakteristika (prosečne

godišnje količine padavina i prosečne godišnje temperature) i eksploatacije zemljišta. Nastao je kao rezultat terenskih i laboratorijskih istraživanja nakon kojih su utvrđene tablične vrednosti koeficijenata [1] koje su tokom rada na kartiranju erozije u bivšoj Jugoslaviji korigovane [2].

Za procenu srednje godišnje brzine erozije  $W_{sp}$  [ $m^3/(km^2 yr)$ ], odnosno akumulacije sedimenta se koristi sledeća formula:

$$W_{sp}=M \times Z^{1,5}, \quad (1)$$

gde su  $M$  - klimatski potencijal erozije sliva i  $Z$  – koeficijent erozije i procenjuju se na osnovu izraza:

$$M=T \times H_{year} \times \pi, \quad (2)$$

$$Z=Y \times X \times (\varphi + I_{sr}^{0,5}), \quad (3)$$

gde su:

$T$  - temperaturni koeficijent koji zavisi od prosečne godišnje temperature vazduha  $t$  [ $^{\circ}C$ ]:  $T = (t/10 + 0,1)^{0,5}$ ;

$H_{year}$  - prosečna godišnja količina padavina [ $m^3/(km^2 yr)$ ], koja se računa prema obrascu:  $H=(H_1f_1+H_2f_2+\dots+H_n f_n)/F!$  ( $H_1, H_2, H_3\dots$  i  $H_n$  su srednje visine padavina između hijeta,  $f_1, f_2, f_3\dots f_n$  površina između tih hijeta, a  $F$  površina sliva) [3],  $Y$  - koeficijent erodibilnosti zemljišta koji je u funkciji geoloških i pedoloških karakteristika,  $X$  - koeficijent načina korišćenja zemljišta,  $\varphi$  - stepen izraženih erozionih procesa i  $I_{sr}$  - prosečan pad terena [%] [4].

Klimatski podaci preuzeti su sa padavinske stanice Mošorin za period od 1946. godine do 2018. godine. Topografski podaci istraživanog terena uzeti su iz karte nagiba generisane u Digitalnom visinskom modelu u programu ArcMap 10.3.1 (razmere 1:12.000). Vrednosti koeficijenta otpornosti zemljišta na eroziju,  $X$ , koji zavisi od načina korišćenja zemljišta i vegetativnog pokrivača su kvantitativno određene iz vektorske grafike baze The Corine Land Cover Data. Ove vrednosti se kreću od 0,05 (za mešovite i guste šume) do 1,00 (za područja bez biljnog pokrivača). Koeficijent erodibilnosti zemljišta,  $Y$ , je karakteristika zemljišta koja kvantifikuje podložnost eroziji (u rasponu od 0,20 (otporna stena) do 2,00 (fini sedimenti)). Ove vrednosti su procenjene na osnovu geološke karte Srbije i pedološke karte Vojvodine [5, 6]. Koeficijenti  $\varphi$  i  $I_{sr}$  karakterišu stepen izraženih erozionih procesa ( $\varphi$  se kreće u opsegu od 0,10 - ograničena erozija na slivu, do 1,00 - celo područje pogođeno erozijom) i procenjuju se terenskim istraživanjem i na osnovu literature [7].

## 2. Istraživano područje i primenjeni konverzioni modeli

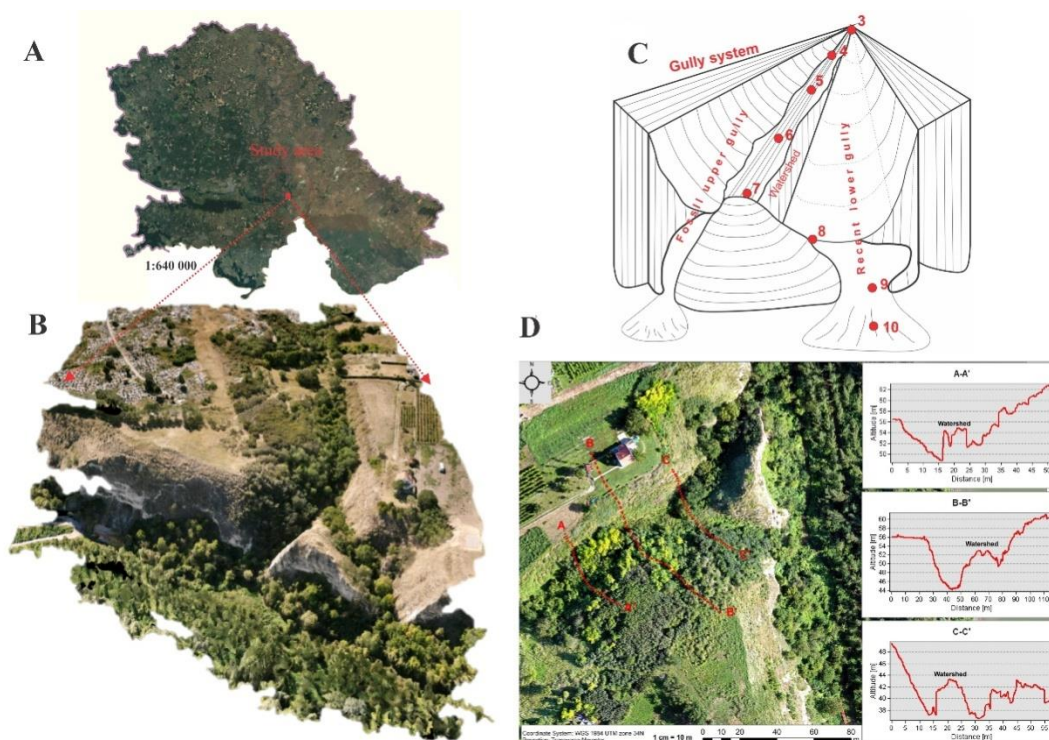
Metode cezijuma,  $^{137}Cs$  i nepodržanog olova,  $^{210}Pb_{ex}$  su primenjene u ovoj studiji za precizno određivanje intenziteta erozije na Titelskom lesnom platou, duž kompleksnog sistema jaruga kod geolokaliteta Lesna piramida. Lesni horizonti predstavljaju prašinate nanose koji su se akumulirali eolskom aktivnošću tokom poslednjih 5 glacijalnih i interglacijalnih perioda u pleistocenu i kroz čitav holocen (okvirno 600.000 godina). U uslovima tople i vlažne interglacijalne klime, formirana su fosilna zemljišta. U jugoistočnom delu TLP u blizini reke Tise (Slika 1) sa terena pod nagibom uzeto je 10 vertikalnih profila zemljišta kod kojih je u slojevima debljine 1 cm određen sadržaj radionuklida gama-spektrometrijskom metodom. Zemljište svih slojeva jednog profila mereno je na istom detektoru nakon sušenja do konstantne mase i homogenizacije.

## Opшти problemi zaštite od zračenja

Uzorci zemljišta su stajali hermetički zatvoreni oko 30 dana pre merenja u cilju dostizanja sekularne ravnoteže. Kvalitativna i kvantitativna analiza uzoraka izvršena je na osnovu pozicije i površine fotovrhova u gama spektru pomoću programa GENIE 2000, proizvođača Canberra, USA. Merenje uzoraka iznosilo je tipično oko 80 ks. Kalibracija detektora izvršena je CRM – smešom radionuklida gama emitera u matriksu smole cilindrične geometrije. Brzine erozija zemljišta su procenjene korišćenjem dva konverzionna modela: (1) model profila vertikalne distribucije, PDM (profile distribution model) sa dve godine dominantnog taloženja radiocezijuma iz atmosfere (1963. i 1986. godina Černobilskog akcidenta) i (2) difuzioni i migracioni model, DMM (diffusion and migration model) za neobrađivano zemljište. Kao referentni profili uzeti su profili sa lokacije 7 i 8 sa relativno zaravnjenog neobrađivanog terena na TLP čija raspodela cezijuma po slojevima je poslužila za određivanje koeficijenta oblika vertikalne distribucije  $h_0$  i proračun godišnjih brzina erozija za svaku ispitanu lokaciju prema PDM modelu:

$$Y=10/(t-1986) \ln(1-X/100) h_0 \quad (4)$$

gde je  $Y$  – godišnja brzina erozije zemljišta [ $t/(\text{ha yr})$ ];  $t$  – godina uzorkovanja [ $\text{yr}$ ];  $X$  – procenat redukcije  $^{137}\text{Cs}$  u odnosu na referentni inventar ( $(A_{\text{ref}}-A_u)/A_{\text{ref}} \times 100 \%$ );  $A_u$  – ukupni inventar  $^{137}\text{Cs}$  za uzorkovani profil [ $\text{Bq/m}^2$ ]. U ovoj formuli izmenjena je godina dominantne depozicije  $^{137}\text{Cs}$  (uzeta 1986. godina umesto 1963. godine) što predstavlja PDM1986 model.



Slika 1. Istraživano područje (B) na ortofoto mapi Vojvodine (A) sa šematski prikazom sistema jaruga i lokacijama uzorkovanja (C) sa slikama terena i poprečnim presekom jaruga (D).

U cilju dobijanja realističnijih rezultata, izračunate su brzine erozije i pomoću DMM modela i Excel-ovog add-in programa [8]. Uzet je doprinos Černobiljskog akcidenta iz literature - 80 % za naš region [9, 10]. Implementirane su vrednosti iz programa za relaksacionu dubinu H, koeficijent D i brzinu migracije V [8]. U slučaju metode  $^{210}\text{Pb}$ ex, moguće je primeniti samo DMM model i dobijeni su nešto veći rezultati za neto eroziju od  $-3,7 \text{ t/(ha yr)}$  sa 98 % odnosom transportovanog sedimentau odnosu na metodu  $^{137}\text{Cs}$  (Tabela 2).

### 3. Rezultati

Kako bi rezultati Gavrilovićeve metode bili uporedivi sa rezultatima radioaktivnih metoda, neophodno je pretvoriti zapreminske vrednosti za brzinu erozije [ $\text{m}^3/(\text{km}^2 \text{ yr})$ ] u masene procene erozije [ $\text{t/(ha yr)}$ ] koje se dobijaju konverzionim modelima. To se postiže množenjem dobijenih vrednosti sa gustinom zemljišnog profila  $\rho$  [ $\text{kg/m}^3$ ] (Tabela 1):

**Tabela 1. Procena brzine erozije Gavrilovićevom metodom za 10 uzorkovanih profila Titelskog lesnog platoa.**

Profil	Y	$\phi$	X	$I_{sr}$ [%]	M	Z	P [ $\text{kg}/(\text{m}^2 \text{ yr})$ ]	Wsp [ $\text{t}/(\text{ha yr})$ ]
1	0,5	0,8	0,9	4,47	89,71	1,31	4320,0	5,82
2	0,5	0,4	0,6	8,94	89,71	1,02	3110,0	2,86
3	0,5	0,4	0,6	17,02	89,71	1,36	3490,0	4,95
4	0,5	0,3	0,4	22,66	89,71	1,01	2390,0	2,18
5	0,5	0,3	0,4	23,4	89,71	1,03	3840,0	3,59
6	0,5	1	0,4	23,01	89,71	1,16	3730,0	4,18
9	0,5	1	0,4	30,59	89,71	1,31	3740,0	5,01
10	0,5	1	0,4	31,01	89,71	1,31	3600,0	4,86
11	0,5	0,6	0,4	38,47	89,71	1,36	3870,0	5,51
12	0,5	0,6	0,4	21,99	89,71	1,06	4100,0	4,00

Na osnovu dobijenih rezultata Gavrilovićeve metode moguće je izvršiti poređenje sa metodama radiocezijuma. U tabeli 2 predstavljeni su rezultati četiri modela za procenu brzine erozije na istraživanom području.

**Tabela 2. Usporedni prikaz rezultata brzine erozije korišćenjem četiri različita modela.**

Profil	Y [t ha <sup>-1</sup> yr <sup>-1</sup> ]			
	<sup>137</sup> Cs metoda			EPM
	PDM (1963)	DMM	PDM (1986)	
1	-5,11	-3,90	-8,89	5,82
2	-1,8	-1,60	-3,13	2,86
3	-1,68	-1,50	-2,92	4,95
4	-1,15	-1,00	-2,00	2,18
5	-3,99	-3,20	-6,94	3,59
6	-6,54	-4,70	-11,38	4,18
7	Referentni profili			
8				
9	-3,95	-3,10	-6,87	5,01
10	-3,08	-2,50	-5,36	4,86
11	-9,27	-6,00	-16,13	5,51
12	-4,54	-3,50	-7,90	4,00

Na svim profilima erozivni procesi su dominantni, što pokazuju i metode radiocezijuma sa negativnim predznakom. Da bi se utvrdilo u kojoj meri su rezultati u Tabeli 2 korelirani, izračunati su Pirsonovi koeficijenti linearne regresione analize i dati u Tabeli 3.

**Tabela 3. Vrednosti koeficijenata korelacije godišnjih brzina erozija primenom različitih modela.**

	PDM (1963)	DMM	PDM (1986)	EPM
PDM (1963)	1,00			
DMM	0,99	1,00		
PDM (1986)	0,99	0,99	1,00	
EPM	0,57	0,59	0,57	1,00

#### 4. Diskusija i zaključak

Na osnovu linearne regresione analize može se zaključiti da su rezultati Gavrilovićevog modela dobro korelirani sa rezultatima metode radiocezijuma. Najveća vrednost Pirsonovog koeficijenta dobijena je za DMM model ( $r=0,59$ ) dok je za PDM (1986) i PDM (1963) dobijen niži koeficijent korelacije (od  $r=0,57$ ) što je očekivano jer ovaj model ne uzima u obzir naknadnu redistribuciju zemljišta. Analizom nekih topografskih faktora (visina, nagib, profilna i planarna zakrivljenost), došlo se do zaključka da je Gavrilovićeva metoda osetljivija na karakter pokrivenosti terena, za razliku od konverzionih modela koji su pokazali veću zavisnost od nagiba istraženog područja.

Poput sličnih empirijskih modela (USLE, RUSLE), i EPM se može smatrati samo dijagnostičkim alatom koji treba kombinovati sa drugim metodama. Primenom geografskih informacionih sistema poboljšava se identifikacija i klasifikacija pojedinih parametara neophodnih za ove modele.

### 5. Zahvalnica

Istraživanja je finansiralo Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije (Ev. br. 451-03-9/2021-14/ 200125)

### 6. Literatura

- [1] L. Globevnik, D. Holjević, G. Petkovšek, J. Rubinić. Article in proceedings. In: Proc. of symposium HS01 held during IUGO2003 at Sapporo. July 2003. IAHS Publ. no. 279., 224 -233
- [2] R. Lazarević. Novi postupak za određivanje koeficijenta erozije (Z). *EROZIJA – stručno-informativni bilten* 13, 1985, 53-61
- [3] R. Tošić, N. Lovrić, S. Dragičević. Assessment of the impact of depopulation on soil erosion: case study – Republika Srpska (Bosnia and Herzegovina). *Carpathian J. Earth Environ. Sci.* 14 (2), 2019, 505 – 518
- [4] Z. Gavrilovic, Use of an Empirical Method Erosion Potential Method for Calculating Sediment Production and Transportation in Unstudied or Torrential Streams. International Conference on River Regime, Hydraulics Research Limited, 1988.
- [5] <http://geoliss.mre.gov.rs/OGK/RasterSrbija/>
- [6] B. Nejgebauer, B. Živković, Đ. Tanasijević, N. Miljković. Pedološka karta Vojvodine u razmeri 1:50 000. Institut za poljoprivredna istraživanja, Novi Sad, 1971.
- [7] Z. Gavrilovic, M. Stefanovic, I. Milovanovic, J. Cotric, M.Milojevic: Torrent Classification – Base of Rational Management of Erosive Regions, *Earth Environ. Sci.* 4 (2008) 012039
- [8] D.E. Walling, Q. He. Improved models for estimating soil erosion rates from cesium-137 measurements. *J. Environ. Qual.* 28, 1999, 611-622,
- [9] B. Michalik. NORM contaminated area identification using radionuclides activity concentration pattern in a soil profile. *J. Environ. Radioact.* 173, 2017, 102-111
- [10] J. Petrović, S. Dragović, R. Dragović, M. Đorđević, M. Đokić, B. Zlatković, D. Walling. Using <sup>137</sup>Cs measurements to estimate soil erosion rates in the Pčinja and South Morava River Basins, Southeastern Serbia. *J. Environ. Radioact.* 158-159, 2016, 71–80

### COMPARISON OF DIFFERENT MODELS IN THE ASSESSMENT OF SOIL EROSION RATE ON SITE OF THE TITEL LOESS PLATEAU

**Sofija FORKAPIĆ<sup>1</sup>, Kristina KALKAN<sup>2</sup>, Slobodan MARKOVIĆ<sup>2</sup>,  
Radislav TOŠIĆ<sup>3</sup>, Kristina BIKIT<sup>1</sup>, Jan HANSMAN<sup>1</sup> and Dušan MRĐA<sup>1</sup>**

- 1) *Faculty of Sciences, University of Novi Sad, Department of Physics, Trg Dositeja Obradovića 4, Novi Sad, [sofija@df.uns.ac.rs](mailto:sofija@df.uns.ac.rs), [kristina.bikit@df.uns.ac.rs](mailto:kristina.bikit@df.uns.ac.rs), [jan.hansman@df.uns.ac.rs](mailto:jan.hansman@df.uns.ac.rs), [mrdjad@df.uns.ac.rs](mailto:mrdjad@df.uns.ac.rs)*
- 2) *Faculty of Sciences, University of Novi Sad, Department of Geography, Tourism and Hotel Management, Trg Dositeja Obradovića 3, Novi Sad, [kristina.kalkan@dgt.uns.ac.rs](mailto:kristina.kalkan@dgt.uns.ac.rs), [slobodan.markovic@dgt.uns.ac.rs](mailto:slobodan.markovic@dgt.uns.ac.rs)*
- 3) *Faculty of Sciences, University of Banja Luka, Chair of Physical Geography and Geology, Mladena Stojanovića 2, Banja Luka, [rtošic@gmail.com](mailto:rtošic@gmail.com)*

#### ABSTRACT

In this paper the results of soil erosion rates using gamma-spectrometric methods for determining the activity of <sup>137</sup>Cs in vertical soil profiles are compared with the erosion potential model - Gavrilovic's method in combination with Geographic Information Systems. To investigate soil erosion, a complex gully system was selected near the geo-locality Loess Pyramid on the Titel Loess Plateau (TLP), which is an important scientific paleo-locality for which evidence of climatic and ecological events of the last five glacial and interglacial periods has been confirmed. Annual erosion / deposition rates were estimated using three conversion models for uncultivated land in the transport zones of the TLP site: the Profile Distribution Model (PDM) with two different years of dominant atmospheric fallout of <sup>137</sup>Cs (1963 and 1986) and the Diffusion and Migration Model (DMM). Due to the validity, the results were compared with the most relevant empirical model in this area, which deals with the calculation of erosive processes in torrent valleys - Gavrilovic's model. The obtained results give a realistic picture of erosive processes because all four models indicate a dominant low annual value of erosion rate at all experimental locations. Using linear regression analysis, the best EPM correlation was obtained for the DMM model ( $r = 0.59$ ) while with PDM (1986) and PDM (1963) a slightly lower correlation coefficient was obtained ( $r = 0.57$ ), since this model does not consider the subsequent land redistribution. Also, possible correlations of annual estimates of erosion rates with different topographic parameters, such as: absolute height, slope, profile and planar curvature, land cover with vegetation, were examined and discussed. In contrast to the nuclear methods on which the slope of the terrain has a statistically significant influence, in the case of EPM the greatest influence on the size of erosion has the character of land cover.

**РАДИОЕКОЛОГИЈА И  
ИЗЛАГАЊЕ СТАНОВНИШТВА**



## IZVEDENE KONCENTRACIJE $^{238}\text{U}$ I $^{226}\text{Ra}$ U HRANI ZA ŽIVOTINJE

**Branislava MITROVIĆ**

Univerzitet u Beogradu, Fakultet veterinarske medicine, Beograd, Srbija,  
[slavatab@vet.bg.ac.rs](mailto:slavatab@vet.bg.ac.rs)

### SADRŽAJ

*Fosfatni mineralni aditivi, monokalcijum i dikalcijum fosfat, koji imaju visok sadržaj  $^{238}\text{U}$  i  $^{226}\text{Ra}$ , mogu biti glavni izvor kontaminacija hrane za životinje. U ishrani životinja monokalcijum i dikalcijum fosfat se koriste kao izvor neorganskog fosfora. Rezultati prikazani u ovom radu ukazuju na to da maksimalno dozvoljen sadržaj  $^{238}\text{U}$  i  $^{226}\text{Ra}$  u monokalcijum i dikalcijum fosfatu za ishranu životinja treba da bude jednak izvedenim koncentracijama radionuklida u mineralnim fosfatnim aditivima koji se koriste u ishrani mlečnih krava (243 Bq/kg za  $^{238}\text{U}$  i 39 Bq/kg za  $^{226}\text{Ra}$ ), čime se obezbeđuje dobijanje radijaciono higijenskih obroka za sve vrste i kategorije životinja. Takođe, potrebno je razmotriti donošenje nove zakonske regulative kojom bi se regulisao maksimalno dozvoljeni sadržaj  $^{238}\text{U}$  i  $^{226}\text{Ra}$  u fosfatnim mineralnim aditivima za ishranu životinja.*

### 1. Uvod

Prirodni i proizvedeni radioaktivni elementi prisutni u zemljištu, vazduhu, vodi i hrani kontinuirano ozračuju sva živa bića na planeti. Zemljišno zračenje potiče od primordijalnih radionuklida, od kojih su najznačajniji  $^{238}\text{U}$  i  $^{232}\text{Th}$  sa potomcima svog radioaktivnog raspada, i  $^{40}\text{K}$ . Sadržaj prirodnih radionuklida u zemljištu u najvećoj meri zavisi od vrste matične stene od koje zemljište potiče. U fosfatnim i granitnim stenama, kao i škriljcima, sadržaj prirodnih radioaktivnih elemenata je obično veći nego u sedimentnim stenama [1]. Radionuklidi iz zemljišta se putem vode i biljaka uključuju u lanac hrane zemljište–biljke–životinje i na taj način dospevaju i do čoveka. Migracija prirodnih radionuklida iz zemljišta u biljke zavisi od više različitih faktora od kojih su najvažniji vrsta zemljišta, sadržaj glina, pH vrednost zemljišta, vrsta biljne kulture [2-5]. Uranijum je hemijski i radiološki toksičan element i u prirodi se javlja kao smeša tri izotopa  $^{238}\text{U}$  (99,27 %),  $^{235}\text{U}$  (0,72 %) i  $^{234}\text{U}$  (0,006 %). Radioaktivnim raspadom  $^{238}\text{U}$  (period poluraspada  $4,7 \cdot 10^{10}$  godina) nastaje njegov potomak  $^{226}\text{Ra}$  (period poluraspada  $1,6 \cdot 10^3$  godina). Uranijum i radijum ne predstavljaju esencijalne elemente za živa bića i njihova resorpcija iz digestivnog trakta životinja je niska. Kod odraslih preživara vrednost faktora gastrointestinalne apsorpcije za uranijum je 0,011 (od 0,01 do 0,012); kod monogastičnih životinja za rastvorljiva jedinjenja uranijuma 0,05, a za nerastvorljiva jedinjenja uranijuma 0,002; kod prasadi mlađih od dva meseca ( $0,012 \pm 0,004$ ), dok za radijum on iznosi 0,2 [6-7]. Posle resorpcije iz digestivnog trakta oko 67% uranijuma se filtrira u bubrezima i izlučuje iz organizma urinom, dok se preostali uranijum distribuira u kosti, jetru, bubrege, testise i slezinu [8-10]. U organizmu životinja radijum se distribuira slično kao i drugi zemnoalkalni elementi (Ca, Sr i Ba) i u najvećoj meri se akumulira u kostima, dok je njegov sadržaj u mišićima uglavnom nizak [11].

Ingestija hrane i vode predstavlja najznačajniji put (80 %) unosa prirodnih i proizvedenih radionuklida u organizam ljudi i životinja [12]. Pod pojmom hrana za životinje podrazumavaju se proizvodi biljnog, životinjskog i mineralnog porekla, koji

pojedinačno ili u smešama služe za ishranu domaćih životinja, a nisu štetni po njihovo zdravlje. Pravilna ishrana životinja podrazumeva dobro izbalansirane obroke koji treba da zadovolje sve potrebe životinja za proteinima, ugljenim hidratima, mastima, vitaminima i mineralima. Proizvodnja kompletnih smeša za ishranu životinja predstavlja složen proces koji podrazumeva usitnjavanje, mlevenje, drobljenje i mešanje različitih hraniva (sirovina) u određenom odnosu, čime se dobijaju obroci za životinje u kojima svaka sirovina zadržava svoje prvobitne osobine [13]. Da bi se zadovoljile dnevne potrebe životinja za fosforom, u smeše se najčešće dodaju fosfatni mineralni aditivi, monokalcijum i dikalcijum fosfat, u količini od 0,5 % do 3 % po kilogramu hrane [14], dok se u vitaminsko-mineralne premikse dodaju u količini do 7 % [15], u zavisnosti od vrste i kategorije životinja. Prema literaturnim podacima, najznačajniji izvor  $^{238}\text{U}$  i  $^{226}\text{Ra}$  u obrocima za životinje predstavljaju fosfatni mineralni aditivi monokalcijum i dikalcijum fosfat u kojima sadržaj uranijuma može biti visok, i do 2100 Bq/kg [16-20]. Biljna hraniva koja se koriste u ishrani životinja imaju uglavnom nizak sadržaj prirodnih radioaktivnih elemenata, osim  $^{40}\text{K}$ , i ne predstavljaju značajan izvor kontaminacije obroka za životinje [21-23].

Prema „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“ [24] maksimalno dozvoljen saržaj uranijuma i radijuma u hrani za životinje određuje se izračunavanjem izvedenih koncentracija radionuklida u hrani. Potrebe životinja za hranjivim materijama, mineralima i vitaminima zavise od vrste i kategorije životinja, pa je izračunavanje izvedenih koncentracija radionuklida u hrani za životinje složen postupak koji zahteva poznavanje fizioloških i uzgojnih karakteristika domaćih životinja.

Na osnovu iznetih literaturnih podataka, a u cilju zaštite ljudi i životinja od ozračivanja i radioaktivne kontaminacije, zadatak ovog rada je da se izračunaju izvedene koncentracije  $^{238}\text{U}$  i  $^{226}\text{Ra}$  u fosfatnim mineralnim aditivima, vitaminsko–mineralnim premiksima, dopunskim i kompletnim smešama koje se koriste u ishrani svinja u tovu, mlečnih krava, toвне piladi i kokoši nosilja konzumnih jaja.

## 2. Materijal i metode

Izvedene koncentracije radionuklida u hrani ( $IK_h$ ) za životinje i hrani za ljude izračunate su na osnovu [24]:

$$IK_h = \frac{GD}{e(g)_{n,ing} \cdot m} \quad (1)$$

gde je:

$GD$  – granična vrednost efektivne doze (0,1 mSv/god),

$e(g)_{n,ing}$  (Sv/Bq) – primljena efektivna doza pri jediničnom unošenju radionuklida  $n$  ingestijom ( $ing$ ), i iznosi  $4,5 \cdot 10^{-8}$  Sv/Bq za  $^{238}\text{U}$  i  $2,8 \cdot 10^{-7}$  Sv/Bq za  $^{226}\text{Ra}$ ,

$m$  (kg) – masa hrane koju životinja, odnosno pojedinac iz stanovništva, pojede tokom života, i za njeno određivanje koriste se podaci iz knjiga, praktikuma i uputstva proizvođača hrane za životinje, kao i statistički bilteni.

## 3. Rezultati i diskusija

Ishrana svinja u tovu bazira se na korišćenju pretežno biljnih hraniva (kukuruz, pšenica i ječam) uz dodatak vitamina i minerala čime se obezbeđuje postizanje visokog dnevnog

prirasta, uz što manji utrošak hrane po kilogramu prirasta [25]. Tov svinja započinje posle zalučenja prasadi, u starosti od najmanje 14 dana i traje oko 180 dana kada svinje dostignu telesnu masu od 95 kg do 105 kg. Da bi se životinjama obezbedile potrebne hranjive materije u ishrani svinja u tovu koriste se fosfatni mineralni aditivi, vitaminsko–mineralni premiksi, dopunske smeše i kompletne smeše (Tabela 1).

**Tabela 1. Izvedene koncentracije  $^{238}\text{U}$  i  $^{226}\text{Ra}$  u pojedinim vrstama hraniva za ishranu svinja u tovu, dužina tova 166 dana\*.**

Hranivo	Količina dnevnog unosa (%) po kg	Prosečan unos tokom perioda tova (kg)	$^{238}\text{U}$ (Bq/kg)	$^{226}\text{Ra}$ (Bq/kg)
Fosfatni mineralni aditivi [18-19]	1	4,9	446	72
Vitaminsko–mineralni premiks	3	15	149	24
Dopunska smeša	30	149	15	2,4
Kompletna smeša [18-19]	100	498	4,5	0,7

\* računato za tov svinja od 166 dana, odbijen period zalučenja od 14 dana.

Svinje u tovu kojima se u obrok dodaje 1 % fosfatnih mineralnih aditiva, dnevno unesu 30 g monokalcijum ili dikalcijum fosfata. Da bi se obezbedilo dobijanje radijaciono higijenski ispravnog obroka za svinje, u fosfatnim mineralnim aditivima sadržaj prirodnih radionuklida ne sme biti veći od 446 Bq/kg za  $^{238}\text{U}$  i 72 Bq/kg za  $^{226}\text{Ra}$  (tabela 1). Time se obezbeđuje da u vitaminsko–mineralnim premiksima, dopunskim smešama i kompletnim smešama, koje sadrže mineralne fosfatne aditive, sadržaj  $^{238}\text{U}$  i  $^{226}\text{Ra}$  (Bq/kg) bude ispod izračunatih izvedenih koncentracija u hrani. U vitaminsko-mineralnim premiksima, koji se u zavisnosti od starosti i težine životinje, svinjama u tovu dodaju u količini od 1 % do 3 % po kilogramu hrane, izvedene koncentracije prirodnih radionuklida su 149 Bq/kg za  $^{238}\text{U}$  i 24 Bq/kg za  $^{226}\text{Ra}$ . Dopunske smeše pored vitamina, minerala, fosfatnih mineralnih aditiva, sadrže i amino kiseline, enzime i druge aditive koji utiču na ukus i svarljivost hrane. Koriste se za pripremu kompletnih smeša, prosečno u količini od 30 % po kilogramu smeše i ne bi trebalo da sadrže više od 15 Bq/kg  $^{238}\text{U}$  i 2,4 Bq/kg  $^{226}\text{Ra}$  (tabela 1). U kompletnim smešama za ishranu svinja u tovu, u trajanju od 166 dana, izvedene koncentracije radionuklida su 4,5 Bq/kg za  $^{238}\text{U}$  i 0,7 Bq/kg za  $^{226}\text{Ra}$ .

Ishrana mlečnih krava [26] podrazumeva optimalno zadovoljavanje potreba životinja za održavanjem života i proizvodnju mleka. U intenzivnoj proizvodnji kravama se pored osnovnog obroka, koji se sastoji od kabaste hrane (seno, paša i drugo), dodaju i koncentrovana hraniva kao dopunski obrok u količini od maksimalno 12 kg [20]. Međusobni odnos kabastih i koncentrovanih hraniva zavisi od mlečnosti životinje i sastava osnovnog obroka. U tabeli 2 prikazane su izvedene koncentracije  $^{238}\text{U}$  i  $^{226}\text{Ra}$  (Bq/kg) u fosfatnim mineralnim aditivima, dopunskim smešama i kompletnim smešama za ishranu mlečnih krava koje prosečno daju 7060 l mleka sa 3,6 % mlečne masti tokom 305 dana laktacije.

**Tabela 2. Izvedene koncentracije  $^{238}\text{U}$  i  $^{226}\text{Ra}$  u pojedinim vrstama hraniva za ishranu mlečnih krava, dužina laktacije 305 dana\*.**

Hranivo	Prosečan unos tokom perioda tova (kg)	$^{238}\text{U}$ (Bq/kg)	$^{226}\text{Ra}$ (Bq/kg)
Fosfatni mineralni aditivi	9,2	243	39
Dopunska smeša	76,3	29,1	4,7
Kompletna smeša	2074	1,1	0,2

\* računato za kravu u laktaciji koja dnevno daje 23 l mleka, sastav osnovnog obroka: livadsko seno 5 kg, silaža kukuruza 25 kg; dopunski obrok: kompletna smeša u količini od 6,8 kg.

Mineralno fosfatni aditivi, koji se životinjama dodaju u hranu prosečno u količini od 30 g dnevno, i dopunska smeša koja se dodaje prosečno u količini od 250 g dnevno, muznim krava daju se umešani u hranu ili posipanjem preko hrane. Dopunske smeše se mogu dodavati i u kompletne smeše tako što se mešaju sa žitaricama. Kompletno smeše se mlečnim kravama daju u kombinaciji sa kabastim delom obroka, u količini koja varirau zavisnosti od potreba životinja. Da bi se obezbedilo dobijanje radijaciono higijenski bezbednih obroka za mlečne krave treba koristiti fosfatne mineralne aditive u kojima sadržaj prirodnih radionuklida nije veći od 243 Bq/kg za  $^{238}\text{U}$  i 39 Bq/kg za  $^{226}\text{Ra}$ . Time se obezbeđuje dobijanje dopunskih i kompletnih smeša u kojima je sadržaj prirodnih radionuklida ispod izvedenih koncentracija u hrani za mlečne krave (29,1 Bq/kg za  $^{238}\text{U}$  i 4,7 Bq/kg za  $^{226}\text{Ra}$  u dopunskim smešama i u kompletnim smešama za ishranu krava u laktaciji 1,1 Bq/kg za  $^{238}\text{U}$  i 0,2 Bq/kg za  $^{226}\text{Ra}$ ) (tabela 2). Izvedene koncentracije prirodnih radionuklida  $^{238}\text{U}$  i  $^{226}\text{Ra}$  (Bq/kg) u hrani za živinu prikazane su u tabeli 3 (pilići u tovu) i tabeli 4 (kokoši nosilje konzumnih jaja). Tov mladih pilića, tzv. brojlerski tov, obično traje 42 dana, do postizanja telesne mase od 2500 g do 2700 g [27]. Tokom perioda tova životinje prosečno pojedu 3,7 kg hrane [23]. U ishrani tovnih pilića koriste se fosfatni mineralni aditivi, vitaminsko–mineralni premiksi, dopunske smeše i kompletne smeše (tabela 3) [28].

**Tabela 3. Izvedene koncentracije  $^{238}\text{U}$  i  $^{226}\text{Ra}$  u pojedinim vrstama hraniva za ishranu pilića u tovu, dužina tova 42 dana.**

Hranivo	Količina dnevno unosa (%) po kg	Prosečan unos tokom perioda tova (kg)	$^{238}\text{U}$ (Bq/kg)	$^{226}\text{Ra}$ (Bq/kg)
Fosfatni mineralni aditivi	1	0,04	58789	9448
Vitaminsko–mineralni premiks	3	0,1	19596	3149
Dopunska smeša	35	1,3	1680	270
Kompletna smeša	100	3,7	588	95

Fosfatni mineralni aditivi, monokalcijum i dikalcijum fosfat, pilićima u tovu se dodaju u količini od 1 % po kilogramu hrane, životinje prosečno pojedu 0,0009 kg dnevno. Dopunske smeše pored proteina, sadrže mineralne elemente i druge dodatke, koriste se tako što se mešaju sa kukuruzom, ječmom i drugim žitaricama (u količini od oko 35 %

po kg hrane). Zbog male količine dnevnog unosa hrane (prosečno 0,09 kg dnevno) i kratkog perioda života (42 dana) za pripremu radijaciono higijenski ispravnih vitaminsko–mineralnih predmeša, dopunskih i kompletnih smeša za ishranu pilića u tovu mogu se koristiti monokalcijum i dikalcijum fosfat sa veoma visokim sadržajem prirodnih radionuklida (58789 Bq/kg za  $^{238}\text{U}$  i 9448 Bq/kg za  $^{226}\text{Ra}$ ) (tabela 3).

Ishrana kokoši nosilja konzumnih jaja u intenzivnom uzgoju podrazumeva zadovoljenje nutritivnih potreba životinja u periodu od 18 nedelje do 52 nedelje života (ponekad i duže). Tokom perioda nošenja jaja od 238 dana, kokoš pojede oko 24 kg hrane, prosečno 0,1 kg hrane dnevno [15]. U ishrani kokoši nosilja konzumnih jaja koriste se fosfatni mineralni aditivi (1,2 %), vitaminsko–mineralni premiksi (do 3 %), dopunske smeše (oko 35 %) i kompletne smeše (tabela 4) [14].

**Tabela 4. Izvedene koncentracije  $^{238}\text{U}$  i  $^{226}\text{Ra}$  u pojedinim vrstama hraniva za ishranu kokoši nosilja konzumnih jaja, dužina nosivosti jaja 238 dana.**

Hranivo	Količina dnevnog unosa (%) po kg	Prosečan unos tokom perioda tova (kg)	$^{238}\text{U}$ (Bq/kg)	$^{226}\text{Ra}$ (Bq/kg)
Fosfatni mineralni aditivi	1,2	0,3	7780	1250
Vitaminsko–mineralni premiks	3	0,7	3112	500
Dopunska smeša	35	8,3	267	43
Kompletna smeša	100	24	93	15

Da bi se dobile radijaciono higijenski ispravne kompletne smeše, za ishranu kokoši nosilja, u kojima sadržaj radionuklida nije veći od 93 Bq/kg za  $^{238}\text{U}$  i 15 Bq/kg za  $^{226}\text{Ra}$ , mogu se koristiti fosfatni mineralni aditivi u kojima je maksimalno dozvoljen sadržaj  $^{238}\text{U}$  7780 Bq/kg i  $^{226}\text{Ra}$  1250 Bq/kg (tabela 4). Na osnovu rezultata prikazanih u tabelama 3 i 4 zapaža se da se u ishrani živine, zbog male količine dnevnog unosa hrane, mogu koristiti fosfatni mineralni aditivi koji sadrže veoma visoke specifične aktivnosti  $^{238}\text{U}$  i  $^{226}\text{Ra}$ , dok upotreba ovih fosfatnih mineralnih aditiva nije radijaciono higijenski bezbedna za ishranu svinja u tovu i mlečnih krava.

Savremeni naučni pristup određivanja maksimalno dozvoljenog sadržaja radionuklida u hrani za životinje podrazumeva primenu koeficijenta prelaza (transfer faktor), koji se definiše kao „udeo dnevnog unosa radionuklida koji pređe u 1 kg životinjskog proizvoda, u uslovima ravnotežnog dnevnog unošenja radionuklida hranom“ [6] (tabela 5).

**Tabela 5. Koeficijenti prelaza (d/l ili d/kg) uranijuma i radijuma za pojedine proizvode životinjskog porekla [6].**

Proizvod životinjskog porekla	Uranijum			Radijum		
	srednja vrednost	min	max	srednja vrednost	min	max
Kravlje mleko	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$5,0 \cdot 10^{-4}$	$6,1 \cdot 10^{-3}$	$3,8 \cdot 10^{-4}$	$9,0 \cdot 10^{-5}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$
Kozje mleko	$1,4 \cdot 10^{-3}$	-	-	-	-	-
Juneće meso	$3,9 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$	$6,3 \cdot 10^{-4}$	$1,7 \cdot 10^{-3}$	-	-
Svinjsko meso	$4,4 \cdot 10^{-2}$	$2,6 \cdot 10^{-2}$	$6,2 \cdot 10^{-2}$	-	-	-
Živinsko meso	$7,5 \cdot 10^{-1}$	$3,0 \cdot 10^{-1}$	1,2	-	-	-

Tako na primer, ukoliko bi se u ishrani životinja koristili fosfatni mineralni aditivi u kojima specifična aktivnost  $^{238}\text{U}$  iznosi 1600 Bq/kg, a  $^{226}\text{Ra}$  iznosi 1000 Bq/kg, krave muzare i svinje u tovu bi dnevno unosile 48 Bq/kg  $^{238}\text{U}$  i 30 Bq/kg  $^{226}\text{Ra}$ , a pilići u tovu oko 1,6 Bq/kg  $^{238}\text{U}$  i 1 Bq/kg  $^{226}\text{Ra}$ . Primenom koeficijenata prelaza (tabela 5) može se odrediti očekivana specifična aktivnost radionuklida u proizvodima životinjskog porekla (tabela 6).

**Tabela 6. Očekivana specifična aktivnost  $^{238}\text{U}$  i  $^{226}\text{Ra}$  u kravljem mleku, svinjskom i pilećem mesu.**

Proizvod	$^{238}\text{U}$ (Bq/kg, Bq/l)			$^{226}\text{Ra}$ (Bq/kg, Bq/l)		
	srednja vrednost	minimum	maksimum	srednja vrednost	minimum	maksimum
Kravlje mleko	0,09	0,02	0,3	0,01	0,003	0,04
Svinjsko meso	2,1	1,2	3,0	-	-	-
Pileće meso	1,2	0,5	1,9	-	-	-

Na osnovu podataka iznetih u tabeli 6 zapaža se da se ishranom životinja fosfatnim mineralnim aditivi u kojima je sadržaj  $^{238}\text{U}$  1600 Bq/kg i  $^{226}\text{Ra}$  1000 Bq/kg, dobijaju proizvodi životinjskog porekla u kojima je sadržaj  $^{238}\text{U}$  i  $^{226}\text{Ra}$  ispod izvedenih koncentracija radionuklida u hrani za ljude (tabela 7).

**Tabela 7. Izvedene koncentracije  $^{238}\text{U}$  i  $^{226}\text{Ra}$  u pojedinim proizvodima životinjskog porekla.**

Proizvod	Prosečna godišnja potrošnja (kg, l) [29]	$^{238}\text{U}$ (Bq/kg, Bq/l)	$^{226}\text{Ra}$ (Bq/kg, Bq/l)
Mleko, sir i drugi mlečni proizvodi	228	9,7	1,6
Svinjsko meso	49,6	44,8	7,2
Pileće meso	50,2	44,3	7,1

Dobijeni rezultati ukazuju da maksimalno dozvoljeni sadržaj  $^{238}\text{U}$  i  $^{226}\text{Ra}$  u fosfatnim mineralnim aditivima za ishranu životinja može biti jednak granicama sadržaja radionuklida u mineralnim fosfatnim đubrivima ( $^{238}\text{U}$  1600 Bq/kg i  $^{226}\text{Ra}$  1000 Bq/kg), čime se može obezbediti dobijanje radijaciono higijenski bezbedne hrane za životinje i namirnica životinjskog porekla.

#### 4. Zaključak

Da bi se obezbedilo dobijanje radijaciono higijenski ispravne hrane za ishranu domaćih životinja potrebna je sprovesti redovnu kontrolu fosfatnih mineralnih aditiva, monokalcijum fosfata i dikalcijum fosfata, iz uvoza i domaće proizvodnje.

Zbog male količine dnevnog unosa hrane (prosečno 90 g dnevno za tovne piliće i 100 g dnevno za kokoši nosilje konzumnih jaja) izvedene koncentracije  $^{238}\text{U}$  i  $^{226}\text{Ra}$  u fosfatnim mineralnim aditivima za ishranu živine su veoma visoke, u poređenju sa izvedenim koncentracijama  $^{238}\text{U}$  i  $^{226}\text{Ra}$  u fosfatnim mineralnim aditivima koji se koriste za ishranu svinja u tovu i ishranu muznih krava.

Na osnovu prikazanih rezultata može se zaključiti da u monokalcijum i dikalcijum

fosfatu koji se koriste u ishrani životinja maksimalno dozvoljen sadržaj  $^{238}\text{U}$  i  $^{226}\text{Ra}$  treba da bude jednak izvedenim koncentracijama radionuklida u mineralnim fosfatnim aditivima za mlečne krave (243 Bq/kg za  $^{238}\text{U}$  i 39 Bq/kg za  $^{226}\text{Ra}$ ). Pored toga, potrebno je razmotriti donošenje novih zakonskih propisa kojima bi maksimalno dozvoljeni sadržaj  $^{238}\text{U}$  i  $^{226}\text{Ra}$  u fosfatnim mineralnim aditivima za ishranu životinja trebao da bude jednak granicama sadržaja radionuklida u mineralnim fosfatnim đubrivima ( $^{238}\text{U}$  1600 Bq/kg i  $^{226}\text{Ra}$  1000 Bq/kg).

### 5. Zahvalnica

Rad je podržan sredstvima Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije (Ugovor broj 451-03-9/2021-14/200143).

### 6. Literatura:

- [1] UNSCEAR. Sources and Effects of Ionizing Radiation. Volume I. 2008.
- [2] Nenadović, S., Nenadović, M., Kljajević, L., Vukanac, I., Poznanović, M., Mihajlović-Radosavljević, A., Pavlović, V. Vertical distribution of natural radionuclides in soil: Assessment of external exposure of population in cultivated and undisturbed areas. *Sci. Total Environ.* 429, 2012, 309–316.
- [3] Laubenstein, M., Plastino, W., Povinec, P.P., Fabbri, V., Aprili, P., Balata, M., Bella, F., Cardarelli, A., De Deo, M., Gallese, B., Ioannucci, L., Nisi, S., Antoncchia, D., Del Pinto, C., Giarrusso, G. Radionuclide mapping of the Molise region (Central Italy) via gamma-ray spectrometry of soil samples: Relationship with geological and pedological parameters. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 298, 2013, 317–323.
- [4] Štrok, M., and Smodiš, B. Soil-to-plant transfer factors for natural radionuclides in grass in the vicinity of a former uranium mine. *Nucl. Eng. Des.* 261, 2013, 279–284.
- [5] Dragović, S., Janković-Mandić, L., Dragović, R., Dordević, M., Dokić, M., Kovačević, J. Lithogenic radionuclides in surface soils of Serbia: Spatial distribution and relation to geological formations. *J. Geochemical Explor.* 142, 2014, 4–10.
- [6] IAEA. Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments. No. 472. Vienna, 2010.
- [7] Fesenko, S., Isamov, N., Howard, B.J., Voigt, G., Beresford, N.A., Sanzharova, N. Review of Russian language studies on radionuclide behaviour in agricultural animals: part 1. Gut absorption. *J. Environ. Radioact.* 98, 2007, 85–103.
- [8] Gilman, A.P., Villeneuve, D.C., Secours, V.E., Yagminas, A.P., Tracy, B.L., Quinn, J.M., Valli, V.E., Moss, M.A. Uranyl nitrate: 91-day toxicity studies in the New Zealand white rabbit. *Toxicol. Sci.* 41, 1998, 129–137.
- [9] ATSDR. Toxicological Profile for Uranium. U.S. Department of Health and Human Services, 2013.
- [10] Mitrović, B., Vitorović, G., Jovanović, M., Lazarević-Macanović, M., Andrić, V., Stojanović, M., Daković, A., Vitorović, D. Uranium distribution in broiler organs and possibilities for protection. *Radiat. Environ. Biophys.* 53, 2014, 151–157.
- [11] IAEA. Behaviour of Radium: Revised Edition. *Environ. Behav. radium* 476, 2014, 267.
- [12] UNSCEAR. Sources and Effects of Ionizing Radiations. Report to General Assembly with Scientific Annexes, United Nations, New York, 2000.

- [13] Grubić, G., Đorđević, N. Concentrates in dairy cows nutrition. XI International feed technology symposium "Quality Assurance. Vrnjačka Banja, May 30th – June 3rd, 2005, 233-241.
- [14] Ševković, N., Pribičević, S., Rajić, I. Ishrana domaćih životinja, Beograd, Jugoslavija, Naučna knjiga, 1991.
- [15] Veterinarski zavod Subotica. Hrana za živinu.  
[http://www.victoriagroup.rs/sites/default/files/katalozi/hrana\\_za\\_zivinu.pdf](http://www.victoriagroup.rs/sites/default/files/katalozi/hrana_za_zivinu.pdf)
- [16] Arruda-Neto, J.D.T., Tavares, M.V., Filadelfo, M. Concentrations of uranium in animal feed supplements: measurements and dose estimates. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 221, 1997, 97–104.
- [17] Casacuberta, N., Masqué, P., Garcia-Orellana, J., Bruach, J.M., Anguita, M., Gasa, J., Villa, M., Hurtado, S., Garcia-Tenorio, R., 2009. Radioactivity contents in dicalcium phosphate and the potential radiological risk to human populations. *J. Hazard. Materials.* 170, 2009, 814–823.
- [18] Vranješ, B., Mitrović, B., Andrić, V., Ajtić, J., Vranješ, M. Radioactivity in Monocalcium Phosphate and Complete Feed Mixtures for Pigs. *RAD Conf. Proc.*, 2017, 2, 121–125.
- [19] Vranješ, B., Milićević, D., Šefer, D., Stefanović, S., Ajtić, J., Mitrović, B.M. Presence of natural radionuclides and toxic elements in monocalcium phosphate, complete feed and pig manure. *Sci. Total Environ.* 720, 2020, 137578.
- [20] Luz Filho, I.V. da, Scheibel, V., and Appoloni, C.R.  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  and  $^{228}\text{Ra}$  series in bovine and poultry feed and in dicalcium phosphate (DCP) samples by gamma-ray spectrometry. *Brazilian Arch. Biol. Technol.* 59, 2016, 1–9.
- [21] WHO, Uranium in Drinking Water. Background Document for development of WHO guidelines for Drinking Water Quality. WHO/SDE/03.04/118, 2005.
- [22] Vitorović, G., Grdović, S., Mitrović, B., Obradović, M., Petrujkić, B. (2009) Radioecological investigation of food of animal origin in Belgrade environment. *Jpn. J. Vet. Res.* 57, 2009, 169–173.
- [23] Changizi, V., Shafiei, E., Zareh, M.R. Measurement of  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{40}\text{K}$  activities of wheat and corn products in Ilam province - Iran and resultant annual ingestion radiation dose. *Iran. J. Public Health* 42, 2013, 903–914.
- [24] Službeni glasnik RS, 36/2018. 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.
- [25] Kovčičin, S., Živković, B., Stanaćev, V. Aktuelni problemi u ishrani svinja. *Veterinarski glasnik* 56, 2002, 53-61.
- [26] Stojanović, B., Grubić, G. Ishrana preživara – praktikum. Beograd. 2008.
- [27] <https://www.zivinarstvo.com/proizvodnja-mesa/tov-brojlera/>
- [28] <https://hranaprodukt.com/prodavnica/hranamiks-pt-2-1-vitaminsko-mineralni-premiks-za-brojlere/>
- [29] Republički zavod za statistiku. Bilten. Anketa o potrošnji domaćinstva, 2019. Beograd, 2020, <https://publikacije.stat.gov.rs/G2020/Pdf/G20205662.pdf>



### MAXIMUM PERMISSIBLE CONCENTRATION OF $^{238}\text{U}$ AND $^{226}\text{Ra}$ IN FEED

**Branislava MITROVIĆ**

*Faculty of veterinary medicine, Univeristiy of Belgrade, Belgrade, Serbia,  
[slavatab@vet.bg.ac.rs](mailto:slavatab@vet.bg.ac.rs)*

#### ABSTRACT

Phosphate mineral additives, monocalcium and dicalcium phosphate, have a high content of  $^{238}\text{U}$  and  $^{226}\text{Ra}$ , and can thus be the main source of feed contamination. In animal nutrition, monocalcium and dicalcium phosphate are used as a source of inorganic phosphorus. The results presented in this paper indicate that the maximum permissible concentration of  $^{238}\text{U}$  and  $^{226}\text{Ra}$  in monocalcium and dicalcium phosphate should be equal to the maximum permissible concentrations of radionuclides in mineral phosphate additives used in the diet of dairy cows (243 Bq/kg for  $^{238}\text{U}$  and 39 Bq/kg for  $^{226}\text{Ra}$ ). It is also necessary to consider the adoption of new legislation whereby the maximum allowable content of  $^{238}\text{U}$  and  $^{226}\text{Ra}$  in phosphate mineral additives for animal nutrition.

## EFEKTI SVOJSTAVA TLA RAZLIČITIH POLJOPRIVREDNIH KONCEPATA NA MIGRACIJU ANTROPOGENIH RADIONUKLIDA

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

*Institut za nuklearne nauke "Vinča", Institut od nacionalnog značaja za Republiku Srbiju, Univerzitet u Beogradu, 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), [beba@vinca.rs](mailto:beba@vinca.rs), [vukanac@vinca.rs](mailto:vukanac@vinca.rs), [pantelic@vinca.rs](mailto:pantelic@vinca.rs)*

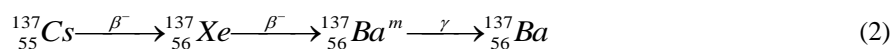
### SADRŽAJ

*Istraživanja obuhvaćena ovom studijom predstavljaju prikaz efekata svojstava tla različitih poljoprivrednih koncepata na migraciju antropogenih radionuklida,  $^{90}\text{Sr}$  i  $^{137}\text{Cs}$ . Za potrebe ovog rada, izvršeno je uzorkovanje obradivog zemljišta na dve dubine na teritoriji grada Beograda tokom 2014. godine. U uzorcima zemljišta su određene fizičko–hemijske osobine i specifične aktivnosti ispitanih radionuklida. Radiohemijska analitička metoda je primenjena za određivanje sadržaja  $^{90}\text{Sr}$ , dok je specifična aktivnost  $^{137}\text{Cs}$  određena primenom gamaspektrometrijske metode. Ispitivanje efekata svojstava analiziranih uzoraka obradivog zemljišta na migraciju  $^{90}\text{Sr}$  i  $^{137}\text{Cs}$ , izvršeno je statističkim metodama analize. Primenom linearne korelacione analize utvrđeni su dominantni fizičko–hemijski parametri koji utiču na migraciju  $^{90}\text{Sr}$  i  $^{137}\text{Cs}$  u poljoprivrednom zemljištu.*

### 1. Uvod

Osim prirodnih radioizotopa, u atmosferi, tlu i vodi mogu se naći i antropogeni (proizvedeni) radionuklidi, koji su nastali kao posledica intenzivnih nadzemnih proba (testiranja) nuklearnog oružja u periodu od 1950. do 1970. godine, ili u slučaju akcidenata i havarija nuklearnih postrojenja [1]. U periodu od 1957. do 2011. godine, dogodilo se 28 nuklearnih akcidenata, od kojih je akcident u Černobilju bio nesumnjivo najširih razmera i najtežih posledica [2]. Generalno, primena nuklearne energije u mirnodopske svrhe je dovela do svojevrzne tehnološke revolucije, ali i povećanog rizika kontaminacije životne sredine antropogenim radionuklidima, što predstavlja ozbiljan i globalni problem .

Najznačajniji antropogeni radionuklidi koji nastaju kao proizvodi nuklearne fisije su  $^{90}\text{Sr}$  i  $^{137}\text{Cs}$ , jer učestvuju u mineralnom metabolizmu živih organizama. Radionuklid  $^{90}\text{Sr}$  je čist beta emiter sa vremenom poluraspada od 28,8 godina, dok je  $^{137}\text{Cs}$  beta–gama emiter sa vremenom poluraspada od 30,2 godine [3, 4]. Navedeni radionuklidi pripadaju grupi ekstremno toksičnih radionuklida, koji izazivaju dugotrajno ozračivanje organizma [5, 6]. Radioaktivni raspadi jezgara pomenutih radionuklida, odvijaju se prema sledećim relacijama:



Glavni mehanizmi deponovanja antropogenih radionuklida iz atmosfere na površinu Zemlje su padavine. Radionuklidi koji se deponuju u vidu čvrstih čestica, mehanički se

zadržavaju na površini zemljišta, dok oni koji su rastvoreni u padavinama, procesom filtracije ulaze u zemljište i najvećim delom se vezuju u površinskom sloju. Distribucija antropogenih radionuklida u zemljištu zavisi od njihovih fizičko–hemijskih osobina, kao i od sposobnosti raznih vrsta zemljišta da vrše sorpciju ili omogućavaju migraciju radionuklida u dublje slojeve zemljišta. Uglavnom se karakteriše izraženom neravnomernošću duž neobrađivih i obrađivih profila zemljišta [7]. U slučaju obrađivog zemljišta, u procesu obrade dolazi do mešanja (rotiranja) slojeva zemljišta, tako da prvobitna zemljišna struktura biva poremećena i antropogeni radionuklidi se mehanički preraspodeljuju. Najveći deo se tokom dužeg perioda zadržava u površinskom sloju zemljišta (0–10 cm), a u oranicama u oraničnom horizontu (20–30 cm).

Studije o distribuciji antropogenih radionuklida u životnoj sredini obezbeđuju osnovne radiološke informacije od vitalnog značaja. Stoga je cilj sprovedene studije prikaz efekata svojstava tla različitih poljoprivrednih koncepata na migraciju antropogenih radionuklida,  $^{90}\text{Sr}$  i  $^{137}\text{Cs}$ , kao i utvrđivanje dominantnih fizičko–hemijskih parametara koji utiču na njihovu vertikalnu distribuciju u ispitivanom zemljištu.

### 2. Eksperimentalni deo

Uzorkovanje u okviru istraživanja obuhvaćenog ovim radom, obavljeno je na lokalitetu Radmilovac koji se nalazi u blizini Instituta za nuklearne nauke "Vinča" u Beogradu. Orađivo zemljište je uzorkovano na dve dubine 0–15 cm i 15–30 cm u proleće i jesen 2014. godine. U okviru organskog poljoprivrednog koncepta primenjena su dva tipa đubrenja, kao i kontrolni tretman bez aplikacije đubrenja, dok su u okviru održivog poljoprivrednog koncepta primenjena dva različita nivoa đubrenja, uz kontrolni tretman bez đubrenja. Uzorkovan je jednak broj uzoraka u obe sezone sa istih mikrolokacija na osnovu geografskih koordinata. Svaki od uzoraka u okviru odgovarajućeg koncepta podvrgnut je posebnoj analizi. Uzorkovanje je izvršeno u skladu sa preporukama Međunarodne agencije za atomsku energiju.

Priprema uzoraka zemljišta je uključivala sledeće korake: uklanjanje mehaničkih nečistoća i sitnjenje do agregata veličine 1–3 cm; sušenje u sušnici do konstantne mase na 105 °C; mehaničko sitnjenje u mlinu za mlevenje uzoraka i dodatno ručno u avanu sa tučkom, a zatim prosejavanje kroz sito od nerđajućeg čelika (veličine pora 250 μm), čime je izvršeno homogenizovanje do praha. Pripremljeni uzorci su izmereni i upakovani u marineli posude zapremine 500 cm<sup>3</sup> za potrebe gamaspektrometrijske analize. Za analizu sadržaja  $^{90}\text{Sr}$  odmereno je oko 150 g na prethodno opisan način pripremljenih uzoraka, koji su dodatno mineralizovani na 500 °C tokom 12 h.

Specifična aktivnost  $^{90}\text{Sr}$  u ispitanim uzorcima je određena nakon tretiranja uzoraka radiohemijskom analitičkom metodom. Spektrometrija beta zračenja je izvršena mernim uređajem koji se koristi za merenje niskih aktivnosti beta emitera u uzorcima iz životne sredine, niskofonskim  $\alpha/\beta$  gasnim proporcionalnim brojačem *Thermo Eberline FHT 770 T* (ESM Eberline Instruments GmbH, Erlangen, Germany), čija je efikasnost za merenje ukupne beta aktivnosti iznosila 35 %. Vreme merenja uzoraka je iznosilo 5400 s.

Specifična aktivnost  $^{137}\text{Cs}$  u ispitanim uzorcima je određena gamaspektrometrijskom metodom, korišćenjem CANBERRA poluprovodničkog germanijumskog detektora visoke čistoće (Canberra Industries, Meriden, Connecticut, SAD), relativne efikasnosti 18 % na energiji od 1332 keV. Vreme merenja uzoraka je iznosilo 60000 s. Spektri su analizirani upotrebom programa GENIE 2000.

Primenjene metode za određivanje fizičko–hemijskih karakteristika uzoraka zemljišta su detaljnije opisane u studiji [8]. Mehanički sastav zemljišta je određen pipet metodom, higroskopska vlažnost gravimetrijskim gubitkom vode iz uzoraka zemljišta, a gustina

cilindrima po Kopecky–om zapremine 100 cm<sup>3</sup>. Elektrometrijska metoda pomoću pH–metra sa dvojnou kombinovanom elektrodom je primenjena za određivanje pH vrednosti zemljišta i u vodi i u kalijum–hloridu. Kvantitativni sadržaj kalcijum–karbonata je određen volumetrijski merenjem zapremine oslobođenog ugljen–dioksida, pomoću Scheibler–ovog kalcimetra. Sadržaj humusa je određen Tjurin–ovom metodom, dok je sadržaj organskog ugljenika određen titracijom sa (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>Fe(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>×6H<sub>2</sub>O nakon digestije uzoraka rastvorom dihromat sumporne kiseline.

### 3. Rezultati i diskusija

Fizičko–hemijske karakteristike zemljišta mogu uticati na migraciju i adsorpciju radionuklida u zemljištu [9]. Rezultati ispitivanja fizičkih i hemijskih osobina odabranog zemljišta su analizirani deskriptivnom statistikom (tabele 1 i 2). Na osnovu rezultata mehaničkih frakcija zemljišta prikazanih u tabeli 1, prema odgovarajućoj klasifikaciji, ispitano zemljište pripada praškasto–glinovitim ilovačama. Dobijene vrednosti higroskopske vlažnosti ispitivanog zemljišta potvrđuju da je to zemljište koje po mehaničkom sastavu odgovara ilovači, dok vrednosti gustine zemljišta ukazuju na manje sabijenu oranicu [7].

**Tabela 1. Deskriptivna statistika fizičkih osobina analiziranog zemljišta.**

Parametar	Mehanički sastav zemljišta (%)				Higroskopska vlažnost (%)	Gustina zemljišta (g cm <sup>-3</sup> )
	Krupni pesak	Sitni pesak	Prah	Glina		
Minimum	2,87	2,95	52,48	27,35	2,22	1,25
Maksimum	9,23	7,11	63,42	33,27	2,84	1,33
Opseg	6,36	4,16	10,94	5,92	0,62	0,08
Srednja vrednost	6,06	4,63	58,26	31,06	2,50	1,29
Standardna devijacija	2,78	1,79	4,66	2,36	0,22	0,03
Medijana	6,04	4,14	58,78	31,90	2,48	1,29
Koeficijent zaobljenosti	-2,82	-1,99	-2,44	-0,79	0,08	-0,46
Koeficijent asimetrije	-0,001	0,49	-0,17	-0,85	0,42	-0,25

**Tabela 2. Deskriptivna statistika hemijskih osobina analiziranog zemljišta.**

Parametar	pH u vodi	pH u KCl	CaCO <sub>3</sub> (%)	Humus (%)	Organski C (%)
Minimum	6,23	6,75	1,2	2,01	0,23
Maksimum	7,35	7,92	1,64	2,63	0,42
Opseg	1,12	1,17	0,44	0,62	0,19
Srednja vrednost	6,77	7,31	1,39	2,28	0,34
Standardna devijacija	0,45	0,54	0,16	0,25	0,08
Medijana	6,78	7,28	1,375	2,245	0,36
Koeficijent zaobljenosti	-2,03	-2,64	-0,58	-1,75	-1,66
Koeficijent asimetrije	0,05	0,09	0,46	0,37	-0,58

U ispitivanju hemijskih osobina zemljišta, pažnja je posvećena određivanju pH vrednosti zemljišta (u vodi i kalijum–hloridu), zatim sadržaja kalcijum–karbonata, sadržaja humusa, kao i sadržaja ukupnog organskog ugljenika (tabela 2). Na osnovu klasifikacije zemljišta prema hemijskoj reakciji, može se zaključiti da je hemijska reakcija zemljišta slabo kisela do neutralna. Luženje i taloženje karbonata zavisi od pH vrednosti zemljišta i bitan je faktor koji kontroliše rastvorljivost, naročito prirodnih radionuklida, što dovodi do njihove pokretljivosti, ali i vezivanja za organsku materiju u zemljištu. Ispitivano zemljište spada u slabo karbonatno zemljište. Prema klasifikaciji zemljišta na osnovu sadržaja humusa, ispitivano zemljište pripada klasi slabo humusnog zemljišta (1–3 % humusa). Organska materija je od velike važnosti prilikom proučavanja migracije radionuklida u zemljištu, jer oni mogu formirati sa organskom materijom komplekse odgovarajuće rastvorljivosti i na taj način migrirati duž profila zemljišta, ili ostati vezani u nekom od njegovih slojeva [10].

U tabeli 3 je predstavljena deskriptivna statistika vrednosti specifičnih aktivnosti  $^{90}\text{Sr}$  i  $^{137}\text{Cs}$  u uzorcima zemljišta u slojevima 0–15 cm (sloj I) i 15–30 cm (sloj II), za dve sezone uzorkovanja i dva poljoprivredna koncepta.

**Tabela 3. Deskriptivna statistika specifičnih aktivnosti  $^{90}\text{Sr}$  i  $^{137}\text{Cs}$  u zemljištu dva poljoprivredna koncepta.**

Parametar	Prolećna sezona				Jesenja sezona			
	$^{90}\text{Sr}$ (Bq kg <sup>-1</sup> )		$^{137}\text{Cs}$ (Bq kg <sup>-1</sup> )		$^{90}\text{Sr}$ (Bq kg <sup>-1</sup> )		$^{137}\text{Cs}$ (Bq kg <sup>-1</sup> )	
	Sloj I	Sloj II	Sloj I	Sloj II	Sloj I	Sloj II	Sloj I	Sloj II
Koncept	Organska poljoprivreda							
Minimum	2,67	2,56	23	22	2,27	2,23	25	25
Maksimum	3,16	2,64	26	30	2,47	2,54	28	29
Srednja vrednost	2,85	2,59	25	26	2,39	2,35	26	27
Standardna devijacija	0,27	0,04	2	4	0,11	0,17	2	2
Medijana	2,74	2,57	26	26	2,43	2,28	25	27
Koncept	Održiva poljoprivreda							
Minimum	2,48	2,32	22	26	2,29	2,02	22	22
Maksimum	3,14	3,37	27	29	2,51	2,78	26	25
Srednja vrednost	2,79	2,87	24	27,3	2,40	2,40	24,3	23,7
Standardna devijacija	0,33	0,53	3	1,5	0,11	0,38	2,1	1,5
Medijana	2,75	2,91	23	27	2,41	2,41	25	24

Nakon kontaminacije zemljine površine najveći deo  $^{90}\text{Sr}$ , kao i  $^{137}\text{Cs}$ , veže se za površinski sloj zemljišta (dubine do 10 cm), iz ovog sloja se mogu jonski izmeniti (13–30 %) i njihova koncentracija opada sa dubinom [4, 7, 8]. Studije su pokazale da se  $^{90}\text{Sr}$  ne ispira lako iz zemljišta i za njegovu migraciju do dubine od jednog metra potrebno je 40–200 godina [7]. Vertikalna migracija  $^{137}\text{Cs}$  u zemljištu je takođe spor proces i procenjeno je da iznosi oko 0,1 cm do 1 cm godišnje [4].

Na osnovu podataka prikazanih u tabeli 3, može se videti da nema značajnih varijacija u vrednostima specifičnih aktivnosti  $^{90}\text{Sr}$  i  $^{137}\text{Cs}$  u ispitivanom zemljištu, uzimajući u

obzir dubinu uzorkovanja i primenjene agrotehničke i meliorativne mere u toku obrade zemljišta u okviru organskog i održivog poljoprivrednog koncepta. S obzirom na to da je uzorkovanje izvršeno na dubini do 30 cm, što predstavlja debljinu oraničnog sloja i zonu korenovog sistema većine ratarsko-povrtarskih kultura, ovo je bilo i za očekivati, jer tehnologija obrade zemljišta posledično može dovesti do rotiranja u okviru ovog sloja zemljišta.

Relativni stepen vezivanja i zadržavanja  $^{90}\text{Sr}$ , kao i ostalih antropogenih radionuklida u zemljištu, u velikoj meri zavisi od jedinjenja u kome se nalaze (vodorastvorljivi, jonoizmenjivi, teško rastvorni), kao i od osobina zemljišta, koje predstavlja dinamičan makrosistem pogodan za jonsku izmenu elemenata [7]. Katjon stroncijuma stupa u intenzivnu jonsku izmenu sa kalcijumom, pri čemu se uspostavlja dinamička ravnoteža između čvrste i tečne faze u zemljištu. Na migracionu sposobnost radiocezijuma utiče prisustvo kalijuma, kao i stabilnog cezijuma [4]. Fizičko-hemijski procesi, odnosno interakcije sa matriksom zemljišta, koji utiču na migraciju radionuklida u zemljištu, kontrolisani su pretežno glinastom frakcijom zemljišta.

Da bi se utvrdili dominantni fizičko-hemijski parametri ispitivanog tla dva poljoprivredna koncepta, koji utiču na vertikalnu distribuciju  $^{90}\text{Sr}$  i  $^{137}\text{Cs}$ , primenjena je linearna regresiona analiza. Koreliranost između pomenutih varijabli izražena preko Pirsonovih koeficijenata korelacije, prikazana je u tabelama 4 i 5.

**Tabela 4. Pirsonovi koeficijenti korelacije između specifične aktivnosti  $^{90}\text{Sr}$  i fizičko-hemijskih parametara ispitivanog zemljišta.**

Parametar	Prolećna sezona				Jesenja sezona			
	Organski koncept		Održivi koncept		Organski koncept		Održivi koncept	
	Sloj I	Sloj II	Sloj I	Sloj II	Sloj I	Sloj II	Sloj I	Sloj II
Krupni pesak	0,10	0,32	-0,56	-0,69	-0,02	0,36	0,39	-0,65
Sitni pesak	-0,94	-0,84	-0,99	-0,98	0,97	-0,82	-0,56	-0,99
Prah	-0,15	0,08	-0,55	-0,69	0,23	0,11	0,40	-0,65
Glina	0,14	-0,08	0,76	0,86	-0,22	-0,12	-0,13	0,83
Higroskopska vlažnost	0,06	0,28	-0,65	-0,77	0,02	0,32	0,28	-0,74
Gustina zemljišta	-0,92	-0,80	-0,51	-0,65	0,94	-0,78	0,44	-0,61
pH u vodi	-0,77	-0,90	0,24	0,40	0,72	-0,91	-0,68	0,35
pH u KCl	-0,33	-0,54	0,73	0,84	0,26	-0,57	-0,18	0,80
$\text{CaCO}_3$	0,11	-0,11	0,24	0,40	-0,19	-0,15	-0,69	0,35
Humus	-0,95	-0,99	-0,04	0,14	0,92	-0,99	-0,86	0,08
Organski ugljenik	0,80	0,92	-0,70	-0,81	-0,76	0,93	0,22	-0,78

**Tabela 5. Pirsonovi koeficijenti korelacije između specifične aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  i fizičko–hemijskih parametara ispitivanog zemljišta.**

Parametar	Prolećna sezona				Jesenja sezona			
	Organski koncept		Održivi koncept		Organski koncept		Održivi koncept	
	Sloj I	Sloj II	Sloj I	Sloj II	Sloj I	Sloj II	Sloj I	Sloj II
Krupni pesak	-0,74	-0,98	0,99	1,00	-0,95	0,30	-0,99	-0,77
Sitni pesak	-0,83	-0,44	0,67	0,56	0,07	0,99	-0,63	-0,95
Prah	-0,88	-0,99	0,98	0,99	-0,84	0,53	-0,99	-0,77
Glina	0,88	0,99	-0,99	-0,97	0,85	-0,52	0,99	0,92
Higroskopska vlažnost	-0,77	-0,98	0,99	0,99	-0,94	0,34	-0,99	-0,84
Gustina zemljišta	-0,87	-0,50	0,98	0,99	0	1,00	-0,99	-0,74
pH u vodi	0,05	0,54	-0,87	-0,93	0,69	0,45	0,70	0,51
pH u KCl	0,56	0,90	-0,99	-0,98	0,99	-0,07	0,99	0,89
CaCO <sub>3</sub>	0,87	1,00	-0,87	-0,93	0,87	-0,50	0,89	0,51
Humus	-0,31	0,21	-0,70	-0,80	0,67	0,74	0,74	0,25
Organski ugljenik	0	-0,50	0,99	0,99	-0,87	-0,50	-0,99	-0,88

U okviru koncepta organske poljoprivrede, dobijena je veoma jaka korelacija između aktivnosti  $^{90}\text{Sr}$  u gornjem sloju zemljišta i sadržaja sitnog peska, gustine zemljišta i sadržaja humusa. U slučaju koncepta održive poljoprivrede, ovo je slučaj samo za prvu sezonu uzorkovanja, i to samo za mehaničku frakciju sitnog peska.

Kada je u pitanju  $^{137}\text{Cs}$ , veoma jaku korelaciju pokazuje njegova aktivnost u gornjem sloju zemljišta sa gotovo svim fizičkim osobinama tla (osim sadržaja sitnog peska), a od hemijskih, sa vrednošću pH u kalijum–hloridu i sadržajem organskog ugljenika, u okviru održivog poljoprivrednog koncepta. U slučaju koncepta organske poljoprivrede, ovo je slučaj u jesenjoj sezoni uzorkovanja, i to za: mehaničku frakciju krupnog peska, higroskopsku vlažnost i vrednost pH u KCl.

U sloju zemljišta od 15-30 cm, u okviru organskog koncepta veoma jaka korelacija postoji između aktivnosti  $^{90}\text{Sr}$  i hemijskih osobina tla: pH u vodi, sadržaja humusa i sadržaja organskog ugljenika. U slučaju koncepta održive poljoprivrede, ovo je slučaj samo za mehaničku frakciju sitnog peska.

U drugom sloju zemljišta, aktivnost  $^{137}\text{Cs}$  je pokazala veoma jaku korelaciju sa svim fizičkim osobinama tla, osim sa sadržajem sitnog peska, u oba poljoprivredna koncepta, ali samo prve sezone uzorkovanja, dok od hemijskih parametara, sa sadržajem karbonata u organskom konceptu, a u održivom sa svim, osim sa sadržajem humusa.

Dobijene koreliranosti ukazuju na to da fizičko–hemijske karakteristike zemljišta imaju uticaj na ponašanje antropogenih radionuklida  $^{90}\text{Sr}$  i  $^{137}\text{Cs}$  u terestričkom ekosistemu.

## 4. Zaključak

Na osnovu prikazanih rezultata istraživanja, može se zaključiti da dominantan uticaj na ponašanje radionuklida  $^{90}\text{Sr}$  i  $^{137}\text{Cs}$  u zemljišnim profilima dva poljoprivredna koncepta, imaju mehanički sastav zemljišta (relativni odnos mehaničkih frakcija) i sadržaj humusa. Ovim su potvrđeni literaturni podaci da huminske materije u glinovitom zemljištu olakšavaju interakcije između rastvorljivih oblika antropogenih radionuklida i čestica zemljišta, što omogućava njihovu pokretljivost u terestričkim ekosistemima.

## 5. Zahvalnica

Istraživanje je finansirano od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije, na osnovu Aneks ugovora, čiji je evidencioni broj: 451-03-9/2021-14/200017.

## 6. Literatura

- [1] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), *Sources and effects of ionizing radiation*, UNSCEAR 2008, Report to the General Assembly with Scientific Annexes, United Nations, New York, 2010.
- [2] G. K. Pantelić, M. M. Janković, J. D. Krneta Nikolić, D. J. Todorović, M. M. Rajačić, N. B. Sarap, *Akcidenti i monitoring radioaktivnosti*, U: Černobilj 30 godina posle, Ur. G. Pantelić, Institut za nuklearne nauke „Vinča” i Društvo za zaštitu od zračenja Srbije i Crne Gore, 2016, 19-42.
- [3] I. Friberg. Development and application of a method for the determination of  $^{90}\text{Sr}$  in environmental samples. *J. Radioanal. Nucl. Ch.* 226, 1997, 55-60.
- [4] Lj. J. Janković-Mandić, R. M. Dragović, M. M. Đorđević, M. B. Đolić, A. E. Onjia, S. D. Dragović, G. G. Bačić. Prostorna varijabilnost  $^{137}\text{Cs}$  u zemljištu Beograda (Srbija). *Hem. Ind.* 68, 2014, 449-455.
- [5] C. Landstetter, G. Wallner. Determination of strontium-90 in deer bones by liquid scintillation spectrometry after separation on Sr-specific ion exchange columns. *J. Environ. Radioactiv.* 87, 2006, 315-324.
- [6] R. L. Kathren, *Radioactivity in the Environment: Sources, Distribution and Surveillance*, Harwood Academic Publishers, Amsterdam, 1984.
- [7] B. Gajić, *Fizika zemljišta*, Univerzitet u Beogradu, Poljoprivredni fakultet, Beograd, 2006.
- [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] S. Dragovic, B. Gajic, R. Dragovic, L. Jankovic-Mandic, L. Slavkovic-Beskoski, N. Mihailovic, M. Momcilovic, M. Cujic. Edaphic factors affecting the vertical distribution of radionuclides in the different soil types of Belgrade, Serbia. *J. Environ. Monit.* 14, 2012, 127-137.
- [10] F. A. Vega, E. F. Covelo, M. L. Andrade, P. Marcet. Relationships between heavy metals content and soil properties in minesoils. *Anal. Chim. Acta* 524, 2004, 141-150.



**EFFECTS OF SOIL PROPERTIES OF DIFFERENT AGRICULTURAL CONCEPTS TO MIGRATION OF THE ARTIFICIAL RADIONUCLIDES**

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

*University of Belgrade, Vinča Institute of Nuclear Sciences, Institute of National Importance for the Republic of Serbia, 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), [beba@vinca.rs](mailto:beba@vinca.rs), [vukanac@vinca.rs](mailto:vukanac@vinca.rs),  
[pantelic@vinca.rs](mailto:pantelic@vinca.rs)*

**ABSTRACT**

The research included by this study presents the effects of soil properties of different agricultural concepts to the migration of anthropogenic radionuclides,  $^{90}\text{Sr}$  and  $^{137}\text{Cs}$ . For the purposes of this paper, sampling of agricultural soil at two depths on the territory of the city of Belgrade during 2014 was performed. The physico-chemical properties of investigated soil, as well as the specific activities of the mentioned radionuclides were determined. The radiochemical analytical method was used to determine the  $^{90}\text{Sr}$  content, while the specific activity of  $^{137}\text{Cs}$  was determined using the gamma spectrometric method. Examination of the effects of soil properties on the migration of anthropogenic radionuclides  $^{90}\text{Sr}$  and  $^{137}\text{Cs}$ , based on the analyzed soil samples, was performed by statistical methods of analysis. By applying linear correlation analysis, the dominant physico-chemical parameters that affect the migration of  $^{90}\text{Sr}$  and  $^{137}\text{Cs}$  in agricultural soil were determined.

KORELACIONE KARAKTERISTIKE SPECIFIČNE AKTIVNOSTI  
BERILIJUMA-7 U VAZDUHU I TEMPERATURE NA DUGOGODIŠNIM  
NIZOVIMA NEDELJNIH VREDNOSTI

Dorđe STRATIMIROVIĆ<sup>1</sup>, Darko SARVAN<sup>2</sup>,  
Erika BRATTICH<sup>3</sup>, Miguel Ángel HERNÁNDEZ CEBALLOS<sup>4</sup>,  
Vladimir DJURDJEVIĆ<sup>5</sup> i Jelena AJTIĆ<sup>2</sup>

- 1) Univerzitet u Beogradu, Stomatološki fakultet, Beograd, Srbija, [dj.stratimirovic@stomf.bg.ac.rs](mailto:dj.stratimirovic@stomf.bg.ac.rs)
- 2) Univerzitet u Beogradu, Fakultet veterinarske medicine, Beograd, Srbija, [darko.sarvan@vet.bg.ac.rs](mailto:darko.sarvan@vet.bg.ac.rs), [jelena.ajtic@vet.bg.ac.rs](mailto:jelena.ajtic@vet.bg.ac.rs)
- 3) Alma Mater Studiorum University of Bologna, Department of Physics and Astronomy, Bolonja, Italija, [erika.brattich@unibo.it](mailto:erika.brattich@unibo.it)
- 4) University of Cordoba, Department of Physics, Kordoba, Španija, [f92hecem@uco.es](mailto:f92hecem@uco.es)
- 5) Univerzitet u Beogradu, Fizički fakultet, Beograd, Srbija, [vdj@ff.bg.ac.rs](mailto:vdj@ff.bg.ac.rs)

SADRŽAJ

U ovom radu razmatramo vremenske serije srednjih nedeljnih specifičnih aktivnosti berilijuma-7 u vazduhu i temperature na lokaciji Beč (48,22 °N; 16,35 °E; 193 m n.v.) u Austriji, koje su zabeležene od februara 1987. do decembra 2014. godine. Merenja specifične aktivnosti berilijuma-7 u prizmenom sloju vazduha preuzeta su iz Radioactivity Environmental Monitoring databank (REMdb) koju održava Objedinjeni istraživački centar u Ispri, Italija, a podaci za lokalnu temperaturu iz E-OBS gridovane klimatologije (verzija 15) koji su potom bilinearnom interpolacijom ekstrahovani na lokaciju uzorkovanja berilijuma-7. Za analizu serija koristili smo korelacionu analizu i vejtlet transformacije. Vrednost Pirsonovog koeficijenta korelacije od 0,68 ukazuje na jaku vezu između nedeljnih specifičnih aktivnosti berilijuma-7 i temperature, dok vejtlet spektri snage pokazuju izraziti godišnji period za obe varijable tokom ispitivanog vremenskog intervala. Godišnji period dominantno je vidljiv i na kros-korelacionom spektru. Takođe je uočen blagi fazni pomeraj koji ukazuje da promena specifične aktivnosti berilijuma-7 merene u prizemnom sloju vazduha prethodi promeni temperature.

1. Uvod

Berilijum-7 (Be-7) smatra se obeleživačem kretanja vazdušnih masa. Ovaj radionuklid (period poluraspada 53,28 dana) stvara se u reakcijama kosmičkog zračenja i lakih elemenata u stratosferi i višim slojevima troposfere [1]. Posle formiranja, vezuje za aerosole [2] i sa vazdušnim masama spušta do površine zemlje. Osim radioaktivnog raspada, iz atmosfere se uklanja suvom i vlažnom depozicijom [3]. Stoga je specifična aktivnost Be-7 u prizmenom sloju vazduha dobar pokazatelj procesa koji se odvijaju u atmosferi [4].

Berilijum-7 je gama emiter, te se može identifikovati standardnom gama spektrometrijom u uzorcima aerosola. U mnogim zemljama njegova specifična aktivnost u prizemnom sloju vazduha meri se u sklopu programa praćenja radioaktivnosti u životnoj sredini [5]. U ovom radu korišćen je dugogodišnji niz nedeljnih merenja u Beču, u Austriji, kako bi se analizirale zajedničke osobenosti specifične aktivnosti Be-7 u prizemnom sloju vazduha i temperature.

## 2. Materijal i metode

Izmerene vrednosti specifične aktivnosti Be-7 preuzete su iz baze podataka Monitoring radioaktivnosti u životnoj sredini (na engleskom „Radioactivity Environmental Monitoring databank”, REMdb) koju održava Institut za transuranijske elemente Objedinjenog istraživačkog centra u Ispri, Italija. Baza predstavlja skup višegodišnjih merenja specifične aktivnosti Be-7 u prizemnom sloju vazduha koja se sprovede na 34 lokacije širom Evrope [5].

Jedna od navedenih lokacija je Beč (48,22 °N; 16,35 °E; 193 m n.v.) u Austriji. U REMdb, za ovu lokaciju dostupna su merenja specifične aktivnosti Be-7 od februara 1987. do decembra 2014. godine. Uzorkovanje je vršeno u nedeljnom režimu, tako da ukupan broj podataka iznosi 1444 tokom ovih 28 ispitivanih godina.

Temperaturski podaci preuzeti su iz E-OBS gridovane klimatologije, verzija 15, koja sadrži podatke od 1950. godine [6,7]. Srednja dnevna temperatura izračunata je bilinearnom interpolacijom sa E-OBS mreže pravilno raspoređenih tačaka horizontalne rezolucije 0,25 °. Dnevne vrednosti temperature zatim su usrednjene na nedeljne vrednosti kako bi se za lokaciju Beč dobio niz sa istim vremenskim intervalom kao u nizu izmerene specifične aktivnosti Be-7.

Za ovako dobijene vremenske serije, izračunat je Pirsonov koeficijent korelacije, a potom je urađena vejljet analiza za određivanje vremensko-spektralnih karakteristika vremenskih serija i njihove koherencije (međusobne korelacione karakteristike aktivnosti Be-7 i srednje temperature) pomoću WaveletComp paketa otvorenog koda za vejljet analizu u R programskom okruženju [8].

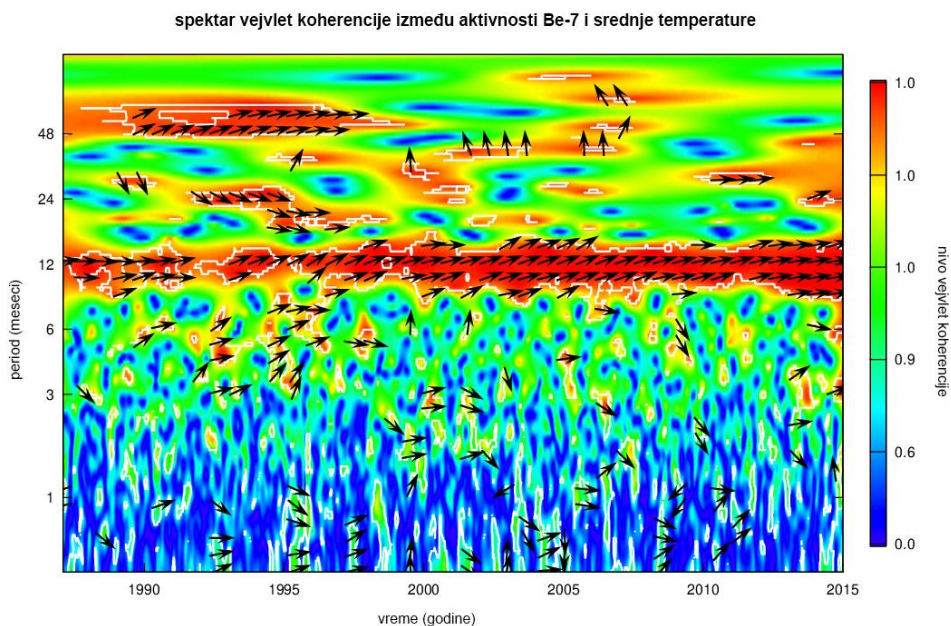
## 3. Rezultati i diskusija

Dobijeni Pirsonov koeficijent korelacije od 0,68 ukazuje da promene u nedeljnim vrednostima specifičnih aktivnosti Be-7 i temperature na lokaciji Beč, imaju zajedničke karakteristike, što je u saglasnosti sa rezultatima ranijih studija [9,10].

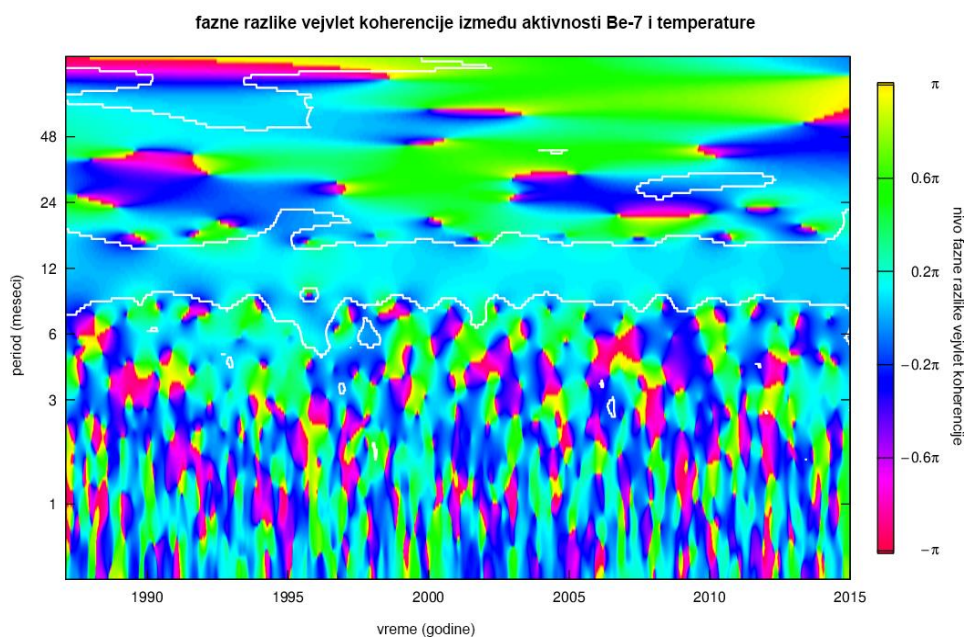
Ove zajedničke karakteristike mogu se videti i na spektru vejljet koherencije prikazanom na slici 1. Konkretno, uočava se izražen nivo korelacije sa karakterističnim periodom od 12 meseci. Na ovom godišnjem karakterističnom periodu, specifična aktivnost Be-7 i srednja nedeljna temperatura imaju pozitivnu korelisanost, ali su fazno pomerene. Fazna razlika (data strelicama na slici 1) na godišnjem periodu ukazuje da promena specifične aktivnosti Be-7 prethodi promeni srednje temperature, pri čemu je fazna razlika između jednog i dva meseca (slika 2).

Interesantno je uočiti da fazna razlika između specifične aktivnosti Be-7 i temperature nije konstantna tokom 1987–2014 (slika 1). Naime, do oko 1992. godine, a zatim posle 2013, fazna razlika manja je nego u ostatku ispitivanog perioda.

Dalje, pored dominantnog godišnjeg, mogu se uočiti i drugi periodi na kojima specifična aktivnost Be-7 i temperatura imaju visok nivo korelacije. Na primer, između 1989. i 1996. godine, izražena su još dva karakteristična vremena: od 18–24 meseca, i od 48 meseci. Iako su ovi periodi u ponašanju specifične aktivnosti Be-7 ranije detektovani [11,12], njihovo prisustvo, odnosno odsustvo, u pojedinim godinama nije zabeleženo.



**Slika 1. Spektar vejvlet koherencije specifične aktivnosti Be-7 u prizemnom sloju vazduha i srednje nedeljne temperature u Beču, Austrija, tokom 1987–2014. Strelicama su označene fazne razlike.**



**Slika 2. Fazna razlika vejvlet koherencije između specifične aktivnosti Be-7 u prizemnom sloju vazduha i srednje nedeljne temperature u Beču, Austrija, tokom 1987–2014.**

#### 4. Zaključak

Rezultati analize korelacija između specifične aktivnosti Be-7 u prizemnom sloju atmosfere i srednje nedeljne temperature potvrđuju da je temperatura među faktorima sa kojima je specifična aktivnost Be-7 povezana. Obe varijable imaju dominantni karakteristični period promene od 12 meseci i na toj vremenskoj skali, promena specifične aktivnosti Be-7 prethodi promeni temperature za jedan do dva meseca.

Dalja analiza nivoa vejevlet koherencije mogla bi dati dodatne informacije o povezanosti specifične aktivnosti Be-7 i temperature na drugim, manje dominantnim karakterističnim periodima i u različitim vremenskim intervalima. Buduće analize takođe bi mogle biti urađene za druge lokacije na kojima su dostupni višegodišnji nizovi specifične aktivnosti Be-7 u prizemnom sloju vazduha.

### 5. Zahvalnica

Rad je podržan sredstvima Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije (Ugovori broj 451-03-9/2021-14/200143, 451-03-9/2021-14/200129 i 451-03-9/2021-14/200162).

### 6. Literatura

- [1] D. Lal, B. Peters. Cosmic ray produced radioactivity on the earth. *Handb. Phys.* 46, 1967, 551–612.
- [2] 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.
- [3] A. Ioannidou, C. Papastefanou. Precipitation scavenging of  $^7\text{Be}$  and  $^{137}\text{Cs}$  radionuclides in air. *J. Environ. Radioact.* 85, 2006, 121–136.
- [4] E. F. Danielsen. Stratospheric-tropospheric exchange based on radioactivity, ozone and potential vorticity. *J. Atmos. Sci.* 25, 1968, 502–518.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] A. Roesch, H. Schmidbauer. WaveletComp: Computational Wavelet Analysis. R package version 1.1. 2018. <https://CRAN.R-project.org/package=WaveletComp>
- [9] 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.
- [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] E. Gerasopoulos, C. Zerefos, C. Papastefanou, P. Zanis, K. O'Brien. Low-frequency variability of beryllium-7 surface concentrations over the eastern Mediterranean. *Atmos. Environ.* 37, 2003, 1745–1756.
- [12] D. Sarvan, Đ. Stratimirović, S. Blesić, V. Djurdjevic, V. Miljković, J. Ajtić. Dynamics of beryllium-7 specific activity in relation to meteorological variables, tropopause height, teleconnection indices and sunspot number. *Physica A* 469, 2017, 813–823.

**CORRELATION CHARACTERISTICS OF THE BERYLLIUM-7 SPECIFIC  
ACTIVITY IN THE AIR AND TEMPERATURE FROM LONG-TERM SERIES  
OF WEEKLY MEANS**

**Đorđe STRATIMIROVIĆ<sup>1</sup>, Darko SARVAN<sup>2</sup>,  
Erika BRATTICH<sup>3</sup>, Miguel Ángel HERNÁNDEZ CEBALLOS<sup>4</sup>,  
Vladimir DJURDJEVIĆ<sup>5</sup> and Jelena AJTIĆ<sup>2</sup>**

- 1) *Belgrade University, Faculty of Dental Medicine, Belgrade, Serbia, [dj.stratimirovic@stomf.bg.ac.rs](mailto:dj.stratimirovic@stomf.bg.ac.rs)*
- 2) *Belgrade University, Faculty of Veterinary Medicine, Belgrade, Serbia, [darko.sarvan@vet.bg.ac.rs](mailto:darko.sarvan@vet.bg.ac.rs), [jelena.ajtic@vet.bg.ac.rs](mailto:jelena.ajtic@vet.bg.ac.rs)*
- 3) *Alma Mater Studiorum University of Bologna, Department of Physics and Astronomy, Bologna, Italy, [erika.brattich@unibo.it](mailto:erika.brattich@unibo.it)*
- 4) *University of Cordoba, Department of Physics, Cordoba, Spain, [f92hecem@uco.es](mailto:f92hecem@uco.es)*
- 5) *Belgrade University, Faculty of Physics, Belgrade, Serbia, [vdj@ff.bg.ac.rs](mailto:vdj@ff.bg.ac.rs)*

**ABSTRACT**

This paper investigates the time series of the beryllium-7 specific activity in the surface air and temperature recorded in Vienna (48.22 °N; 16.35 °E; 193 m a.s.l.), Austria. The measurements span 28 years, between February 1987 and December 2014. The beryllium-7 specific activities were obtained from the Radioactivity Environmental Monitoring databank (REMdb) that is supported by the Joint Research Centre (JRC) in Ispra, Italy. The local temperature records were taken from the E-OBS gridded climatology (version 15) and then bilinearly interpolated onto the beryllium-7 sampling location. We used Pearson's correlation analysis and wavelet transform to investigate the time series. The value of the Pearson's correlation coefficient of 0.68 implies a strong link between the weekly beryllium-7 specific activities and temperature. The wavelet spectra further show a pronounced annual period in both series. This period is also dominant in the cross-correlation spectrum. In addition, we note a slight phase shift implying that a change in the beryllium-7 specific activity in the surface air precedes a change in temperature.

## RADIOAKTIVNOST OKOLINE U PROCESU ISKOPAVANJA BUNARA - SELO POGANOVO

**Dragana TODOROVIĆ, Milica RAJAČIĆ, Jelena KRNETA NIKOLIĆ, Marija JANKOVIĆ, Ivana VUKANAC, Gordana PANTELIĆ i Nataša SARAP**  
*Univerzitet u Beogradu, Institut za nuklearne nauke "Vinča", Institut od nacionalnog značaja za Republiku Srbiju, Laboratorija za zaštitu od zračenja i zaštitu životne sredine, Beograd, Srbija, [beba@vinca.rs](mailto:beba@vinca.rs), [milica100@vinca.rs](mailto:milica100@vinca.rs), [jnikolic@vinca.rs](mailto:jnikolic@vinca.rs), [marijam@vinca.rs](mailto:marijam@vinca.rs), [vukanac@vinca.rs](mailto:vukanac@vinca.rs), [pantelic@vinca.rs](mailto:pantelic@vinca.rs), [natasas@vinca.rs](mailto:natasas@vinca.rs)*

### SADRŽAJ

*Rezultati merenja radioaktivnosti zemljišta, mulja i vode u procesu iskopavanja bunara do maksimalne dubine od 13,5 m u selu Poganovu, u opštini Dimitrovgrad, prikazani su u ovom radu. Uzorci mulja i zemljišta, analizirani su spektrometrijom gama emitera i određivanjem sadržaja  $^{90}\text{Sr}$ . U slučaju uzorka vode, određena je ukupna alfa i ukupna beta aktivnost, i koncentracija radionuklida gama emitera.*

*Pored navedenih uzoraka, sa iste lokacije su mereni i uzorci mahovina i lišajeva. Osim u uzorku mahovine i zemljišta sa dubine 0-10 cm u kojima je detektovano prisustvo  $^{137}\text{Cs}$  u veoma niskim koncentracijama za ovu vrstu uzoraka, ni u jednom uzorku nije detektovano prisustvo proizvedenih radionuklida,  $^{137}\text{Cs}$  i  $^{90}\text{Sr}$ . U slučaju prirodnih radionuklida, dobijene vrednosti koncentracija, karakteristične su za ovakve vrste uzoraka i ne razlikuju se u odnosu na druge lokacije na našim prostorima. Svi rezultati merenja ukazuju na to da se ova lokacija može koristiti kao nulta tačka monitoringa radioaktivnosti na našim prostorima.*

### 1. Uvod

Selo Poganovo nalazi se u opštini Dimitrovgrad i udaljeno je podjednako 27 km od Pirot, kao i od Dimitrovgrada, koji pripada Pirotskom upravnom okrugu. Prema popisu iz 2011. godine u selu je živeo 31 stanovnik [1]. Ovaj deo Srbije je industrijski nerazvijen. Opština Dimitrovgrad, izgradnjom industrijske zone, pokušava zadnjih godina da privuče strane investitore, dok je u opštini Pirot razvijena gumarska i tekstilna industrija.

U samom selu, nije razvijena poljoprivreda. Starosna struktura stanovnika sela, je takva, da u njemu žive uglavnom penzioneri i mali broj radno sposobnog stanovništva, koji se uglavnom bave etno turizmom, odnosno postoje tri etno konaka. Za svoje potrebe, stanovnici sela, imaju bašte i manje plastenike, kao i voćnjake. U selu nema veće poljoprivredne proizvodnje koja koristi savremene agrotehničke mere i koja bi mogla da utiče na povećanje prirodne radioaktivnosti okoline Takođe, ni stočarstvo nije zastupljeno, odnosno domaćinstva uglavnom gaje životinje za svoje potrebe, a ne u komercijalne svrhe.

U okolini sela nalazi se kanjon reke Jerme, koja je najveća i vodom najbogatija leva pritoka Nišave, ali u samom selu nema vodovodne mreže, tako da je snabdevanje vodom iz bunara. Inače, reka Jerma pripada specijalnom rezervatu prirode Jerma i sve do 1927. godine, kanjon ove reke je bio neprohodan, tako da okolina sela Poganovo, nije bila izložena ljudskim aktivnostima.

Ovaj kraj je takođe poznat i po manastiru Poganovo koji je podignut 1395 i koji se od 1979. godine nalazi na listi svetske kulturne baštine.

Ako pogledamo samo selo Poganovo i njegovo okruženje, slobodno možemo reći da imamo „nacionalni park u malom“, odnosno jednu oazu netaknute prirode.

U literaturi se ne mogu naći podaci o radioaktivnosti ovog kraja, tako da se može smatrati da su ovo prva ispitivanja radioaktivnosti životne sredine date lokacije. Izabrano je jedno porodično domaćinstvo, čiji članovi ne žive kontinualno u selu i ne bave se poljoprivredom, odnosno kuću koriste kao letnjikovac, a snabdevanje vodom je iz rezervoara. Kako je angažovana mehanizacija za pronalaženje vodenih tokova, analizirani su uzorci koji su uzeti u samom procesu iskopavanja, kao i pre početka radova.

### 2. Materijal i metode

Na slici 1, prikazana je lokacija sela na geografskoj mapi. Manji deo sela je na ravnom platou, dok je veći deo na blagoj strmini brda. Okolinu sela čine brda pod šumom, a takođe ima dosta i ravnice. Samo selo je podeljeno na dva dela Poganovskom rekom.

Predmet ispitivanja su uzorci zemljišta, mulja, vode, mahovina i lišaja, ukupno 8 uzoraka koji su uzeti u selu Poganovo na lokaciji privatnog domaćinstva. Geografske koordinate lokacije uzorkovanja su: N 42°58'34" i E 22°39'28". Na slici 2, prikazan je deo procesa uzorkovanja, koje je obavljeno 2020. godine, i koji se sastoji od raščišćavanja terena (otklanjanje šiblja, košenje trave), postavljanja mašine za bušenje sa adekvatnim svrdlom, bušenja i ispušavanja vode. Dubina bušenja bila je do 13,5 m, gde je i pronađen prvi vodeni tok. Analiza uzoraka je obuhvatila: spektrometriju gama emitera svih uzoraka, merenje ukupne alfa i ukupne beta aktivnosti uzoraka vode, kao i određivanje sadržaja  $^{90}\text{Sr}$  u uzorcima mulja i mešavini mulja i gline.

Uzorci zemljišta i mulja se suše na 105 °C, prosejavaju i odmeravaju u odgovarajuću geometriju merenja za gamaspektrometrijsku analizu, dok se za analizu sadržaja  $^{90}\text{Sr}$  dodatno mineralizuju na 500 °C. U slučaju uzoraka mahovina i lišaja, dati uzorci se direktno odmeravaju u marineli geometriju, bez posebne pripreme. Priprema uzoraka vode obuhvata uparavanje određene količine vode do suvog ostatka i mineralizaciju na 450 °C. Radi uspostavljanja radioaktivne ravnoteže svi pripremljeni uzorci se zatapaju pčelinjim voskom i čuvaju 30 dana, pre merenja [2].

Spektrometrija gama emitera urađena je na poluprovodničkim germanijumskim detektorima visoke čistoće (HPGe) relativnih efikasnosti 18 % i 50 %, firme CANBERRA. Rezulucija detektora je 1,8 keV na energiji od 1332 keV. Kalibracija detektora za merenje uzoraka zemljišta i mulja, urađena je sertifikovanim radioaktivnim standardom, matriksa silikonske smole, Czech Metrology Institute, Praha, 1035-SE-40845-17, ukupne aktivnosti 80,63 kBq na dan 22.12.2017. godine ( $^{241}\text{Am}$ ,  $^{109}\text{Cd}$ ,  $^{139}\text{Ce}$ ,  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{85}\text{Sr}$ ,  $^{88}\text{Y}$ ,  $^{51}\text{Cr}$ ,  $^{113}\text{Sn}$ ). Kod ispitivanja uzoraka mahovina, lišaja i vode za kalibraciju detektora korišćeni su referentni radioaktivni materijali u geometriji marineli posude i plastične kutije od 125 cm<sup>3</sup>, koji su dobijeni od sertifikovanog radioaktivnog rastvora, Czech Metrology Institute, Praha, 1035-SE-40844-17, type ERX, ukupne aktivnosti 79,89 kBq na dan 22.12.2017. godine ( $^{241}\text{Am}$ ,  $^{109}\text{Cd}$ ,  $^{139}\text{Ce}$ ,  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{85}\text{Sr}$ ,  $^{88}\text{Y}$ ,  $^{51}\text{Cr}$ ).

Ukupna alfa i ukupna beta aktivnost uzorka vode, urađena je na niskofonskom proporcionalnom  $\alpha/\beta$  brojaču Thermo Eberline ESM, efikasnosti 26 % za alfa emitere i 35 % za beta emitere [3]. Kalibracija detektora za merenje alfa i beta aktivnosti, urađena je korišćenjem standardnih kalibracionih izvora  $^{241}\text{Am}$  (EM445, Czech Metrology Institute, Praha) sa aktivnošću 224,0 Bq na dan 01.08.2011. godine i  $^{90}\text{Sr}$  (EM145, Czech Metrology Institute, Praha) sa aktivnošću 189,4 Bq na dan 01.08.2011. godine.

Radiohemijska analitička metoda određivanja  $^{90}\text{Sr}$ , zasniva se na oksalatnom izdvajanju Ca i Sr, žarenju do oksida i korišćenju aluminijum-hidroksida kao nosača za  $^{90}\text{Y}$ . Ravnoteža između  $^{90}\text{Sr}$  i  $^{90}\text{Y}$  se uspostavlja za 18 dana, nakon čega se  $^{90}\text{Y}$  izdvaja na



nosaču aluminijum-hidroksida, koji se zatim žari do oksida i meri na niskofonskom proporcionalnom  $\alpha/\beta$  brojaču [4].

Svi 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 %.



Slika 1. Mapa regiona.



a)

b)

Slika 2. Uzorkovanje vode u selu Poganovo, prilikom bušenja bunara i pronalaženja vode: a) bušenje, b) ispumpavanje vode.

### 3. Rezultati merenja i diskusija

U tabeli 1, dati su rezultati merenja u okviru svih analiza. Proizvedeni radionuklid  $^{137}\text{Cs}$  čije je prisustvo posledica nuklearnog akcidenta u Černobilju, detektovan je samo u uzorku zemljišta na dubini 0–10 cm i u uzorku mahovine, dok je u ostalim uzorcima ispod granice detekcije. Dobijene vrednosti koncentracije ovog radionuklida su niske, što ukazuje da je kontaminacija ovim radionuklidom na ispitivanoj lokaciji zanemarljiva. Lišaj kao i mahovina, spadaju u grupu bioindikatora za zagađenje životne sredine,  $^{137}\text{Cs}$ , jer dobro apsorbuju i koncentrišu ovaj radionuklid u svom telu. Međutim u uzorku lišaja koji je uzet sa drveta na lokaciji, nije detektovano prisustvo  $^{137}\text{Cs}$ , odnosno ovaj radionuklid je samo detektovan u uzorku mahovina sa niskim vrednostima koncentracije.

Takođe, i drugi proizvedeni radionuklid  $^{90}\text{Sr}$ , nije detektovan u uzorku mulja i mešavini mulja i gline, odnosno njegova vrednost koncentracije je ispod granice detekcije.

Na osnovu dobijenih rezultata merenja, možemo pretpostaviti da je nakon Černobiljskog akcidenta došlo do površinske kontaminacije ali da potom nije bilo migracije proizvedenih radionuklida u dublje slojeve zemljišta.

Vrednosti koncentracija prirodnih radionuklida, koje su detektovane u uzorcima zemljišta, mulja i vode su u intervalu od 11 Bq/kg do 34 Bq/kg za  $^{226}\text{Ra}$ , od 31 Bq/kg do 44 Bq/kg za  $^{232}\text{Th}$ , od 460 Bq/kg do 660 Bq/kg za  $^{40}\text{K}$ , od 23 Bq/kg do 46 Bq/kg za  $^{238}\text{U}$  i od 0,9 Bq/kg do 3,1 Bq/kg za  $^{235}\text{U}$ . Dobijene vrednosti koncentracija prirodnih radionuklida, karakteristične su za ove vrste uzoraka i ne razlikuju se od drugih lokacija na našim prostorima [5, 6].

Rezultati merenja ukupne alfa i ukupne beta aktivnosti u uzorku vode, karakteristične su za ovu vrstu uzorka i u skladu su sa Pravilnikom [7], tako da se analizirana voda može koristiti kao voda za piće.

**Tabela 1. Specifične aktivnosti ispitivanih radionuklida i ukupna alfa i beta aktivnost u uzorcima mahovine, lišaja, zemljišta, mulja i vode [Bq/kg].**

Vrsta uzorka / Radionuklid	Mahovina	Lišaj	Zemljište sa dubine 0–10 cm	Zemljište sa dubine 1,5 m	Mešavina mulja i gline sa dubine 12,5 m	Mulj sa dubine 13,5 m	Mulj iz vode koja je uzeta sa 13,5 m	Voda sa dubine 13,5 m
$^{226}\text{Ra}$	< 10	26±6	25±1	11±1	32±2	26±1	34±2	< 0,06
$^{232}\text{Th}$	< 10	< 20	31±2	31±4	36±3	31±2	40±3	< 0,01
$^{40}\text{K}$	160±30	130±40	520±30	460±40	500±30	470±30	660±40	0,26±0,06
$^{238}\text{U}$	< 40	< 90	23±4	37±9	46±5	33±4	30±10	< 0,1
$^{235}\text{U}$	< 2	< 5	0,9±0,1	2,1±0,5	2,8±0,2	2,4±0,2	3,1±0,3	< 0,007
$^{210}\text{Pb}$	440±40	260±40	33±4	22±7	28±4	26±4	37±19	< 0,1
$^{137}\text{Cs}$	6±2	< 5	2,1±0,3	< 0,3	< 0,07	< 0,06	< 0,2	< 0,002
$^7\text{Be}$	100±20	250±50	/	/	/	/	/	/
Ukupna alfa aktivnost	/	/	/	/	/	/	/	0,09±0,02
Ukupna beta aktivnost	/	/	/	/	/	/	/	0,26±0,04
$^{90}\text{Sr}$	/	/	/	/	< 0,5	< 0,5	/	/

### 4. Zaključak

Rezultati prvih ispitivanja radioaktivnosti zemljišta, mulja, vode, mahovina i lišaja na lokaciji privatnog domaćinstva u selu Poganovo, opština Dimitrovgrad, prikazani su u ovom radu. Izmerene vrednosti koncentracija detektovanih prirodnih radionuklida, ne razlikuju se u odnosu na druge lokacije na našim prostorima. U slučaju proizvedenih radionuklida,  $^{137}\text{Cs}$  i  $^{90}\text{Sr}$ , dobijene vrednosti koncentracija su ispod granice detekcije u uzorcima zemljišta, mulja i vode, dok su koncentracije  $^{137}\text{Cs}$  u uzorcima mahovine i zemljišta koje je uzeto na dubini 0–10 cm, niske. Stoga se ova lokacija može iskoristi kao nulta tačka za monitoring radioaktivnosti okoline na našim prostorima.

Data istraživanja će se nastaviti, proširivanjem mesta uzorkovanja u okviru sela i u specijalnom rezervatu prirode Jerma.

### 5. Zahvalnica

Istraživanje je finansirano od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije na osnovu Aneksa ugovora, čiji je evidencioni broj: 451-03-9/2021-14/200017.

### 6. Literatura

- [1] Popis stanovništva, domaćinstva i stanova u Republici Srbiji 2011, Prvi rezultati, Republički zavod za statistiku, Republika Srbija, Beograd 2011, <http://media.popis2011.stat.rs/2011/prvi-rezultati.pdf>
- [2] Measurements of Radionuclides in Food and Environment, Method for Determining Gamma Emitters, IAEA Technical Reports Series No. 295, Vienna, 1989.
- [3] Prescribed Procedures for Measurement of Radioactivity in Drinking Water, Method 900.0, EPA-600/4-80-032, 1980.
- [4] R. Brnović, *Stroncijum 90 u životnoj sredini čoveka*. Magistarski rad, Beograd, 1972.
- [5] Elaborat: Izveštaj o realizaciji Sistematskom ispitivanju sadržaja radionuklida u zemljištu u Republici Srbiji za 2014.godinu, Agencija za zaštitu od jonizujućih zračenja i nuklearnu sigurnost Srbije, Beograd, 2014.
- [6] Elaborat: Izveštaj o realizaciji Sistematskom ispitivanju sadržaja radionuklida u zemljištu u Republici Srbiji za 2018.godinu, Direktorat za radijacionu i nuklearnu sigurnost i bezbednost Srbije, Beograd, 2018.
- [7] 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.godine)

**RADIOACTIVITY OF THE ENVIRONMENT IN THE PROCESS OF  
EXCAVATION OF WELLS - VILLAGE POGANOVO**

**Dragana TODORVIĆ, Milica RAJAČIĆ, Jelena KRNETA NIKOLIĆ,  
Marija JANKOVIĆ, Ivana VUKANAC, Gordana PANTELIĆ and Nataša SARAP**  
*University of Belgrade, Institute of Nuclear Sciences "Vinča", National Institute of the  
Republic of Serbia, Radiation and Environmental Protection Department, Belgrade,  
Serbia, [beba@vinca.rs](mailto:beba@vinca.rs), [milica100@vinca.rs](mailto:milica100@vinca.rs), [jnikolic@vinca.rs](mailto:jnikolic@vinca.rs), [marijam@vinca.rs](mailto:marijam@vinca.rs),  
[vukanac@vinca.rs](mailto:vukanac@vinca.rs), [pantelic@vinca.rs](mailto:pantelic@vinca.rs), [natasas@vinca.rs](mailto:natasas@vinca.rs)*

**ABSTRACT**

The results of radioactivity measurements in the soil, sludge and water samples in the process of finding water and digging wells to a maximum depth of 13.5 m, in the village of Poganovo, in the municipality of Dimitrovgrad, are presented in this paper. Sludge and soil samples were analyzed by gamma-ray spectrometry and  $^{90}\text{Sr}$  measurements. In the case of water samples, gross alpha and gross beta activity, as well as content of radionuclides gamma emitter were determined.

In addition, samples of mosses and lichens from the same location were also measured. Presence of the artificial radionuclides  $^{90}\text{Sr}$  and  $^{137}\text{Cs}$  were not detected in measured samples, with an exception of the sample of moss and soil from a depth of 0-10 cm, where  $^{137}\text{Cs}$  was detected in very low concentrations for this type of samples. In the case of natural radionuclides, the obtained values of concentrations are characteristic of these types of samples and do not differ from other locations in our area. All measurement results indicate that this location can be used as a zero point for monitoring radioactivity in our area.

## ЈАЧИНА АМБИЈЕНТАЛНОГ ДОЗНОГ ЕКВИВАЛЕНТА И КОРЕЛАЦИЈА СА МЕТЕОРОЛОШКИМ ПАРАМЕТРИМА У ГРАДУ ВАЉЕВУ И ОКОЛИНИ

Љиљана ГУЛАН, Милован ЛЕКОВИЋ,  
Душица СПАСИЋ и Биљана ВУЧКОВИЋ

Универзитет у Приштини са привременим седиштем у Косовској Митровици,  
Природно-математички факултет, Лоле Рибара 29, 38220 Косовска Митровица,  
[ljiljana.gulan@pr.ac.rs](mailto:ljiljana.gulan@pr.ac.rs), [milovan.lekovic@gmail.com](mailto:milovan.lekovic@gmail.com), [dusica.spasic@pr.ac.rs](mailto:dusica.spasic@pr.ac.rs),  
[biljana.vuckovic@pr.ac.rs](mailto:biljana.vuckovic@pr.ac.rs)

### САДРЖАЈ

Ради процене стања радиоактивности у животној средини, спроведена су мерења јачине амбијенталног дозног еквивалента у ваздуху на територији града Ваљево и околине. Истраживање је спроведено Гајгер-Милеровим бројачем модел FS2011, у јуну 2021 на 40 локација. Мерења су вршена на земљи и на висини од 1 m у урбаном, руралном и индустријском подручју. Током мерења забележени су параметри температуре, влажности ваздуха и атмосферског притиска на локацијама. Истражена је корелација између мерења амбијенталног дозног еквивалента на различитим висинама, и корелација са метеоролошким параметрима.

### 1. Увод

Позадинско зрачење (природни фон зрачења) које се региструје у нормалним условима, потиче од космичког зрачења, природних и антропогених радионуклида у тлу, ваздуху и површини земље [1]. Карактеристично је за одређено подручје, а зависи од геологије терена и надморске висине. Природни радионуклиди терестричног порекла присутни су у различитом степену у свим медијима животне средине. Ови радионуклиди са полуживотом упоредивим са старошћу Земље, као и њихови производи распада могу допринети изложености становништва. Природно зрачење у тлу и на површини земље потиче од  $^{40}\text{K}$  и радионуклида у нивовима  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  и  $^{232}\text{Th}$ , а антропогено зрачење је присутно након тестова нуклеарног оружја и нуклеарних акцидента. Просечан светски допринос јачини дозе од терестричног зрачења на отвореном процењује се на  $70 \mu\text{Sv/y}$  [2]. Јачина дозе у ваздуху се мења од места до места и током времена, јер разноликост састава земљишта утиче на варијацију дозе више од космичког зрачења [3,4]. Виши нивои позадинског зрачења повезани су са вулканским стенским масама (гранит), а нижи са седиментним стенама [5] и квартарном геолошком подлогом [6]. Због тога је важно и пожељно добити информације о позадинском зрачењу, мерењем јачине апсорбоване дозе гама зрачења или јачине амбијенталног дозног еквивалента где је могуће у животној окружењу. Ово може послужити као корисна база података у случају акцидента.

Метеоролошки услови (температура, ветар, влага, падавине) могу утицати на промену вредности измерене јачине амбијенталног дозног еквивалента у ваздуху. Такође, турбулентно мешање приземног ваздуха и продуката распада радона може изазвати промену јачине амбијенталног дозног еквивалента за 6-17 % [7]. Максимална вредност јачине амбијенталног дозног еквивалента у приземном ваздуху достиже се крајем лета и почетком јесени, због повећане количине падавина и разлика у температури ваздуха и тла.

### 2. Место истраживања и метод мерења

Ваљево се простире на 2.256 ha, на просечној надморској висини од 185 m (терени између 200 и 600 m надморске висине). Геолошку грађу подручја општине Ваљево представљају стене готово свих врста и различите старости, почев од разноврсних седиментних и магматских стена, од девона и средњег тријаса до квартара. Геолошка грађа целог Колубарског округа се може поделити на три геотектонске јединице: динарски палеозојски метаморфити, зона мезозојског комплекса и јадарска област метаморфита и мезозојских претежно карбонатних стена. Значајне су неогене творевине ваљевско-мионичког басена, и кварталне творевине ограниченог распрострањења. Клима ваљевског краја је умерено континентална.

Мерења јачине амбијенталног дозног еквивалента на 40 локација у граду Ваљеву и околини извршена су Гајгер-Милеровим бројачем FS2011 у два дана (19.06. и 20.06.2021.године) у периоду од 12-16 h. Мерења су извршена на 15 локација у урбаном и руралном подручју, и на 10 локација у индустријској зони града Ваљева. На свакој локацији је прво вршено мерење јачине амбијенталног дозног еквивалента у ваздуху на тлу и на висини од 1 m у циклусима од 5 min. Такође, параметри температуре, влажности ваздуха и притиска су преузети са сајта Републичког Хидрометеоролошког Завода Србије и ажурирани у тренуцима мерења за сваку локацију. Два дана пре планираног и извршеног мерења није било падавина у граду Ваљеву и околини.

Детектор јонизујућег зрачења FS2011 има високу ефикасност детекције на енергијама зрачења у распону од  $50 \text{ keV} - 1.5 \text{ MeV} \leq \pm 30 \%$  за  $^{137}\text{Cs}$ , што одговара енергијским пиковима већине терестричних радионуклида. Резолуција показивања уређаја је  $0,01 \mu\text{Sv}$ . Мерна несигурност мерења је  $5,2 \%$ ,  $k=2$ . Мерни опсег јачина дозног еквивалента је од  $0,01$  до  $1000 \mu\text{Sv/h}$ .

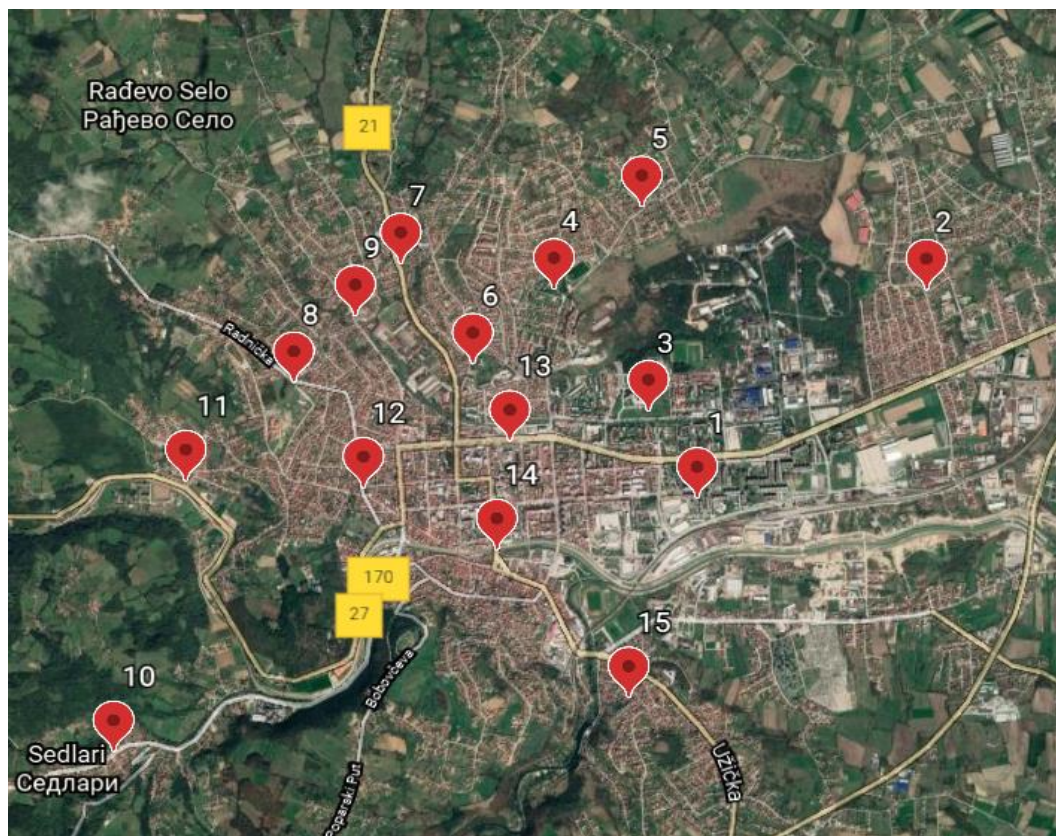
### 3. Резултати и дискусија

На сликама 1-3 приказане су мапе урбаног, руралног и индустријског подручја града Ваљева, респективно, са бројевима локација на којима су извршена мерења јачине амбијенталног дозног еквивалента у ваздуху.

За свако поменуто подручје средње вредности мерења јачине амбијенталног дозног еквивалента у ваздуху су приказане у табелама 1-3, уз актуелне метеоролошке параметре температуре, влажности ваздуха и притиска. У табелама 1-3 дати су опсеги измерених вредности јачине амбијенталног дозног еквивалента у ваздуху. Разлике у измереним вредностима јачине амбијенталног дозног еквивалента су у оквиру мерне несигурности са којом је урађено мерење.

Коефицијенти линеарне корелације јачине амбијенталног дозног еквивалента у ваздуху са метеоролошким параметрима су приказани у табели 4.

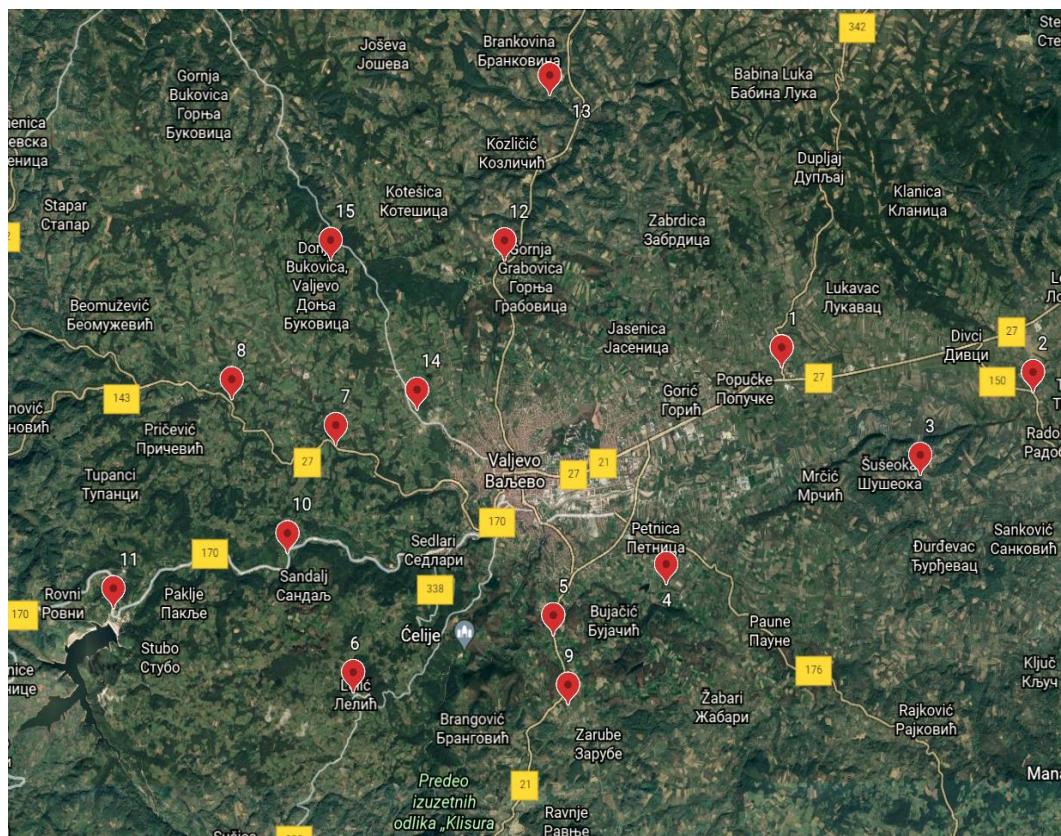
Све добијене вредности линеарне корелације су статистички безначајне: у урбаном подручју града Ваљева коефицијент корелације између вредности јачина амбијенталног дозног еквивалента у ваздуху на површини тла и на 1 m од тла износи  $0,11$ , док су у руралном подручју и индустријској зони града Ваљева коефицијенти корелације између јачина амбијенталног дозног еквивалента у ваздуху на површини тла и на 1 m од тла је  $0,06$  и  $-0,16$ , респективно.



**Слика 1. Мапа са локацијама у урбаној зони града Ваљева.**

**Табела 1. Јачина амбијенталног дозног еквивалента у ваздуху и метеоролошки параметри у урбаном делу града Ваљева.**

Број локације	Јачина амбијенталног дозног еквивалента у ваздуху ( $\mu\text{Sv/h}$ )		Т ( $^{\circ}\text{C}$ )	Влажност ваздуха (%)	Притисак (kPa)
	На тлу	На 1 m од тла			
1.	0,12	0,15	31,8	35	992,8
2.	0,09	0,12	31,2	37	992,5
3.	0,09	0,15	31,8	35	992,8
4.	0,11	0,15	31,7	35	992,7
5.	0,12	0,18	31,8	35	992,7
6.	0,09	0,12	30,8	36	991,4
7.	0,12	0,27	30,9	36	991,4
8.	0,06	0,15	30,8	38	991,4
9.	0,21	0,18	30,6	38	991,5
10.	0,15	0,18	31,1	35	991,4
11.	0,13	0,15	31,3	36	991,2
12.	0,18	0,12	31,3	36	991,4
13.	0,15	0,12	31,1	36	991,5
14.	0,12	0,18	30,9	35	991,5
15.	0,12	0,15	31,2	36	990,3
Опсег	0,06-0,21	0,12-0,27	-	-	-



Слика 2. Мапа са локацијама у руралној зони града Ваљева.

Табела 2. Јачина амбијенталног дозног еквивалента у ваздуху и метеоролошки параметри у руралној зони града Ваљева.

Број локације	Јачина амбијенталног дозног еквивалента у ваздуху ( $\mu\text{Sv/h}$ )		Т ( $^{\circ}\text{C}$ )	Влажност ваздуха (%)	Притисак (kPa)
	На тлу	На 1 m од тла			
1.	0,09	0,3	25,4	62	993,0
2.	0,12	0,06	24	66	992,9
3.	0,15	0,15	23,9	63	992,8
4.	0,03	0,09	26	63	992,4
5.	0,27	0,15	27,1	56	992,1
6.	0,18	0,12	30,5	36	991,6
7.	0,09	0,06	31,3	36	991,2
8.	0,12	0,24	31,4	36	990,0
9.	0,15	0,09	27,1	56	992,1
10.	0,12	0,09	31,1	35	991,4
11.	0,09	0,15	31,1	35	991,2
12.	0,21	0,18	30,9	36	991,4
13.	0,12	0,24	31,1	38	990,9
14.	0,06	0,09	30,7	36	991,4
15.	0,15	0,15	30,7	36	991,3
Опсег	0,03-0,27	0,06-0,3	-	-	-





Слика 3. Мапа са локацијама у индустријској зони града Ваљева.

Табела 3. Јачина амбијенталног дозног еквивалента у ваздуху и метеоролошки параметри у индустријској зони града Ваљева.

Број локације	Јачина амбијенталног дозног еквивалента у ваздуху ( $\mu\text{Sv/h}$ )		Т ( $^{\circ}\text{C}$ )	Влажност ваздуха (%)	Притисак (kPa)
	На тлу	На 1 m од тла			
1.	0,18	0,12	31,8	35	992,8
2.	0,19	0,15	31,8	35	992,7
3.	0,09	0,12	31,2	37	992,5
4.	0,1	0,12	31,2	37	992,6
5.	0,24	0,09	31,2	37	992,5
6.	0,12	0,21	29,1	45	992,7
7.	0,09	0,21	28,6	48	992,7
8.	0,12	0,21	25,8	59	993,1
9.	0,09	0,06	25,3	58	992,6
10.	0,12	0,06	25,7	60	992,6
Опсег	0,09-0,24	0,09-0,21	-	-	-

Табела 4. Коefицијенти линеарне корелације јачина амбијенталног дозног еквивалента у ваздуху са метеоролошким параметрима.

Коefицијент линеарне корелације		Јачина амбијенталног дозног еквивалента	
		на тлу	на 1 m од тла
Урбано подручје	Температура ( $^{\circ}\text{C}$ )	-0,196	-0,179
	Влажност (%)	0,081	-0,093
	Притисак (kPa)	-0,255	-0,087
Рурално подручје	Температура ( $^{\circ}\text{C}$ )	-0,07	0,145
	Влажност (%)	-0,025	-0,113
	Притисак (kPa)	0,005	-0,223
Индустријско подручје	Температура ( $^{\circ}\text{C}$ )	0,494	0,068
	Влажност (%)	-0,482	-0,04
	Притисак (kPa)	-0,054	0,615

### 4. Закључак

Зрачење које се детектује у нормалним условима, потиче од космичког зрачења и природних радионуклида, а зависи од геологије терена, надморске висине мерног места, и карактеристично је за одређени простор.

У овом раду измерене су вредности јачине амбијенталног дозног еквивалента гама зрачења у ваздуху у граду Ваљеву и околини. Утврђено је да се вредности јачине амбијенталног дозног еквивалента у ваздуху не прелазе 0,3  $\mu\text{Sv/h}$  и да су, осим на неколико локација, вредности дозног еквивалента у оквиру светских граница до 0,2  $\mu\text{Sv/h}$ . Разлог може бити разноликост геолошке грађе истраживаног терена.

Нису забележене значајне корелације између мерених вредности јачине амбијенталног дозног еквивалента у ваздуху и параметара температуре, влажности ваздуха и притиска.

### 5. Захвалница

Рад је подржан од стране Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије Уговором бр. 451-03-9/2021-14/200123.

### 6. Литература

- [1] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. *Sources and effects of ionizing radiation: Report to General Assembly with Scientific Annexes*. UNSCEAR, New York: United Nations, 2000.
- [2] 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, New York: United Nations, 2008.
- [3] L. Gulan, Spasović, L. Outdoor and Indoor Ambient Dose Equivalent Rates in Berane Town, Montenegro. In RAD5 Proceeding of Fifth International Conference on radiation and applications in various fields of research. *RAD 2017 Conference Proceedings 2*, 137–140.
- [4] L. Gulan. Temporal and spatial variations of ambient dose equivalent rate in urban and rural sites. *University Thought, Publication in Natural Sciences* 8 (1), 2018, 52-55.
- [5] Z. Stojanovska, B. Boev, Z.S. Zunic, K. Ivanova, M. Ristova, M. Tsenova, P. Bossew. Variation of indoor radon concentration and ambient dose equivalent rate in different outdoor and indoor environments. *Radiat. Environ. Bioph.* 55(2), 2016, 171-183.
- [6] M.S.M. Sanusi, A.T. Ramli, H.T. Gabdo, N.N. Garba, A. Heryanshah, H. Wagiran, M.N. Said. Isodose mapping of terrestrial gamma radiation dose rate of Selangor state, Kuala Lumpur and Putrajaya, Malaysia. *J. Environ. Radioactiv.* 135, 2014, 67-74.
- [7] M. Lebedyte, D. Butkus, G. Morkunas. Variations of the ambient dose equivalent rate in the ground level air. *J. Environ. Radioactiv.* 64, 2003, 45-57.

**AMBIENT DOSE EQUIVALENT RATE AND CORRELATION WITH  
METEOROLOGICAL PARAMETERS IN THE CITY OF VALJEVO AND  
SURROUNDINGS**

**Ljiljana GULAN, Milovan LEKOVIĆ,  
Dušica SPASIĆ and Biljana VUČKOVIĆ**

*University of Priština in Kosovska Mitrovica, Faculty of Sciences and  
Mathematics, Lole Ribara 29, Kosovska Mitrovica, Serbia,  
[ljiljana.gulan@pr.ac.rs](mailto:ljiljana.gulan@pr.ac.rs), [milovan.lekovic@gmail.com](mailto:milovan.lekovic@gmail.com),  
[dusica.spasic@pr.ac.rs](mailto:dusica.spasic@pr.ac.rs), [biljana.vuckovic@pr.ac.rs](mailto:biljana.vuckovic@pr.ac.rs)*

**ABSTRACT**

In order to assess the state of radioactivity in the environment, measurements of ambient dose equivalent rate in the air on the territory of the city of Valjevo and its surroundings were carried out. The research was conducted with a Geiger-Miller counter model FS-2011, in June 2021 at 40 locations. Measurements were performed on the ground and at a height of 1 m in urban, rural and industrial areas. During the measurement, the parameters of temperature, air humidity and atmospheric pressure at the locations were recorded. The correlation between the measurement of ambient dose equivalent rate at different heights and the correlation with meteorological parameters w.

PROCENA ZDRAVSTVENOG RIZIKA OD PRIRODNIH I VEŠTAČKIH  
RADIONUKLIDA U LEKOVITIM BILJKAMA

Milena ŽIVKOVIĆ<sup>1</sup>, Nenad ZLATIC<sup>2</sup>, Dragana KRSTIĆ<sup>1</sup>,  
Milan STANKOVIĆ<sup>2</sup>, Dragoslav NIKEZIC<sup>1,3</sup> i Ivana VIDAKOVIĆ<sup>1</sup>

1) Univerzitet u Kragujevcu, Prirodno-matematički fakultet, Institut za fiziku, Radoja Domanovića 12, 34000 Kragujevac, Srbija, [milena.zivkovic@pmf.kg.ac.rs](mailto:milena.zivkovic@pmf.kg.ac.rs), [dragana.krstic@pmf.kg.ac.rs](mailto:dragana.krstic@pmf.kg.ac.rs), [nikezic@kg.ac.rs](mailto:nikezic@kg.ac.rs), [ivana.vidaakovic@gmail.com](mailto:ivana.vidaakovic@gmail.com)

2) Univerzitet u Kragujevcu, Prirodno-matematički fakultet, Institut za biologiju i ekologiju, Radoja Domanovića 12, 34000 Kragujevac, Srbija, [nenad.zlatic@pmf.kg.ac.rs](mailto:nenad.zlatic@pmf.kg.ac.rs), [mstankovic@kg.ac.rs](mailto:mstankovic@kg.ac.rs)

3) Državni univerzitet u Novom Pazaru, Vuka Karadžića 9, Novi Pazar, Srbija, [nikezic@kg.ac.rs](mailto:nikezic@kg.ac.rs)

SADRŽAJ

Cilj ovog rada je procena nivoa prirodne i veštačke radioaktivnosti u deset različitih uzoraka lekovitog bilja sa srpskog tržišta. Vrednosti za <sup>226</sup>Ra, <sup>232</sup>Th, <sup>40</sup>K i <sup>137</sup>Cs kretale su se od 1,6 do 3,9 Bk.kg<sup>-1</sup>, 0,2 do 1,0 Bk.kg<sup>-1</sup>, 441,0 do 1247,7 Bk.kg<sup>-1</sup>, 0,3 do 0,7 Bk.kg<sup>-1</sup>, respektivno. Srednje vrednosti radijum ekvivalenta (R<sub>aeq</sub>), apsorbovane doze (D) igodišnje efektivne doze (D<sub>e</sub>) su 79,5 Bq/kg, 42,7 nGy-1 i 52,4 μSv, respektivno. Takođe je računata i godišnja efektivna doza u celom telu usled konzumiranja čaja za odraslu osobu. Vrednosti su se kretale u opsegu: 1,1– 8,5 nSv za <sup>137</sup>Cs, 7,3 – 21,7 nSv za <sup>232</sup>Ra, 9,8 – 73,6 nSv za <sup>232</sup>Th i za <sup>40</sup>K 6,6 – 22,9 nSv. Rezultati su pokazali da konzumiranje čaja od odabranih lekovitih biljaka ne predstavlja radiološki rizik po zdravlje stanovništva.

1. Uvod

Određivanje nivoa radioaktivnosti i procena izloženosti jonizujućem zračenju je predmet izučavanja mnogih studija. Pored redovnog monitoringa radioaktivnosti, vrši se stalna kontrola uzoraka iz uvoza. Kontrolišu se različiti uzorci hrane značajne za ishranu stanovništva. Radionuklidi uranijuma i torijuma, kao i <sup>40</sup>K su glavni izvori prirodne radioaktivnosti [1]. Zbog toga se mora utvrditi količina radionuklida u ljudskoj hrani jer predstavlja rizik za pojavu kancera. Globalne organizacije su stavile naglasak na prepoznavanju uticaja zračenja na stanovništvo kako bi se preduzeli efikasni koraci u smanjenju efekata zračenja [2,3,4]. Biljke mogu apsorbovati radionuklide iz zemlje preko korena i tako povećati rizik od zračenja. Terapeutska i farmakološka svojstva lekovitih biljaka su dobro poznata i poslednjih decenija se sve više koriste lekovi na bazi bilja [5,6,7]. Kao posledica nuklearnih akcidenata, nuklearna prašina i pepeo, emitovani u atmosferu dopiru do zemljine površine i biljaka putem vazduha ili kišnih kapi, kasnije se talože na lišću biljaka ili zemljištu. Sprovedena su ispitivanja radioaktivnosti zemljišta i biljaka, kao i procene uticaja na životnu sredinu primenom gama spektrometrije.

Cilj rada je određivanje aktivnosne koncentracije prirodnih i veštačkih radionuklida i radioloških hazardnih parametara u deset medicinskih biljaka koje se mogu koristiti u ishrani ili pripremati kao čaj. Medicinske biljke koje se koriste kao začini bi mogle biti štetnije od čaja, pa su potrebna dodatna ispitivanja kako bi se sa sigurnošću moglo potvrditi da li je njihova upotreba bezbedna.

## 2. Materijali i metode

### 2.1. Prikupljanje i priprema uzoraka

Uzorci su kupljeni u prodavnici zdrave hrane u Kragujevcu, Srbija. Uzorci su homogenizovani i prosejani za spektrometrijsku analizu, stavljeni u polipropilensku posudu od 450 mL, tzv. Marineli posudu. Uzorci biljaka su čuvani u laboratoriji oko 4 sedmice dana radi postizanja sekularne ravnoteže. Za merenje mase uzoraka korišćena je digitalna vaga osetljivosti  $\pm 0,01$  g.

### 2.2. Merenje radiaktivnosti

Specifične aktivnosti  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  i  $^{137}\text{Cs}$  su izmerene korišćenjem koaksijalnog HPGe detektora (GEM30-70, ORTEC) sa relativnom efikasnošću od 30 % i energetsom rezolucijom (FWHM) od 1.85 keV na 1,33 MeV ( $^{60}\text{Co}$ ). Gama-aktivnost svakog uzorka je merena 48 sati i određena je kroz intenzitet emisijonih linija u spektru nakon uklanjanja pozadinskog zračenja. Specifična aktivnost  $^{226}\text{Ra}$  je dobijena kao prosečna aktivnost tri linije gama-zraka njegovih produkata raspada,  $^{214}\text{Pb}$  (351,9 keV) i  $^{214}\text{Bi}$  (609,3 i 1764,5 keV). Specifična aktivnost  $^{232}\text{Th}$  je određena gama-linijama  $^{228}\text{Ac}$  (na energijama od 338,3, 911,1 i 968,9 keV) i  $^{208}\text{Tl}$  (na energijama od 583,0 i 860,6 keV). Linije gama zraka na 1460,7 i 661,6 keV su korišćene za procenu specifičnih aktivnosti  $^{40}\text{K}$  i  $^{137}\text{Cs}$ , respektivno [8]. Za merenje aktivnosti postavljen je tajmer na 252000 sekundi i izvršena je korekcija na fon. Kompjuterski program MAESTRO je korišćen za vršenje analize spektra.

### 2.3 Proračun radiološke opasnosti

Jačina apsorbovane doze je direktna veza između koncentracija radioaktivnosti radionuklida i njihove izloženosti. Formula (1) je korišćena za određivanje jačine apsorbovane doze u datim uzorcima na 1 m iznad površine zemlje [9]:

$$D(\text{nGy} \cdot \text{h}^{-1}) = 0.462C_{\text{Ra}} + 0.604C_{\text{Th}} + 0.0417C_{\text{K}} \quad (1)$$

gde  $D$  predstavlja brzinu apsorbovane doze u  $\text{nGy} \cdot \text{h}^{-1}$ , dok su  $C_{\text{Ra}}$ ,  $C_{\text{Th}}$  and  $C_{\text{K}}$  koncentracije aktivnosti  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  i  $^{40}\text{K}$ , respektivno.

Godišnja efektivna doza je izračunata primenom koeficijenta konverzije od  $0.7 \text{ Sv} \cdot \text{Gy}^{-1}$ :

$$D_E(\mu\text{Sv}) = 0.7 \cdot D \cdot t \cdot p \quad (2)$$

gde  $t$  predstavlja godišnje vreme izloženosti (8760 h), dok je  $p$  faktor za vreme boravka stanovništva na otvorenom i iznosi 0.2 za vreme provedeno na otvorenom, što znači da je 20 % vremena provedeno na otvorenom.

Izračunata je specifična aktivnost materijala koji sadrži različite količine  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  i  $^{40}\text{K}$  prema [10].

$$R_{\alpha\beta\gamma} \left( \frac{\text{Bq}}{\text{kg}} \right) = C_{\text{Ra}} + 1.43C_{\text{Th}} + 0.077C_{\text{K}} \quad (3)$$

Koncentracije aktivnosti  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  i  $^{40}\text{K}$  u  $\text{Bq/kg}$  su predstavljene preko  $C_{\text{Ra}}$ ,  $C_{\text{Th}}$  i  $C_{\text{K}}$ , respektivno.

Godišnja efektivna doza od uzimanja biljnog čaja je izračunata pomoću jednačine [1]:

$$E_{ing} = CHDF_{ing} \quad (4)$$

gde je  $E_{ing}$  godišnja efektivna doza od unosa čajeva (Sv/year), C je koncentracija radionuklida u proizvodu (Bq/kg), H je brzina konzumiranja čaja po godini (kg/year) i  $F_{ing}$  je koeficijent doze za ingestiju radionuklida (Sv/Bq).

### 3. Rezultati i diskusija

Rezultati merenja koncentracija aktivnosti prirodnih radionuklida i  $^{137}\text{Cs}$ , kao radiološki hazardni parametri su prikazani u Tabeli 1.

**Tabela 1. Deskriptivne statistike koncentracija radionuklida, jačina apsorbovane doze u vazduhu, godišnje efektivne doze, Ra ekvivalenta u analiziranim uzorcima biljaka.**

	$^{226}\text{Ra}$ (Bq kg <sup>-1</sup> )	$^{232}\text{Th}$ (Bq kg <sup>-1</sup> )	$^{40}\text{K}$ (Bq kg <sup>-1</sup> )	$^{137}\text{Cs}$ (Bq kg <sup>-1</sup> )	$\dot{D}$ (nGy h <sup>-1</sup> )	$D_e$ (μSv)	$R_{aeq}$ (Bq kg <sup>-1</sup> )
<b>Pitoma nana</b> ( <i>Mentha piperita</i> )	3,2 ± 0,2	0,3 ± 0,1	1160 ± 60	0,6 ± 0,1	49,9 ± 2,5	61,2 ± 3,1	92,7 ± 4,6
<b>Kamilica</b> ( <i>Matricaria chamomilla</i> )	3,0 ± 0,2	0,8 ± 0,1	1230 ± 60	0,2 ± 0,1	53,0 ± 2,7	65,0 ± 3,3	98,6 ± 4,9
<b>Rastavić</b> ( <i>Equisetum arvense</i> )	3,3 ± 0,2	0,9 ± 0,1	1250 ± 60	0,7 ± 0,1	54,1 ± 2,7	66,3 ± 3,3	100,6 ± 5,0
<b>Hibiskus</b> ( <i>Hibiscus sabdariffa</i> )	2,0 ± 0,1	1,0 ± 0,1	850 ± 40	0,2 ± 0,1	37,0 ± 1,9	45,4 ± 2,3	69,0 ± 3,4
<b>Nar</b> ( <i>Punica granatum</i> )	2,6 ± 0,1	0,4 ± 0,1	700 ± 35	0,2 ± 0,1	63,6 ± 1,5	37,5 ± 1,9	57,0 ± 2,9
<b>Sena</b> ( <i>Cassia sena</i> )	3,9 ± 0,2	0,7 ± 0,1	1150 ± 60	0,4 ± 0,1	50,1 ± 2,5	61,4 ± 3,1	93,2 ± 4,7
<b>Uva</b> ( <i>Arctostaphylos uva-ursi</i> )	2,7 ± 0,1	0,5 ± 0,1	960 ± 50	0,2 ± 0,1	41,7 ± 2,1	51,1 ± 2,6	77,5 ± 3,9
<b>Kopriva</b> ( <i>Urtica dioica</i> )	2,6 ± 0,1	0,7 ± 0,1	1100 ± 55	0,4 ± 0,1	47,4 ± 2,4	58,2 ± 2,9	88,2 ± 4,4
<b>Kantarion</b> ( <i>Hypericum perforatum</i> )	1,4 ± 0,1	0,2 ± 0,1	440 ± 22	0,3 ± 0,1	19,2 ± 1,0	23,5 ± 1,2	35,6 ± 1,8
<b>Hajdučka trava</b> ( <i>Achillea millefolium</i> )	3,6 ± 0,2	0,8 ± 0,1	1010 ± 50	0,3 ± 0,1	44,4 ± 2,2	54,4 ± 2,7	82,7 ± 4,1
<b>Min</b>	1,4	0,2	441,0	0,2	19,2	23,5	35,6
<b>Max</b>	3,9	1,0	1247,7	0,7	54,1	66,3	100,6
<b>AS</b>	2,8	0,6	984,3	0,3	42,7	52,4	79,5
<b>SD</b>	0,7	0,3	243,4	0,2	10,5	12,9	19,5
<b>MED</b>	2,9	0,7	1055,6	0,2	45,9	56,3	85,5

Specifične aktivnosti radionuklida u uzorcima poređane su na sledeći način:

$^{40}\text{K} > ^{226}\text{Ra} > ^{232}\text{Th} > ^{137}\text{Cs}$ . Aktivnost  $^{226}\text{Ra}$  u uzorcima deset biljaka je u opsegu od 1,4 do 3,9 Bq/kg, sa srednjom vrednošću od 2,8 Bq/kg. *Sena* i *Kantarion* imaju najviše i

najniže koncentracije aktivnosti, respektivno. Aktivnost  $^{232}\text{Th}$  je u opsegu od 0,2 do 1,0 Bq/kg sa srednjom vrednošću od 0,6 Bq/kg. Najviše i najniže koncentracije aktivnosti su otkrivene kod *Kantariiona* i *Hibiskusa*, respektivno. Iako su nivoi  $^{226}\text{Ra}$  i  $^{232}\text{Th}$  veoma visoki po testiranim uzorcima zemljišta prikupljenog na teritoriji Srbije, zanimljivo je da produkti medicinskih biljaka nemaju tako visoku koncentraciju aktivnosti radionuklida [1]. Aktivnost  $^{40}\text{K}$  je u opsegu od 441,0 do 1247,7 Bq/kg sa srednjom vrednošću od 984,3 Bq/kg. Najviša koncentracija aktivnosti  $^{40}\text{K}$  je otkrivena kod *rastavića*. Ovo bi se moglo objasniti činjenicom da biljke imaju visoke transfer faktore zbog složenih metaboličkih procesa koji uključuju kalijum. Dodatno, upotreba đubriva može biti još jedan faktor koji uzrokuje povećanje koncentracije aktivnosti  $^{40}\text{K}$  [12]. Aktivnost  $^{137}\text{Cs}$  je u opsegu od 0,3 do 0,7 Bq/kg sa srednjom vrednošću od 0,3 Bq/kg.  $^{137}\text{Cs}$  ima zanemarljivu aktivnost u većini uzoraka, posebno se izdvaja *Hajdučka trava* i *Kantarion*, gde je vrednost od 0,3 Bq/kg.

Kao što je prikazano u tabeli 2, radiološki hazardni parametri se procenjuju na osnovu rezultata koncentracija aktivnosti  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  i  $^{40}\text{K}$  u uzorcima lekovitih biljaka. Vrednosti jačine apsorbovane doze su u opsegu od 19,2 do 54,1 nGy·h<sup>-1</sup> sa srednjom vrednošću od 42,7 nGy·h<sup>-1</sup>. Ova vrednost ne prelazi preporučene međunarodne nivoe od 59 nGy·h<sup>-1</sup>. Vrednost godišnje efektivne doze varira i može biti od 23,5 do 66,3 μSv sa srednjom vrednošću 52,4 μSv, koja je niža od prosečne godišnje vrednosti od 66 μSv za izloženost spoljašnjim prirodnim izvorima zračenja sa zemlje. Maksimalna vrednost radijum ekvivalenta je 100,6 Bq/kg i ne prelazi preporučenu vrednost od 370 Bq/kg. Zaključci studije ukazuju da su dobijene vrednosti niže od preporučenih graničnih vrednosti. Trenutna studija i rezultati mogu biti uvod za dalja istraživanja različitih lekovitih biljaka.

Rezultati godišnje doze od ingestije radionuklida putem čajeva su prikazane u Tabeli 2.

**Tabela 2. Godišnje doze unosa prirodnih radionuklida i  $^{137}\text{Cs}$  za odraslu osobu prilikom konzumacije biljnih čajeva.**

	Količina (g)	$^{137}\text{Cs}$		$^{226}\text{Ra}$		$^{232}\text{Th}$		$^{40}\text{K}$	
		$C$ ( $\frac{\text{mBq}}{\text{kg}}$ )	$E_{\text{ing}}$ (nSv/y)	$C$ ( $\frac{\text{mBq}}{\text{kg}}$ )	$E_{\text{ing}}$ (nSv/y)	$C$ ( $\frac{\text{mBq}}{\text{kg}}$ )	$E_{\text{ing}}$ (nSv/y)	$C$ ( $\frac{\text{mBq}}{\text{kg}}$ )	$E_{\text{ing}}$ (nSv/y)
<b>Pitoma nana</b>	2,5	4,5	8,5	24	21,7	2,6	18,4	8700	21,6
<b>Kamilica</b>	2,5	1,5	2,8	22,5	20,4	6	49,1	9225	22,9
<b>Rastavić</b>	2	4,2	7,9	19,8	17,9	5,4	44,2	7500	18,6
<b>Hibiskus</b>	3	1,8	3,4	18	16,3	9	73,6	7650	19,0
<b>Nar</b>	2	1,2	2,3	15,6	14,1	2,4	19,6	4200	10,4
<b>Sena</b>	1	1,2	2,3	11,7	10,6	2,1	17,2	3450	8,56
<b>Uva</b>	1	0,6	1,1	8,1	7,33	1,5	12,3	2880	7,15
<b>Kopriva</b>	2	2,4	4,6	15,6	14,1	4,2	34,3	6600	16,4
<b>Kantarion</b>	2	1,8	3,4	8,4	7,60	1,2	9,81	2640	6,55
<b>Hajdučka trava</b>	2	1,8	3,4	21,6	19,6	4,8	39,2	6060	15,0

Ljudi u Srbiji piju u proseku dve šolje ili 0,4 l čaja dnevno [1]. U prvoj koloni Tabele 2. date su preporučene količine suvog lekovitog bilja za pripremu biljnog čaja. U skladu sa ovim podacima i jednačinom (4), Tabela 2 prikazuje procenjene aktivnosne koncentracije  $^{137}\text{Cs}$  i prirodnih radionuklida u uzorcima biljnog čaja i vrednosti godišnje efektivne doze u celom telu usled konzumiranja čaja za odraslu osobu. Odgovarajuće godišnje doze su u opsegu od: 1,1– 8,5 nSv za  $^{137}\text{Cs}$ , 7,3 – 21,7 nSv za  $^{232}\text{Ra}$ , 9,8 – 73,6 nSv za  $^{232}\text{Th}$  i za  $^{40}\text{K}$  6,6 – 22,9 nSv.

#### 4. Zaključak

Nivoi prirodne i veštačke radioaktivnosti deset odabranih medicinskih biljaka koje se obično koriste u Srbiji ispitivani su gama spektrometrijom. Kao rezultat, studija pokazuje da testirani uzorci nemaju primetnu specifičnu radioaktivnost izuzev  $^{40}\text{K}$ . Računata je godišnja efektivna doza, za odraslu osobu usled konzumiranja čaja. Na osnovu prikazanih rezultata merenja radioaktivnosti u biljkama koje se koriste u medicini može se zaključiti da se u ispitivanim uzorcima mogu detektovati radionuklidi, ali u veoma malim količinama koje ne predstavljaju problem za ljudsku upotrebu.

#### 5. Zahvalnica

Rad je finansijski podržan od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije (Aneks ugovora, evidencioni broj: 451-03-9/2021-14/ 200017).

#### 6. Literatura

- [1] M. Jevremovic, N. Lazarevic, S. Pavlovic, M. Orlic. 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. Healt.* S. 47 (1), 2011, 87-92.
- [2] UNSCEAR. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and effects of ionizing radiation, vol. 1, New York, 2000, United Nations Publication.
- [3] R.C. Da Silva, J.M. Lopes, L.B. Da Silva, A.M. Domingues, C. Da Silva Pinheiro, L.F. Da Silva, A.X. Da Silva. Radiological evaluation of Ra-226, Ra-228 and K-40 in tea samples: A comparative study of effective dose and cancer risk. *Appl. Radiat. Isotopes.* 165, 2018, 109326.
- [4] R.W.D. Garcêz, J.M. Lopes, M.A.F. Lima, A.X. Da Silva. Determination of Ra-226, Ra-228 and K-40 specific activities in samples of mineral fertilizers marketed in the city of Rio de Janeiro, Brazil. *Appl. Radiat. Isotopes.* 141, 2018b, 199-202.
- [5] I. Kandić, A. Kandić I. Čeliković, M. Gavrilović, P. Janačković. Activity concentrations of  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{40}\text{K}$ , and  $^{210}\text{Pb}$  radionuclides in selected medicinal herbs from Central Serbia and their effective dose due to ingestion. *Sci. Total. Environ.* 701, 2020, 134554.
- [6] B.B. Petrovska. Historical review of medicinal plants' usage. *Pharmacognosy Reviews.* 6 (11), 2012, 1.
- [7] R.A. Dar, M. Shahnawaz, P.H. Qazi. General overview of medicinal plants: A review. *The Journal of Phytopharmacology.* 6 (6), 2017, 349-351.
- [8] B. Milenkovic, J.M. Stajic, L. Gulan, T. Zeremski, D. Nikezic, D. Radioactivity levels and heavy metals in the urban soil of Central Serbia. *Environ. Sci. Pollut. R.* 22 (21), 2015, 16732-16741.



- [9] Unsear. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation Sources and Effects of Ionizing Radiation United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. 2008, United Nations, New York.
- [10] J. Beretka and P.J. Matthe. Natural radioactivity of Australian building materials, industrial wastes and by-products. *Health Phys.* 48 (1), 1985, 87-95.
- [11] Krieger, R. Radioactivity of Construction Materials. *Betonwerk Fertigteil-Technik* 47, 1981, 468-473.
- [12] R. W. D.Garcêz, J.M. Lopes, R.A. Filgueiras, A.X.D. Silva. Study of K-40, Ra-226, Ra-228 and Ra-224 activity concentrations in some seasoning and nuts obtained in Rio de Janeiro city, Brazil. *Food. Sci. Tech.* 39 (1), 2018a, 120-126.

**HEALTH RISK ASSESSMENT OF NATURAL AND ARTIFICIAL  
RADIONUCLIDES IN MEDICINAL PLANTS**

**Milena ŽIVKOVIĆ<sup>1</sup>, Nenad ZLATIC<sup>2</sup>, Dragana KRSTIĆ<sup>1</sup>,  
Milan STANKOVIĆ<sup>2</sup>, Dragoslav NIKEZIĆ<sup>1,3</sup> and Ivana VIDAKOVIĆ<sup>1</sup>**

1) *Univerzitet u Kragujevcu, Prirodno-matematički fakultet, Institut za fiziku, Radoja Domanovića 12, 34000 Kragujevac, Srbija, [milena.zivkovic@pmf.kg.ac.rs](mailto:milena.zivkovic@pmf.kg.ac.rs), [dragana.krstic@pmf.kg.ac.rs](mailto:dragana.krstic@pmf.kg.ac.rs), [nikezic@kg.ac.rs](mailto:nikezic@kg.ac.rs), [ivana.vidaakovic@gmail.com](mailto:ivana.vidaakovic@gmail.com)*

2) *Univerzitet u Kragujevcu, Prirodno-matematički fakultet, Institut za biologiju i ekologiju, Radoja Domanovića 12, 34000 Kragujevac, Srbija, [nenad.zlatic@pmf.kg.ac.rs](mailto:nenad.zlatic@pmf.kg.ac.rs), [mstankovic@kg.ac.rs](mailto:mstankovic@kg.ac.rs)*

3) *Državni univerzitet u Novom Pazaru, Vuka Karadžića 9, Novi Pazar, Srbija, [nikezic@kg.ac.rs](mailto:nikezic@kg.ac.rs)*

**ABSTRACT**

The objective of this study is to evaluate natural and artificial radioactivity levels in ten different samples of medicinal herbs from Serbian market. The values for <sup>226</sup>Ra, <sup>232</sup>Th, <sup>40</sup>K and <sup>137</sup>Cs ranged from 1,35 to 3,89 Bq.kg<sup>-1</sup>, 0,22 to 0,98 Bq.kg<sup>-1</sup>, 441,03 to 1247,73 Bq.kg<sup>-1</sup>, 0,03 to 0,68 Bq.kg<sup>-1</sup>, respectively. The mean values of radium equivalent activity (Raeq), absorbed dose rates (D), annual effective dose (De) are 79,5 Bq.kg<sup>-1</sup>, 42,7 nGy<sup>-1</sup>, 52,4 μSv, respectively. The annual effective dose in the whole body due to the consumption of tea for an adult was also calculated. The values ranged from: 1.1–8.5 nSv for <sup>137</sup>Cs, 7.3 - 21.7 nSv for <sup>232</sup>Ra, 9.8 - 73.6 nSv for <sup>232</sup>Th and for <sup>40</sup>K 6.6 - 22.9 nSv. However, results showed that the tea consumption from selected medical herbs do not represent a radiological health risk to the population.

## RECIKLIRANJE FOSFOGIPSA U PROIZVODNJI OPEKE I PROCENA JAČINE APSORBOVANE DOZE GAMA ZRAČENJA MONTE CARLO SIMULACIJAMA

**Predrag KUZMANOVIĆ<sup>1,2</sup>, Dušan MRĐA<sup>1</sup>, Sofija FORKAPIĆ<sup>1</sup>,  
Nataša TODOROVIĆ<sup>1</sup>, Bojan MILJEVIĆ<sup>3</sup> i Jovana KNEŽEVIĆ<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), [mrdjad@df.uns.ac.rs](mailto:mrddjad@df.uns.ac.rs), [sofija@df.uns.ac.rs](mailto:sofija@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)
- 2) Akademija strukovnih studija Šabac, Odsek za medicinske i poslovno-tehnološke studije, Laboratorija za fiziku, Šabac, Srbija, [predrag.kuzmanovic@vmpts.edu.rs](mailto:predrag.kuzmanovic@vmpts.edu.rs)
- 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 nus-proizvod iz procesa proizvodnje fosforne kiseline koji sadrži povećan sadržaj <sup>226</sup>Ra, kao i dosta teških metala. Glavni cilj ovog rada je recikliranje otpadnog fosfogipsa u proizvodnji opeke dodavanjem glini u različitim odnosima i ispitivanje potencijalnog radiološkog uticaja na ljude u pogledu gama zračenja. Proizvedeno je 8 uzoraka opeke sa udelom fosfogipsa 0–40 % koji su pečeni na 1000 °C. Merenje sadržaja <sup>226</sup>Ra, <sup>232</sup>Th i <sup>40</sup>K u uzorcima izvršeno je metodom gama spektrometrije, dok je hemijski sastav uzoraka opeke određen rendgenskom fluorescentnom analizom (XRF). Dobijeni podaci su korišćeni za procenu jačina apsorbovanih doza gama zračenja upotrebom Monte Karlo simulacija. Ispitivan je uticaj hemijskog sastava i gustine opeke na vrednosti jačina apsorbovanih doza gama zračenja. Uočeno je da hemijski sastav opeke nema naročit uticaj, dok je uticaj gustine na dobijene vrednosti oko 10 %. Pored svega zaključuje se da recikliranje fosfogipsa na ovakav način daje pozitivne efekte u smislu rizika od izloženosti populacije gama zračenju.*

### 1. Uvod

U svetu, a i u Srbiji nastaju velike količine otpadnog fosfogipsa (PG), koji je štetan za ljude i životnu sredinu, pre svega usled povećanog sadržaja prirodnih radionuklida <sup>226</sup>Ra, <sup>238</sup>U, <sup>210</sup>Pb, <sup>210</sup>Po i <sup>234</sup>U. Na primer, u Brazilu svake godine nastane oko 5,5 miliona tona ovog otpada [1]. U Srbiji se svake godine proizvede oko 810.000 tona ovog otpadnog fosfogipsa [2].

Imajući u vidu da ovaj otpad nastaje pri procesu proizvodnje fosforne kiseline u njemu se kao nečistoće mogu naći i fosfati, ostaci fosforne kiseline, organske materije i fluoridi. Glavni nedostatak slabo razvijene komercijalne upotrebe fosfogipsa u svetu je prisustvo radioaktivnih elemenata i nečistoća, zbog čijeg prisustva su smanjene mehaničke karakteristike fosfogipsa [3] u odnosu na prirodni gips. Razvijene su različite metode za uklanjanje ili smanjenje ovih radionuklida i nečistoća iz sirovog fosfogipsa kako bi se garantovala njegova bezbedna upotreba u građevinskoj industriji [4-7]. Metode hemijskog tretmana radi smanjenja koncentracije radionuklida često mogu biti vremenski zahtevne, ali i ekonomski neisplative, te se često mora posezati za ekonomičnijim merama recikliranja ovog otpada, ali sve u cilju da se time ne ugrozi zdravlje ljudi i životna sredina.

Ovaj rad razmatra mogućnosti iskorišćenja fosfogipsa kao NORM materijala (eng. *Naturally-Occurring Radioactive Materials*). S obzirom na mali broj istraživanja iz ove oblasti proistekla je ideja njegovog iskorišćenja u proizvodnji opeke, kao dodatka glini.

Neka od postojećih razmatranja upotrebe fosfogipsa u proizvodnji pečene opeke sadržana su u radovima autora [8-11].

Ova studija ispituje uticaj gustine matrice opeke sa različitim udelom fosfogipsa i hemijskog sastava uzorka na vrednosti jačina apsorbovanih doza gama zračenja i nadovezuje se na naše pređašnje istraživanje [12].

### 2. Materijal i metode

Za pravljenje uzoraka opeke korišćena veličina frakcije fosfogipsa je veličine  $\leq 0,25$  mm. Za pripremu kompozita korišćena je glina sa površinskog kopa Jovanovića brdo iz Donjeg Crniljeva, Srbija. Fosfogips je pribavljen iz jedne od hemijskih industrija u Srbiji. Sirova glina i fosfogips su najpre sušeni na  $105\text{ }^{\circ}\text{C}$  do konstantne mase 6-8h, zatim su samleveni u kugličnom mlinu. Pripremljeno je 8 uzoraka sa masenim udelom fosfogipsa u rasponu od 0 – 40 %. Uzorci su nakon sušenja podvrgnuti procesu pečenja 5h na konstantnoj temperaturi od  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Izgled dobijenih 8 uzoraka sa različitim udelom fosfogipsa prikazan je na Slici 1 [12].

Koncentracije aktivnosti  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  i  $^{40}\text{K}$  za sve uzorke i sirovine određene su metodom gama spektrometrije na osnovu energija gama linija njihovih potomaka datih u radu [13]. Svi uzorci su mereni nakon minimum mesec dana, kako bi se uspostavila sekularna radioaktivna ravnoteža između  $^{226}\text{Ra}$  i  $^{222}\text{Rn}$  [2].

Usled nepostojanja jasnih smernica za procenu jačina apsorbovanih doza gama zračenja za ovu grupu materijala korišćen je metod Monte Karlo simulacija softverskim paketom GEANT4 (verzija 4.9.5) [16,17] prema metodologiji opisanoj u našem prethodnom istraživanju [13]. Za određivanje jačina apsorbovanih doza gama zračenja Monte Karlo simulacijama izvršena je i hemijska analiza uzoraka metodom rendgenske fluorescentne analize (*eng. X-ray fluorescence – XRF*), koja je opisana u našem ranijem radu [16].

Prosečna vrednost jačine apsorbovane doze gama zračenja za građevinske materijale u svetu iznosi  $55\text{ nGy h}^{-1}$  [17].



Slika 1. Opeka sa fosfogipsom u rasponu od 0 – 40 %, pečena na  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$  [24].

### 3. Rezultati i diskusija

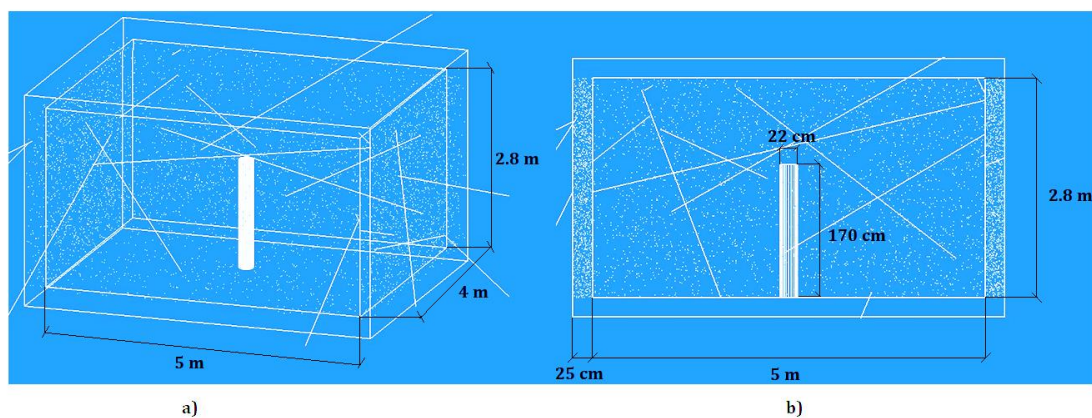
Izmerene vrednosti koncentracija aktivnosti radionuklida u uzorcima se kreću u intervalu od  $56\text{--}265\text{ Bq kg}^{-1}$ ,  $45\text{--}65\text{ Bq kg}^{-1}$  i  $444\text{--}620$  za  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  i  $^{40}\text{K}$ , respektivno. Vrednosti koncentracija aktivnosti  $^{226}\text{Ra}$  prelaze prosečnu vrednost za građevinske materijale od  $50\text{ Bq kg}^{-1}$  od 1,12 puta, kod uzorka sa udelom PG od 0 %, do oko 5,3 puta, kod uzorka sa udelom PG od 40 %. Koncentracije aktivnosti  $^{232}\text{Th}$  i  $^{40}\text{K}$  su oko prosečnih vrednosti od  $50\text{ Bq kg}^{-1}$  i  $500\text{ Bq kg}^{-1}$  za građevinske materijale [18], respektivno.

**Tabela 1. Izmerene vrednosti koncentracija aktivnosti  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  i  $^{40}\text{K}$  i XRF analiza glavnih elemenata u uzorcima opeke [12].**

mas. % PG	Koncentracija aktivnosti (Bq kg <sup>-1</sup> )			Udeo elementa (mas. %)								
	$^{226}\text{Ra}$	$^{232}\text{Th}$	$^{40}\text{K}$	Na	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Mn	Fe
0	56±1	65±2	620±18	0,48	1,01	15,32	26,89	0,021	1,98	0,41	0,008	5,72
5	80±2	66±2	621±18	0,42	0,94	13,52	25,65	1,91	1,91	2,24	0,007	5,07
10	104±2	59±2	592±17	0,49	0,87	12,93	23,61	3,12	1,79	4,19	0,008	5,00
15	140±3	60±3	587±17	0,52	0,77	11,82	22,83	4,29	1,86	5,21	0,006	4,63
20	155±3	52±3	559±24	0,51	0,66	10,35	21,78	5,95	1,73	6,35	0,006	4,38
25	174±3	50±2	500±22	0,46	0,62	9,75	20,56	6,93	1,59	7,91	0,007	4,02
30	216±3	51±3	528±15	0,42	0,55	8,24	19,23	8,70	1,63	9,11	0,006	3,82
40	265±3	45±2	444±13	0,35	0,57	6,22	17,30	10,38	1,41	12,73	0,005	3,11

Nadalje, vršene su Monte Karlo simulacije radi procena jačina apsorbovanih doza gama zračenja. Prostorija čiji su zidovi izgrađeni od opeke sa različitim udelom fosfogipsa u simulaciji je zadata prema standardnim dimenzijama: 4 m × 5 m × 2,8 m, bez prozora i vrata, kao što je pretpostavljeno u istraživanju [19]. Pod i plafon prostorije izrađeni su od betona debljine 10 cm i gustine 2350 kg m<sup>-3</sup>. Debljina zidova od opeke je iznosila 25 cm, Slika 2. Gustina opeke sa fosfogipsom u simulacijama zadata je prema tipičnoj vrednosti za glinene opeke od 1500 kg m<sup>-3</sup> [20], dok je hemijski sastav određen za svih 8 analiziranih uzoraka XRF metodom, Tabela 1 [12]. Potrebno je naglasiti da plafon i pod u zadatoj prostoriji ne učestvuju u emisiji gama fotona, ali doprinose njihovom rasejanju. Vodeni cilindar, prečnika 22 cm i visine 170 cm, smešten je u centru prostorije standardnih dimenzija, (Slika 2), predstavljajući ljudsko telo (mase  $m_{\text{cylinder}}=64,6$  kg), kako bi se dobila ukupna deponovana energija ( $E_{\text{dep}}$ ) unutar ovog cilindra u svakoj pojedinačnoj simulaciji.

Pretpostavljeno je da su  $^{226}\text{Ra}$  i  $^{232}\text{Th}$  u sekularnoj radioaktivnoj ravnoteži sa svojim potomcima, uzimajući u obzir da oni zajedno sa  $^{40}\text{K}$  najvećim delom doprinose ukupnoj vrednosti apsorbovane doze gama zračenja.



**Slika 2. Izgled prostorije dimenzija 4 × 5 × 2,8 m čiji su zidovi debljine 25 cm izgrađeni od opeke sa različitim udelima fosfogipsa sa vodenim cilindrom u centru prostorije, postavljenim u Monte Karlo simulacijama [12].**

S obzirom da se u simulacijama može zadati samo broj raspada (događaja), za referentni broj događaja je odabrano  $10^6$  raspada  $^{226}\text{Ra}$ , dok se broj emitovanih događaja  $^{232}\text{Th}$  i  $^{40}\text{K}$  dobija kada se ovaj broj događaja pomnoži odnosom koncentracija aktivnosti  $^{226}\text{Ra}$  i koncentracija aktivnosti  $^{232}\text{Th}$  i  $^{40}\text{K}$ , respektivno [13].

Potom je određivanjem ekvivalentnog vremena ( $t_{\text{eq}}$ ) i deponovane energije u vodenom cilindru određena jačina apsorbovane doze gama zračenja ( $D$ ), prema relaciji (6) iz našeg ranijeg istraživanja [13].

Simulirane vrednosti se kreću od  $45,1 \text{ nGy h}^{-1}$ , za uzorak sa 0 % PG, do  $71,2 \text{ nGy h}^{-1}$ , za uzorak sa 40 % PG, Tabela 4 [12]. Za većinu dobijenih vrednosti se može reći da su oko proseka za građevinske materijale u svetu od  $55 \text{ nGy h}^{-1}$  [17].

**Tabela 2. Vrednosti simuliranih vrednosti jačina apsorbovanih doza gama zračenja za 8 analiziranih uzoraka opeke sa različitim udelom fosfogipsa [12].**

mas.% PG	0	5	10	15	20	25	30	40
$D_{\text{sim}}$ (nGy h <sup>-1</sup> )	45,1	50,1	58,8	57,6	55,9	58,2	64,7	71,2

Takođe, ispitivane su varijacije hemijskog sastava i gustine matrice na vrednosti jačine apsorbovane doze gama zračenja. Najpre je u simulacijama zadat isti hemijski sastav matrice svim uzorcima, kao kod uzorka sa 0 % PG (Tabela 1), ali sa njihovim izmerenim vrednostima koncentracija aktivnosti  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  i  $^{40}\text{K}$ , Tabela 1, za gustinu matrice od  $1500 \text{ kg m}^{-3}$ , kao i u prethodnim simulacijama u radu [12]. Dobijene vrednosti su prikazane u Tabeli 3. U poređenju sa vrednostima dobijenim za različit hemijski sastav matrice, vrednosti simuliranih doza gama zračenja sa istim sastavom matrice ( $D_{\text{sim0}}$ ) su kod većine uzoraka oscilovale u okvirima 5 % (kod 6 uzoraka čak < 2 %). Odavde se može zaključiti da hemijski sastav matrice ne predstavlja značajan faktor koji doprinosi povećanju jačine apsorbovane doze gama zračenja, te uzrok treba tražiti isključivo u povećanju koncentracije aktivnosti  $^{226}\text{Ra}$  koja raste sa povećanjem udela fosfogipsa u uzorcima.

**Tabela 3. Vrednosti simuliranih jačina apsorbovanih doza gama zračenja za uzorke opeke, za identičan hemijski sastav matrice svih uzoraka kao kod uzorka sa 0 % fosfogipsa ( $D_{\text{sim0}}$ ) i njihovo poređenje sa vrednostima iz Tabele 2.**

% PG	0	5	10	15	20	25	30	40
$D_{\text{sim0}}$ (nGy h <sup>-1</sup> )	45,6	50,9	51,3	55,2	56,3	59,6	65,5	69,9
$D_{\text{sim}}$ (nGy h <sup>-1</sup> )	45,1	50,1	58,8	57,6	55,9	58,2	64,7	71,2
$D_{\text{sim0}}/D_{\text{sim}}$	1,01	1,02	0,87	0,96	1,01	1,02	1,01	0,98

Pošto nisu uočene značajne varijacije u vrednostima jačina apsorbovanih doza gama zračenja pri promeni sastava matrice, izvršene su dodatne simulacije sa promenom njene gustine. S obzirom da je u prethodnom delu korišćena tipična vrednost gustine opeke od  $1.500 \text{ kg m}^{-3}$  dalje simulacije su izvršene za dva uzorka opeke sa udelom fosfogipsa 0 % i 40 % zadavanjem gustine matrice od  $2.000 \text{ kg m}^{-3}$ , kako bi se ispitaio uticaj promene gustine na vrednosti jačina apsorbovanih doza gama zračenja. Dobijene vrednosti su date u Tabeli 4. Može se uočiti da su vrednosti pri gustini matrice od  $2.000 \text{ kg m}^{-3}$  više za oko 10 % kod oba uzorka u odnosu na gustinu od  $1.500 \text{ kg m}^{-3}$ .

U slučaju kada je u simulacijama menjan hemijski sastav matrice bez promene gustine, ne dolazi do promene ukupne aktivnosti zidova u prostoriji, odnosno ne dolazi do promene broja emitovanih fotona u jedinici vremena. Menjajući relativni udeo pojedinih hemijskih elemenata u simulacijama, isključivo se utiče samo na apsorpciju emitovanih fotona u samoj matrici, što rezultuje malim varijacijama vrednosti jačina apsorbovanih doza gama zračenja.

**Tabela 4. Poređenje vrednosti jačina apsorbovanih doza gama zračenja za uzorke opeke se udelom fosfogipsa 0 % i 40 %, za različite gustine njihove matrice.**

% PG	$D_{sim}$ (nGy h <sup>-1</sup> ) [ $\rho=1500$ kg m <sup>-3</sup> ]	$D_{sim}$ (nGy h <sup>-1</sup> ) [ $\rho=2000$ kg m <sup>-3</sup> ]
0	45,6	50,4
40	71,2	77,2

Međutim, kada je dolazilo do promene gustine matrice, pored uticaja na apsorpciju fotona unutar matrice (zbog promene broja centara za interakciju po jedinici zapremine), značajno se uticalo na broj emitovanih fotona u jedinici vremena, jer je dolazilo, praktično, do povećanja mase zidova iz kojih se vrši emisija gama fotona, pa se samim tim uticalo i na povećanje ukupne aktivnosti radionuklida u zidovima simulirane prostorije.

Kao primer razmotren je uzorak sa 0 % PG sa koncentracijom aktivnosti <sup>226</sup>Ra koja iznosi 56 Bq kg<sup>-1</sup>. Ako je gustina matrice 1.500 kg m<sup>-3</sup>, tada je masa zidova sobe iz koje se vrši emisija 19.950 kg, a ukupna aktivnost <sup>226</sup>Ra iznosi 1.117.200 Bq, što znači da postoji 1.117.200 raspada <sup>226</sup>Ra u jedinici vremena. To dalje znači da postoji  $0,462 \times 1.117.200 = 516.146$  fotona energije 609,3 keV (poreklom od <sup>214</sup>Pb, uz pretpostavku sekularne radioaktivne ravnoteže) emitovanih u jednoj sekundi u ukupnoj masi zidova sobe.

U konkretnom slučaju, uzimajući u obzir sve fotone poreklom od <sup>226</sup>Ra, <sup>232</sup>Th i <sup>40</sup>K emitovane u jedinici vremena, odnosno deponovanu energiju u vodenom cilindru u jedinici vremena, dobija se jačina apsorbovane doze gama zračenja od 45,6 nGy h<sup>-1</sup>.

Ako je gustina matrice 2.000 kg m<sup>-3</sup>, tada je masa zidova sobe iz koje se vrši emisija 26.600 kg, a ukupna aktivnost <sup>226</sup>Ra iznosi 1.489.600 Bq, što znači da postoji 1.489.600 raspada <sup>226</sup>Ra u jedinici vremena. To dalje znači da postoji  $0,462 \times 1.489.600 = 688.195$  fotona energije 609,3 keV (poreklom od <sup>214</sup>Pb, uz pretpostavku sekularne radioaktivne ravnoteže) emitovanih u jednoj sekundi u ukupnoj masi zidova sobe.

Dakle, povećanje broja raspada <sup>226</sup>Ra, odnosno broja emitovanih fotona energije 609,3 keV u jedinici vremena, u odnosu na prethodnu situaciju kada je gustina bila 1.500 kg m<sup>-3</sup>, iznosi  $\approx 33$  %. U konkretnom slučaju, uzimajući u obzir sve fotone poreklom od <sup>226</sup>Ra, <sup>232</sup>Th i <sup>40</sup>K emitovane u jedinici vremena, odnosno deponovanu energiju u vodenom cilindru u jedinici vremena, dobija se jačina apsorbovane doze gama zračenja od 50,4 nGy h<sup>-1</sup>, sto je za oko 10 % viša jačina apsorbovane doze gama zračenja u odnosu na prethodnu situaciju kada je gustina matrice iznosila 1.500 kg m<sup>-3</sup>.

Prema tome, ovde je presudan uticaj povećanje broja emitovanih fotona u jedinici vremena (zbog povećanja ukupne mase zidova iz koje se vrši emisija), u odnosu na smanjenje broja fotona koji u jedinici vremena uspevaju da napuste zidove, a koje se javlja zbog samoapsorpcije usled povećanja gustine. Kao rezultat ovoga, došlo je do povećanja jačine apsorbovane doze gama zračenja u drugom slučaju (pri gustini matrice od 2.000 kg m<sup>-3</sup>), u odnosu na prvi (gustina matrice 1.500 kg m<sup>-3</sup>).

### 4. Zaključak

Na osnovu dobijenih simuliranih vrednosti jačina apsorbovanih doza gama zračenja može se zaključiti da upotreba fosfogipsa sa sadržajem  $^{226}\text{Ra}$  oko  $500 \text{ Bq kg}^{-1}$  [12] u proizvodnji opeke, na ovakav način, ne predstavlja naročitu radijacionu opasnost za izloženost ljudi gama zračenju jer je sam tehnološki postupak proizvodnje, odnosno pečenja, doveo do minimiziranja radijacionih efekata.

Na osnovu sprovedenih Monte Karlo simulacija uočeno je da promena hemijskog sastava matrice nama naročitog uticaja na vrednosti jačina apsorbovanih doza i glavna činjenica koja utiče na vrednosti ove veličine je nivo radioaktivnosti odnosno koncentracije aktivnosti radionuklida. Promena gustine od  $1.500 \text{ kg m}^{-3}$  do  $2.000 \text{ kg m}^{-3}$  daje povećanje jačine apsorbovane doze gama zračenja za oko 10 %.

Dakle, prema dobijenim rezultatima može se zaključiti da ovakav način iskorišćavanja fosfogipsa daje pozitivne efekte. Ovakvim načinom iskorišćenja otpadnog fosfogipsa smanjile bi se velike količine otpada i dobila bi se i velika ekonomska korist.

### 5. Zahvalnica

Autori se zahvaljuju na finansijskoj podršci od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije (Ev. br. 451-03-9/2021-14/ 200125).

### 6. Literatura

- [1] M.B. Nisti, M.P. de Campos. B P. Mazzilli. Natural radionuclides content and radon exhalation rate from Brazilian phosphogypsum piles. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 299(1), 2014, 261–264.
- [2] P. Kuzmanović, N. Todorović, S. Forkapić, L. Filipović Petrović, J. Knežević, J. Nikolov, B. Miljević. Radiological characterization of phosphogypsum produced in Serbia. *Radiat. Phys. Chem.* 166, 2020, 108463.
- [3] A.M. Rashad. Phosphogypsum as a construction materijal. *J. Clean. Prod.* 166, 2017, 732–743,
- [4] M S. Al-Hwaiti. Assessment of the radiological impacts of treated phosphogypsum used as the main constituent of building materijals in Jordan. *Environ. Earth. Sci.* 74(4), 2015, 3159–3169.
- [5] H. El-Didamony, M.M. Ali, N.S Awwad, M.M. Fawzy, M.F. Attallah. Treatment of phosphogypsum waste using suitable organic extractants. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 291, 2012, 907–914.
- [6] H. El-Didamony, H.S. Gado, N.S. Awwad, M.M. Fawzy M.F. Attallah. Treatment of phosphogypsum waste produced from phosphate ore processing. *J. Hazard. Mater.* 244-245, 2013, 596–602.
- [7] D. Nizevičienė, D. Vaičiukynienė, B. Michalik, M. Bonczyk, V. Vaitkevičius V. Jusas, The treatment of phosphogypsum with zeolite to use it in binding materijal. *Constr. Build. Mater.* 180, 2018, 134–142.
- [8] L. Ajam, A. Ben El Haj Hassen, N. Reguigui. Phosphogypsum utilization in fired bricks: Radioactivity assessment and durability. *J. Build. Eng.* 26, 2019. 100928.
- [9] L. Ajam, M.B. Ouezdou, H.S. Felfoul, R. El Mensi. Characterization of the Tunisian phosphogypsum and its valorization in clay bricks, *Constr. Build. Mater.* 23(10), 2009, 3240-3247.
- [10] M. Contreras, S.R. Teixeira, G.T.A. Santos, M.J. Gázquez, M. Romero, J.P. Bolívar. Influence of the addition of phosphogypsum on some properties of ceramic tiles *Constr. Build. Mater.* 175, 2018, 588-600.



- [11] S. Turkel and E. Aksin. A comparative study on the use of fly ash and phosphogypsum in the brick production. *Sadhana, Indian Academy of Sciences* 37(5), 2012, 595–607.
- [12] P. Kuzmanović, N. Todorović, D. Mrđa, S. Forkapić, L. Filipović Petrović, B. Miljević, J. Hansman, J. Knežević. The possibility of the phosphogypsum use in the production of brick: radiological and structural characterization. *J. Hazard Mater.* 413, 2021, 125343.
- [13] J. Knezević, P. Kuzmanović, D. Mrdja, N. Todorović, I. Bikit, J. Hansman. Estimation of absorbed gamma dose rate from granite by Monte Carlo simulation approach. *J. Radiol. Prot.* 40, 2020, 596–611.
- [14] S. Agostinelli, et al. GEANT4 - A simulation toolkit. *Nucl. Instrum. Meth. A.* 506, 2003, 250–303.
- [15] Geant4 Collaboration, 2015. Geant4 Installation Guide. <http://geant4-userdoc.web.cern.ch/geant4-userdoc/UsersGuides/InstallationGuide/BackupVersions/V10.2/html/index.htm>.
- [16] P. Kuzmanović, N. Todorović, J. Nikolov, J. Knežević, B. Miljević. Radiological, structural and chemical characterization of raw materijals and ceramic tiles in Serbia, *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 323(2), 2020, 861–874.
- [17] UNSCEAR, 2008. Sources and effects of ionizing radiation, Report to the General Assembly with Scientific Annexes, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Annex A and B, United Nations, New York, USA. 2008.
- [18] UNSCEAR, 1993. Sources, Effects and risks of ionizing radiation (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, United Nations New York. 1993.
- [19] L. Koblinger. Calculation of exposure rates from gamma sources in walls of dwelling rooms. *Health Phys.* 34, 1978, 459–463.
- [20] S.R. Soniya, S. Abraham, M.U. Khandaker, P.J. Jojo. Investigation of diffusive transport of radon through bricks, *Radiat. Phys. Chem.* 2020, 108955.

**PHOSPHOGYPSUM RECYCLING IN BRICK PRODUCTION AND ESTIMATION OF ABSORBED GAMMA DOSE RATE BY MONTE CARLO SIMULATIONS**

**Predrag KUZMANOVIĆ<sup>1,2</sup>, Dušan MRĐA<sup>1</sup>, Sofija FORKAPIĆ<sup>1</sup>, Nataša TODOROVIĆ<sup>1</sup>, Bojan MILJEVIĆ<sup>3</sup> and Jovana KNEŽEVIĆ<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), [mrdjad@df.uns.ac.rs](mailto:mrdjad@df.uns.ac.rs), [sofija@df.uns.ac.rs](mailto:sofija@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)*

2) *Academy of applied studies in Šabac, Department of medical and business-technological studies, Laboratory for Physics, Šabac, Serbia, [predrag.kuzmanovic@vmpts.edu.rs](mailto:predrag.kuzmanovic@vmpts.edu.rs)*

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 by-product of the phosphoric acid production process that contains an increased content of  $^{226}\text{Ra}$ , as well as a significant number of heavy metals. The main goal of this paper is to recycle waste phosphogypsum in brick production by adding clay in different proportions and to examine the potential radiological impact on humans in terms of gamma radiation. 8 samples of bricks with a phosphogypsum content of 0–40 % were produced and baked at 1000 °C. Measurements of  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  and  $^{40}\text{K}$  in the samples were performed by gamma spectrometry, while the chemical composition of the brick samples was determined by X-ray fluorescence analysis (XRF). The obtained data were used to estimate the f the absorbed gamma dose rates using Monte Carlo simulations. The influence of chemical composition and brick density on the values of the absorbed doses of gamma radiation was investigated. It was noticed that the chemical composition of the brick has no special influence, while the influence of density on the obtained values variate for about 10 %. In addition, it is concluded that recycling phosphogypsum in this way gives positive effects in terms of the risk of gamma radiation exposure of the public.

## DA LI JE AKCIDENT U ČERNOBILU DOMINANTAN IZVOR DEPOZICIJE CEZIJUMA U REGIONU?

**Sofija FORKAPIĆ<sup>1</sup>, Kristina KALKAN<sup>2</sup>, Kristina BIKIT<sup>1</sup>,  
Dušan MRĐA<sup>1</sup>, Jan HANSMAN<sup>1</sup>, Milivoj GAVRILOV<sup>2</sup>,  
Slobodan MARKOVIĆ<sup>2</sup> i Jovana KNEŽEVIĆ<sup>1</sup>**

- 1) Univerzitet u Novom Sadu, Prirodno-matematički fakultet, Departman za fiziku, 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), [jan.hansman@df.uns.ac.rs](mailto:jan.hansman@df.uns.ac.rs), [jovana.knezevic@df.uns.ac.rs](mailto:jovana.knezevic@df.uns.ac.rs)
- 2) Univerzitet u Novom Sadu, Prirodno-matematički fakultet, Departman za geografiju, turizam i hotelijerstvo, Novi Sad, Srbija, [kristina.kalkan@dgt.uns.ac.rs](mailto:kristina.kalkan@dgt.uns.ac.rs), [milivoj.gavrilov@dgt.uns.ac.rs](mailto:milivoj.gavrilov@dgt.uns.ac.rs), [slobodan.markovic@dgt.uns.ac.rs](mailto:slobodan.markovic@dgt.uns.ac.rs)

### SADRŽAJ

*U cilju rešavanja dileme da li je Černobil ili testiranje nuklearnog oružja dominantan izvor cezijuma u Vojvodini i regionu, ispitane su korelacije između koncentracija aktivnosti cezijuma u površinskom sloju zemljišta i prostorne raspodele precipitacija u periodu neposredno nakon akcidenta od aprila 1986. do decembra 1987. godine. Najbolje korelacije između količina padavina i sadržaja <sup>137</sup>Cs dobijene su za dva kišna perioda od 2-5. i od 7-21. maja 1986. Daljom klaster analizom izdvojena su četiri različita regiona prema depoziciji <sup>137</sup>Cs i padavinama za pomenuti kišni period što je dalje analizirano i potvrđeno rekonstrukcijom vetrova za region Vojvodine na osnovu sinoptičkih karti Evrope od 2 - 9. maja 1986. iz baze podataka DVD. Dobijeni rezultati u okviru ove studije se mogu primeniti u različitim oblastima, kao što su: geološka istraživanja, toksikologija životne sredine, radioekologija, upravljanje rizikom i zdravljem, a naročito u oblasti istraživanja procesa erozije zemljišta na lokalnom i regionalnom nivou.*

### 1. Uvod

<sup>137</sup>Cs je radionuklid antropogenog porekla koji predstavlja najoptimalniji i najčešće korišćeni traser za ispitivanje erozivnih procesa zbog relativno dugog perioda poluraspada od 30,17 godina i brzog i preciznog određivanja u uzorcima zemljišta gama-spektrometrijskom metodom. Do oslobađanja ovog radionuklida u atmosferu i njegovog taloženja u životnoj sredini dolazi tokom testiranja nuklearnog oružja u periodu od 1945. do 1963. [1, 2] ili nakon nuklearnih akcidenata koji su se dominantno dešavali na Severnoj Hemisferi, kao što su akcidenti u Černobilu ili u Fukušimi [3]. Razlika u ovim izvorima radiocezijuma je što tokom nuklearnog testiranja radioaktivni materijal dospeva u gornje slojeve troposfere ili u stratosferu gde se zadržava do godinu dana, nakon čega se postepeno taloži na površinu Zemlje suvim taloženjem ili padavinama. U tom slučaju, raspodela radionuklida ima globalni karakter sa dominantnim taloženjem 1963. godine [2]. Prema podacima koji su prikupljeni i obrađeni neposredno pre akcidenta u Černobilu, region Srbije je nuklearnim testiranjem dobio od 2,5-3,0 kBq/m<sup>2</sup> površinske kontaminacije [4].



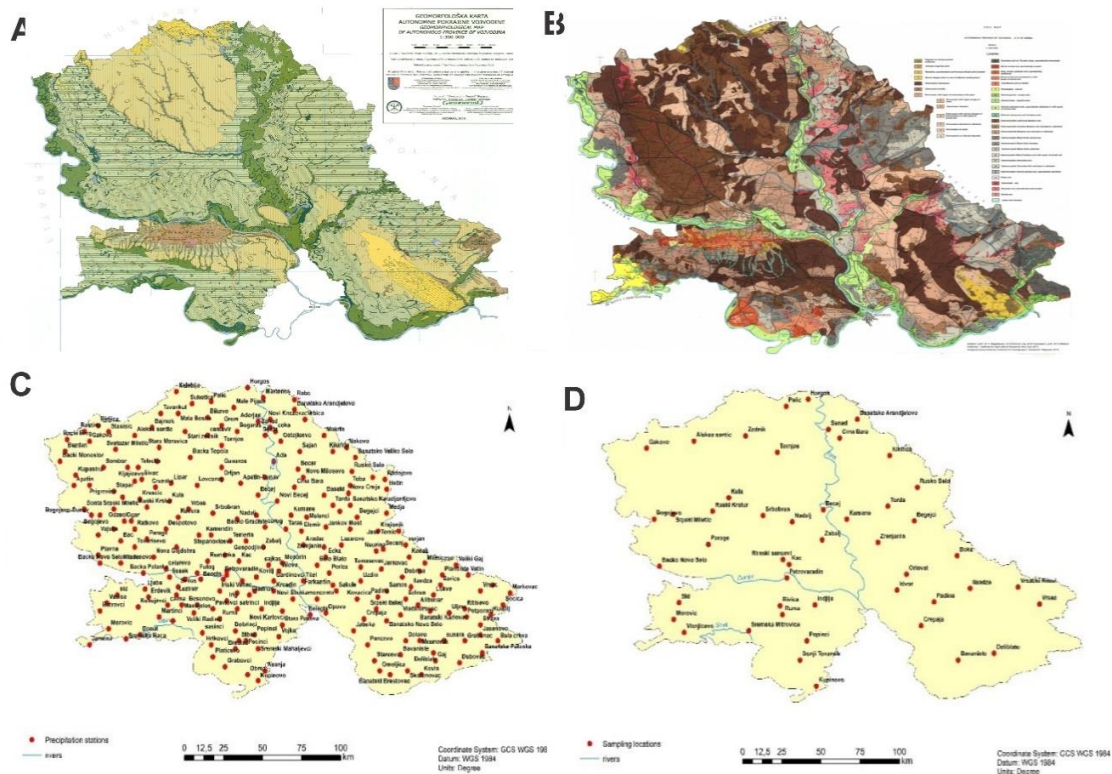
**Slika 1. Globalni i lokalni karakter nuklearnog testiranja i nuklearnih akcidenata [5].**

Međutim kod nuklearnih akcidenata radioaktivne čestice dospevaju u terestrijalne slojeve atmosfere zbog čega prostorna raspodela taloženja ima lokalni/regionalni karakter i snažno je uslovljena meteorološkim parametrima, kao što su pravac vetrova i padavine u regionu od interesa [5, 6]. Postoje podaci da je površinska kontaminacija cezijumom u nedeljama nakon Černobilskog akcidenta iznosila u opsegu od 1000-10000 Bq/m<sup>2</sup> [7, 8], dok akcident u Fukušimi nije imao značajne efekte na kontaminaciju atmosfere u Srbiji što pokazuju studije koje su sprovedene na našim prostorima u periodu nakon akcidenta [9, 6]. Glavni cilj ove studije je ispitati prostornu distribuciju površinske kontaminacije cezijumom u regionu Vojvodine za koji postoji najbolja statistika merenja cezijuma u površinskom sloju zemljišta i uporediti je sa distribucijom padavina tokom maja 1986. godine. Obrađeni su podaci o padavinama u periodu nakon akcidenta u Černobilu sa svih padavinskih stanica u neposrednoj blizini lokacija sa kojih je uzorkovano zemljište i putem klaster analize ispitane moguće korelacije sa koncentracijama cezijuma u zemljištu.

## **2. Područje istraživanja i metode merenja**

Prostorna analiza količine padavina obuhvatila je ukupno 246 padavinskih stanica na teritoriji Vojvodine. Korišćeni su podaci Pokrajinskog hidro-meteorološkog godišnjaka o dnevnim padavinama za period od 26. april 1986. do kraja 1987. godine koji su klasifikovani u nekoliko kišnih perioda na osnovu meteoroloških prilika i dinamike prolaska radioaktivnog oblaka nad regionom Vojvodine. Za podatke o površinskoj kontaminaciji radiocezijumom korišćene su vrednosti iz monitoringa radioaktivnosti zemljišta Vojvodine koji je sprovedla Laboratorija za nuklearnu fiziku, Departmana za fiziku PMF-a u Novom Sadu tokom 2001. godine [10, 11] na 50 odabranih lokacija (Slika 2) koje pokrivaju sve geomorfološke jedinice i tipove zemljišta u regionu Vojvodine [12]. Uzorci zemljišta su uzeti kompozitno iz površinskog sloja dubine do 30 cm i sa površine 10 m x 10 m, sušeni do konstantne mase na 105 °C, prosejani i homogeno pakovani u cilindričnu geometriju. Koncentracije aktivnosti <sup>137</sup>Cs su

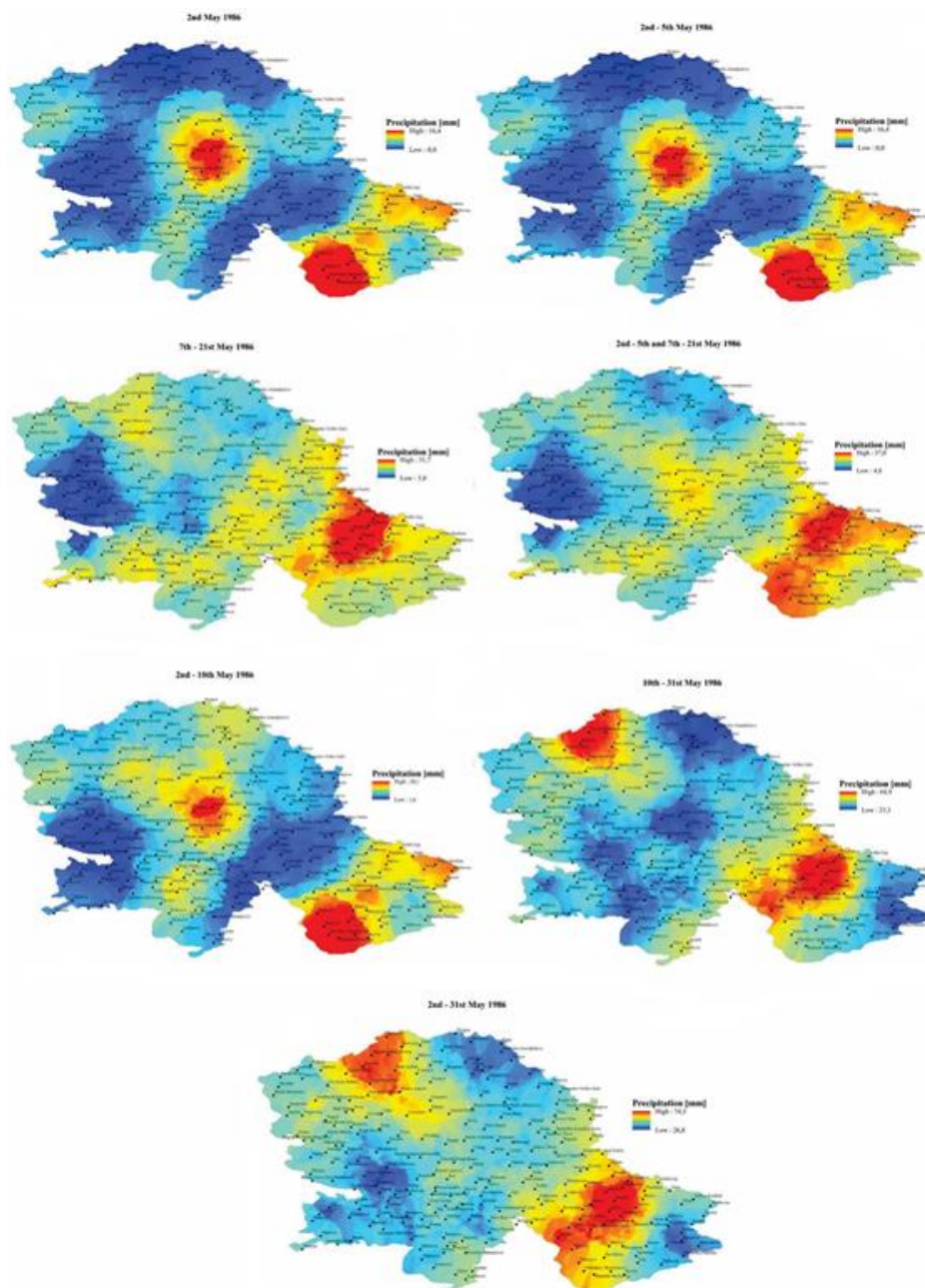
određene metodom nisko-fonske gama-spektrometrije na HPGe detektorima poznate efikasnosti za datu geometriju i matricu uzorka. Primenjena je linerna regresiona analiza za ispitivanje moguće korelacije koncentracija aktivnosti cezijuma i količina padavina za nekoliko izdvojenih intervala. Za prikazivanje prostorne raspodele i interpretaciju rezultata upotrebljen je Kriging interpolacioni metod za konačan broj lokacija [13]. Grupisanje padavinskih stanica sa sličnom količinom padavina i depozicijom cezijuma je izvršeno nehijerarhijskom klaster analizom (takođe poznatom kao K-means ili centroidna klaster metoda). Za statističke analize i vizuelizaciju podataka upotrebljeni su sledeći softveri: SPSS Statistics 17.0 i ArcMap 10.2.1 program.



**Slika 2. Geomorfološka mapa Vojvodine (A), pedološka karta Vojvodine (B), raspodela padavinskih stanica (C) i raspored 50 lokacija sa kojih je uzorkovano površinsko zemljište na području Vojvodine (D).**

### 3. Diskusija rezultata i zaključak

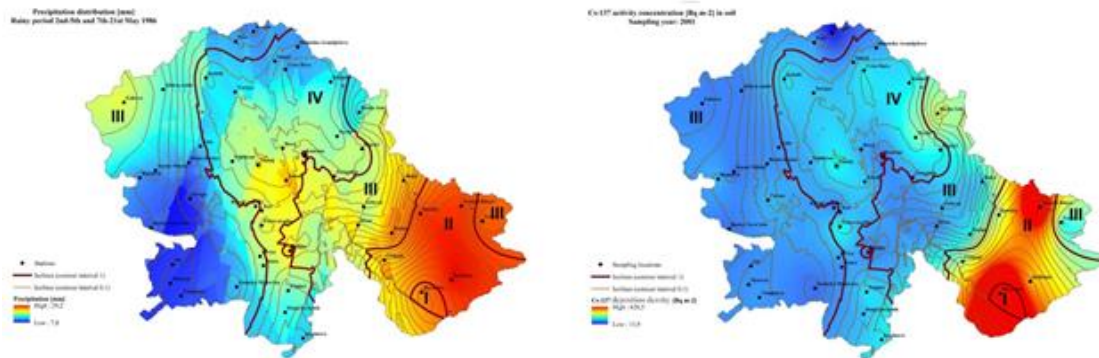
Detaljna analiza podataka sa padavinskih stanica i radova objavljenih neposredno nakon Černobilskog akcidenta [14] izdvajaju se sedam karakteričnih kišnih perioda u toku maja 1986.godine. Za preostale kišne periode u toku 1986. godine dobijene su negativne korelacije sa površinskom depozicijom cezijuma, osim za mesec july (Pirsonov koeficijent  $r = 0.09$ ) i decembar ( $r = 0.06$ ). U slučaju 1987. godine pozitivne korelacije su dobijene jedino u mesecu martu ( $r = 0.09$ ) i maju ( $r = 0.02$ ) zbog čega je izdvojen samo maj mesec 1986. i gore navedenih 7 perioda. Za svaki period Kriging metodom dobijene su prostorne raspodele padavina (Slika 3).



**Slika 3. Prostorna raspodela količina padavina za svaki izdvojeni kišni period u toku maja 1986. godine u Vojvodini.**

Precipitacije za svaki selektovani kišni period su upoređene sa koncentracijama aktivnosti cezijuma u površinskom sloju zemljišta (za ukupno 49 padavinskih stanica u neposrednoj blizini lokacija uzorkovanja). Najbolja korelacija je dobijena za kišni period od 2 – 5. maja i od 7-21. maja sa vrednošću Pirsonovog koeficijenta  $r = 0.3$ . Za dati kišni period izvršena je regionalizacija područja Vojvodine na 5 regiona u SPSS programu zadavanjem unapred broja klastera. Pomoću ArcMap programa Kriging metodom vizuelizovana je prostorna raspodela regiona koje povezuju generisane izolinije (Slika 4). Izolinije za region 5 nisu prikazane zbog toga što program izdvaja ovu vrednost kao najveću i u odnosu na nju računa i prikazuje izolinije, tako da je klaster 5 pripojen hijerarhijski prvom nižem klasteru 4. Region 1-lokacija Bavanište – lokacija sa najvećom površinskom depozicijom cezijuma i izdvojena kao poseban

region. Region 2 (4 lokacije) obuhvata Banat južno od reke Tamiš i naselja: Crepaja, Ilandža, Deliblato i Vršački Ritovi. Region 3 (24 lokacije) - Vršac, Boka, Padina, Idvor, Orlovat, Rusko Selo, Indija, Rimski Šančevi, Sremska Mitrovica, Rivica, Ruma, Višnjicevo, Morović, Šid, Bačko Novo Selo, Kula, Parage, Bogojevo, Srpski Miletić, Ruski Krstur, Aleksa Šantić, Gakovo, Palić i Horgoš. Region 4 (20 lokacija) – obuhvata centralni deo Vojvodine sa sledećim naseljima: Žednik, Tornjoš, Srbobran, Nadalj, Kač, Petrovaradin, Popinci, Donji Tovarnik, Kupinovo, Žabalj, Bečej, Kumane, Zrenjanin, Maglić, Begejci, Torda, Kikinda, Crna Bara, Sanad i Banatsko Aranđelovo.



**Slika 4. Regionalizacija Vojvodine klaster analizom: levo prema količini padavina od 2 – 5. maja i od 7-21. maja 1986. i desno prema površinskoj depoziciji cezijuma.**

Pretpostavljajući da je dominantno taloženje  $^{137}\text{Cs}$  putem padavina, veliki uticaj na depoziciju je imao i pravac visinskih vetrova. Smer vazdušnih strujanja za područje severne Srbije može se rekonstruisati na osnovu vremenskih karti Evrope za period od 2. do 9. maja 1986. godine (preuzeto sa Deutscher Wetterdienst - DVD na osnovu rezultata simulacije radioaktivnih oblaka Instituta IRSN za dati period) [16]. Tokom čitavog ovog perioda preko centralnog dela kontinenta održava se anticiklon koji je najviše uticao na vremenske prilike na području Vojvodine. Primenom geostrofičke aproksimacije [17] za procenu vetra na osnovu izgleda baričkog polja može se zaključiti da su vetrovi iznad Vojvodine bili slabiji nego u drugim delovima kontinenta. Snažan ciklon u Istočnoj Evropi podigao je radioaktivne čestice sa podloge do visine na kojoj se zahvaljujući visinskim vetrovima, zagađenje širilo okolo. Deo zagađenja koje je stiglo do slabijih vetrova iznad Severne Srbije prisilno je deponovano na površinu Vojvodine na dva načina: opštim spuštanjem u grebenu i padavinama od 2. do 9. maja 1986.

Ovaj zaključak se potvrđuje i dobijenom najboljom korelacijom između površinske kontaminacije cezijumom i količine padavina u periodu od 2 - 5. i od 7 – 21. maja 1986. godine ( $r = 0.3$ ). Klasifikovani su regioni Vojvodine (Slika 4) prema količini padavina i prostornoj distribuciji cezijuma u površinskim slojevima zemljišta regiona Vojvodine što dokazuje hipotezu da je Černobilski akcident dominantan izvor cezijuma na ovim prostorima. Region sa najvišim vrednostima koncentracije cezijuma u zemljištu su Južni Banat (I i II region) i centralni deo Vojvodine (IV region). Ova analiza je bila značajna i za istraživanje procesa erozije/depozicije na ovom području jer potvrđuje 1986. godinu kao godinu totalnog taloženja umesto 1963. što daje bolje rezultate u procenama brzine erozije konverzionim modelima.

#### 4. Zahvalnica

Istraživanja je finansiralo Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije (Ev. br. 451-03-9/2021-14/ 200125).

**5. Literatura**

- [1] Ritchie, J.C., McHenry, J.R.. Application of Radioactive Fallout Cesium-137 for Measuring Soil Erosion and Sediment Accumulation Rates and Patterns: A Review. *J. Environ. Qual.* 19, 1990, 215–233.
- [2] Walling, D.E., *Use Of 137 Cs And Other Fallout Radionuclides In Soil Erosion Investigations: Progress, Problems And Prospects*, 1998.
- [3] Dercon, G., Mabit, L., Hancock, G., Nguyen, M.L., Dornhofer, P., Bacchi, O.O., Benmansour, M., Bernard, C., Froehlich, W., Golosov, V.N.. Fallout radionuclide-based techniques for assessing the impact of soil conservation measures on erosion control and soil quality: an overview of the main lessons learnt under an FAO/IAEA Coordinated Research Project. *J. Environ. Radioact.* 107, 2012, 78–85.
- [4] Bergkvist, N.-O., Ferm, R., *Nuclear Explosions 1945-1998*, Defense research establishment, Division of Systems and Underwater Technology. Stockholm, 2000.
- [5] Fulajtar, E., Mabit, L., Renschler, C.S., Lee, A., Yi, Z., Use of 137 Cs for soil erosion assessment. Food and Agriculture Organization of the United Nations, International Atomic Energy Agency, Rome, Italy, 2017.
- [6] Todorović, D., Rajačić, M., Janković, M., Krneta Nikolić, J., Sarap, N., Pantelić, G., Atmospheric radioactivity at the Vinča Institute of Nuclear Sciences in the period 1985-2015, in: *Cernobilj 30 Years After*. Radiation Protection Society of Serbia and Montenegro, 2016.
- [7] Bogojević, S., Tanasković, I., Arsić, V., Ilić, J., Radioactivity of the environment of the Republic of Serbia in the period 1985-2015, in: *Cernobilj 30 Years After*. Radiation Protection Society of Serbia and Montenegro, 2016.
- [8] Nivoi radioaktivne kontaminacije čovekove sredine i ozračenost stanovništva Jugoslavije 1986. godine usled havarije nuklearne elektrane u Černobilju, 1987.
- [9] Bikit, I., Mrda, D., Todorovic, N., Nikolov, J., Krmar, M., Veskovic, M., Slivka, J., Hansman, J., Forkapic, S., Jovancevic, N., Airborne radioiodine in northern Serbia from Fukushima. *J. Environ. Radioact.* 114, 2012, 89–93.
- [10] Bikit, I., Slivka, J., Čonkić, L., Krmar, M., Vesković, M., Žikić-Todorović, N., Varga, E., Čurčić, S., Mrdja, D., 2005. Radioactivity of the soil in Vojvodina (northern province of Serbia and Montenegro). *J. Environ. Radioact.* 78, 2005, 11–19
- [11] Forkapic, S., Vasin, J., Bikit, I., Mrdja, D., Bikit, K., Milić, S. Correlations between soil characteristics and radioactivity content of Vojvodina soil. *J. Environ. Radioact.* 166 (1), 2017, 104-111.
- [12] Hadžić, V., Sekulić, P., Vasin, J., Nešić, L. GEOLOŠKA OSNOVA ZEMLJIŠNOG POKRIVAČA VOJVODINE. *Ekonom. Poljopr.* 4, 2005, 429–438.
- [13] Kleijnen, J.P.C., Kriging. Methods and Applications. SSRN Electron. *J. Cent. Discuss. Pap. Ser. No.* 2017-047, 1–16.
- [14] Barišić, D., Košutić, K., Kvastek, K., Lulić, S., Tuta, J., Vertačnik, A., Vrhovac, A., Assessment of contamination of the territory of the SR Croatia by radioactive precipitation as a result of the accident at the Lenin NPP. *XIV Yugosl. Symp. Radiat. Prot.*, 1987.
- [15] Evangelidou, N., Balkanski, Y., Cozic, A., Møller, A.P. Simulations of the transport and deposition of <sup>137</sup>Cs over Europe after the Chernobyl NPP accident: influence of varying emission-altitude and model horizontal and vertical resolution. *Atmos. Chem. Phys* 13, 2013, 7183–7198.



- [16] K.Kalkan, S. Forkapić, S. Marković, M. Gavrilov, K. Bikit-Schroeder, D. Mrđa, M.Radaković, R. Tošić: Deposition of  $^{137}\text{Cs}$  and precipitation distribution in Vojvodina, Northern Serbia after the Chernobyl accident, *Chemosphere*, 264 (2), 2021.
- [17] M. Gavrilov. Frequency of quasi-geostrophic modes over grid points and definition of geostrophic wind. *Időjárás* 89, 1985, 77–85

**IS THE ACCIDENT IN CHERNOBYL A DOMINANT SOURCE OF CESIUM DEPOSITION IN THE REGION?**

**Sofija FORKAPIĆ<sup>1</sup>, Kristina KALKAN<sup>2</sup>, Kristina BIKIT<sup>1</sup>,  
Dušan MRĐA<sup>1</sup>, Jan HANSMAN<sup>1</sup>, Milivoj GAVRILOV<sup>2</sup>,  
Slobodan MARKOVIĆ<sup>2</sup> and Jovana KNEŽEVIĆ<sup>1</sup>**

- 1) *University of Novi Sad, Faculty of Sciences, Department of Physics, 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), [jan.hansman@df.uns.ac.rs](mailto:jan.hansman@df.uns.ac.rs), [jovana.knezevic@df.uns.ac.rs](mailto:jovana.knezevic@df.uns.ac.rs)*
- 2) *University of Novi Sad, Faculty of Sciences, Department of Geography, Tourism and Hotel Management, Novi Sad, Serbia, [kristina.kalkan@dgt.uns.ac.rs](mailto:kristina.kalkan@dgt.uns.ac.rs), [milivoj.gavrilov@dgt.uns.ac.rs](mailto:milivoj.gavrilov@dgt.uns.ac.rs), [slobodan.markovic@dgt.uns.ac.rs](mailto:slobodan.markovic@dgt.uns.ac.rs)*

**ABSTRACT**

In order to resolve the dilemma of whether Chernobyl accident or nuclear weapons testing is the dominant source of cesium in Vojvodina and the region, correlations between activity concentrations of cesium in the surface soil and spatial distribution of precipitation in the period immediately after the April 1986 till December 1987 were examined. The best correlations between precipitation amounts and <sup>137</sup>Cs content were obtained for two rainy periods of 2-5. and from 7-21. May 1986. Further cluster analysis identified four different regions according to <sup>137</sup>Cs deposition and precipitation for the mentioned rainy period, which was further analyzed and confirmed by the reconstruction of winds for the Vojvodina region based on synoptic maps of Europe from 2 to 9 May 1986 from the DVD database. The results obtained in this study can be applied in various fields, such as: geological research, environmental toxicology, radioecology, risk and health management, and especially in the field of soil erosion research at the local and regional level.

## PROCENA ZDRAVSTVENOG RIZIKA IZLOŽENOSTI RADONU IZ VODE U OPŠTINI NOVO BRDO

**Biljana VUČKOVIĆ<sup>1</sup>, Boban ĐOKIĆ<sup>1</sup>, Nataša TODOROVIĆ<sup>2</sup>,  
Jovana NIKOLOV<sup>2</sup> i Ljiljana GULAN<sup>1</sup>**

- 1) Univerzitet u Prištini sa privremenim sedištem u Kosovskoj Mitrovici, Prirodno-matematički fakultet, Lole Ribara 29, 38220 Kosovska Mitrovica, Srbija, [biljana.vuckovic@pr.ac.rs](mailto:biljana.vuckovic@pr.ac.rs), [boban.djokic@pr.ac.rs](mailto:boban.djokic@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, Trg Dositeja Obradovića 4, 21000 Novo 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

Postojanje radona u vodi za piće dovodi do unutrašnje izloženosti, direktno (kroz procese radioaktivnog raspada, ingestije i inhalacije) i indirektno (kada se kombinuju kao deo lanca ishrane). Merenje zastupljenosti radona u vodi za piće pomaže da se proceni rizik od izloženosti zračenju prilikom svakodnevne potrošnje vode. U ovom radu koncentracija aktivnosti radona u vodi sa alternativnih izvora snabdevanja na teritoriji opštine Novo Brdo merena je alfa spektrometrijskom metodom RAD7 uređajem (DurrIDGE Co.). Vrednost koncentracije kretala se u rasponu od  $2,3 \pm 0,4$  Bq/l do  $341 \pm 40$  Bq/l, srednje vrednosti od 61,8 Bq/l. Na osnovu ovih vrednosti određene su godišnje efektivne doze inhalacije, čija je srednja vrednost bila 156  $\mu$ Sv/y, kao i godišnje efektivne doze ingestije za određene starosne grupe, sledećih srednjih vrednosti: odojčad ( $\leq 1$  godine) 326,7  $\mu$ Sv/y, deca (2-17 godina) 120,3  $\mu$ Sv/y i odrasli ( $\geq 17$  godina) 157,8  $\mu$ Sv/y.

### 1. Uvod

Voda je neophodna za ljudski život i predmet je izučavanja brojnih ekoloških, geoloških i radioloških studija. U ruralnim i urbanim sredinama, gde ne postoji redovno snabdevanje vodom iz centralnih vodovoda, stanovništvo se snabdeva iz alternativnih izvora, u prvom redu iz izvora podzemnih mineralnih voda. Koncentracija radona u vodi koja ima široku upotrebu u domaćinstvu je funkcija različitih parametara, kao što su geomorfološke karakteristike vodonosnog sloja, načinu kretanja vode, interakciji voda - stena, sadržaju minerala u stenama [1]. Da bi se stanovništvo zaštitilo od posledica prekomernog izlaganja radonu u njihovom okruženju [2], neophodno je proceniti nivo radona u svakom izvoru, uključujući vodu iz domaćinstva, posebno vodu iz alternativnih izvora. Ingestija radona može prouzrokovati rak želuca čak i kada se radi o malim koncentracijama, dok voda sa povišenim nivoom radona može prouzrokovati difuziju radona u prostorije i povećati ukupni nivo radona i tako posredno, dovesti do povećanja rizika od raka pluća [3,4]. Prema preporuci US EPA [5] dozvoljena koncentracija radona u vodi za piće je 11 Bq/l, dok maksimalna zastupljenost radona u podzemnim vodama prema WHO iznosi 100 Bq/l [6].

### 2. Oblast istraživanja

U radu su predstavljeni rezultati istraživanja na šest lokacija u ruralnim oblastima na prostoru opštine Novo Brdo. Merena je koncentracija radona u prirodnim mineralnim vodama koja se tradicionalno koristi za piće, ali i u druge potrebe u domaćinstvu. Opština Novo Brdo se nalazi na jugoistočnom delu Kosova i Metohije u Pomoravskom regionu (42°36'N, 21°26'E) i u njoj živi 6729 stanovnika. Ovu opštinu karakterišu reke

sa malim kapacitetom vode, što znači da opština ima nedostatak vodnih resursa, tako da većina sela ima individualne sisteme koji se snabdevaju vodom sa prirodnim tokom, kao i individualnim sistemom bunara [7]. Novo Brdo obiluje stenama magmatskog porekla, granita i mermera, na samom mestu izbijanja voda u geološkoj stukturi terena preovlađuju kvarc, mermerne i granitoidne stene različitog metamorfizma [8]. Stenske mase podložne su fizičko-hemijskim promenama u površinskim delovima što omogućava akumuliranju vode u sistemima prslina i pukotina čiji je stepen promenljiv i zavisi od spoljašnjih uslova. Na ispitivanom terenu su zastupljene raznovrsne litostratigrafske jedinice u kojima su prema tipu poroznosti formirani različiti tipovi izdani.

### 3. Materijal i metode

Pre samog uzorkovanja izmerena je temperatura vode digitalnim termometrom (Testo Se & KGaA, Germany). Voda sa javnih česmi uzorkovana je u plastičnim flašama od 1,5 l koje su punjene u malom mlazu i do samog vrha, čime se želi izbeći uzburkavanje tečnosti u flaši, oslobađanje radona iz vode i njegovo nagomilavanje u slobodnom prostoru ispod samog zatvarača, pa su zato odmah zatvarane. Koncentracija radona u uzorcima vode merena je sistemom RAD7 RAD H2O (Durrige Co.), čija je donja granica detekcije manja od 0,37 Bq/l [9]. Detekcija radona u vodenim uzorcima izvršena je u Laboratoriji za ispitivanje radioaktivnosti uzoraka i doze jonizujućeg i nejonizujućeg zrčenja Prirodno-matematičkog fakulteta Univerziteta u Novom Sadu. Kako se koncentracija nije mogla izmeriti pri samom uzorkovanju, specijalnim adapterom je voda iz plastičnih flaša izlivana u staklene posude od 250ml, tako da u tabeli 1 figuriše korigovana vrednost koncentracije radona određene na osnovu formule [10]:

$$C_{corr} = C_o \times \delta \quad (1)$$

gde je:  $\delta = e^{-\lambda t}$ , pri čemu je konstanta za radonov raspad  $\lambda = \ln 2 / T_{1/2}$  i  $C_o$  (Bq/l) vrednost merena u laboratoriji nakon nekoliko dana, a  $t$  definiše vreme proteklo od datuma uzorkovanja do datuma laboratorijske analize.

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.

### 4. Rezultati i diskusija

#### 4.1. Detekcija radona

U tabeli 1 prikazani su sumirani rezultati istraživanja na istraživanim lokalitetima: temperatura  $T$  (°C), korigovana vrednost koncentracije radona u vodi  $C_{wRn}$  (Bq/l) i doprinos radona iz vode radonu u vazduhu  $C_{aRn}$  (mBq/l).

Ako se pogleda temperaturski raspon uzorkovanih voda od 11 °C do 16 °C, može se reći da uzorkovane vode pripadaju hladnim prirodnim vodama-akrotopegama. Kako se snabdevanje stanovništva pijaćom vodom vrši sa prirodnih izvorišta podzemnih voda na osnovu prikazanih rezultata u tabeli 1 može se uočiti da četiri lokaliteta (1, 3, 4 i 6) karakteriše koncentracija radona ispod preporučene US EPA vrednosti, u uzorku vode sa lokaliteta 5 koncentracija radona je bila malo iznad preporučene US EPA vrednosti, ali i mnogo niža od preporučene WHO vrednosti.

**Tabela 1. Sumirani rezultati istraživanja koncentracije radona u vodi na području opštine Novo Brdo.**

Broj uzorka	T (°C)	C <sub>wRn</sub> (Bq/l)
1	16	5,1±0,5
2	11,5	341±40
3	11	3,9±0,4
4	15,5	3,4±0,4
5	12	15,1±0,9
6	13,5	2,3±0,4
Min	11	2,3±0,4
Sr.vrednost	13,2	61,8
Max	16	341±40

Na području opštine Novo Brdo samo na jednoj lokaciji izmerena je izrazito visoka koncentracija radona u vodi  $341 \pm 40$  Bq/l (lokalitet 2), što je dosta iznad preporučene WHO vrednosti. Ovako visoka koncentracija radona u vodi posledica je geološke građe terena na kojoj se nalazi izvorište. Iako celokupna teritorija opštine Novo Brdo obiluje stenama magmatskog porekla, granita i mermera, na samom mestu izbijanja u geološkoj stukturi terena preovlađuju kvarc, mermerne i granitoidne stene različitog metamorfizma [7].

#### 4.2. Godišnje efektivne doze inhalacije i ingestije

Kancerogeno delovanje radona, u dugoročnom smislu, odnosi se na određivanje godišnjih efektivnih doza internog ozračivanja radonom rastvorenim u vodi, i to: efektivne doze inhalacije i efektivne doze ingestije radona. Proračunate vrednosti godišnjih efektivnih doza ihnalacije i ingestije prezentovane su u tabeli 2.

**Tabela 2. Godišnje efektivne doze inhalacije i ingestije.**

Broj uzorka	E <sub>inh</sub> (μSv/y)	E <sub>ing</sub> (μSv/y)		
		Odojčad (≤ 1)	Deca (2-17)	Odrasli (≥ 17)
1	12,8±1,3	26,9±2,6	9,9±0,9	13,0±1,3
2	860±101	1803,9±212	663,9±78	871,2±102
3	9,8±1,0	20,6±2,1	7,6±0,7	9,9±1,0
4	8,6±1,0	18,0±2,1	6,6±0,7	8,6±1,0
5	38,1±2,3	78,9±4,7	29,4±1,7	38,5±2,3
6	5,8±1,0	12,1±2,1	4,5±0,7	5,8±1,0
Min	5,8±1,0	12,1±2,1	4,5±0,7	5,8±1,0
Sr.vrednost	156	326,7	120,3	157,8
Max	860±101	1803,9±212	663,9±78	871,2±102

Pošto se vode sa istraživanih lokaliteta koriste i za piće i za druge potrebe domaćinstva, godišnja efektivna doza inhalacije određena je na sledeći način [11,12]:

$$E_{inh} = C_{wRn} \times R \times D \times T \times F = C_{wRn} \times 2,52 \quad (2)$$

gde je:  $C_{wRn}$  koncentracija radona u vodi (Bq/l), R je odnos koncentracije radona oslobođenog iz vode u vazduh i koncentracije radona u vodi iznosi  $10^{-4}$ , D je dozni faktor konverzije (9 nSv/h za 1 Bq/m<sup>3</sup>), F je ravnotežni faktor - 0,4, T je prosečno vreme provedeno u zatvorenom prostoru – 7000 h/y [13]. Raspon izračunatih vrednosti efektivnih doza inhalacije je u intervalu od  $5,8 \pm 1,0$   $\mu$ Sv/y do  $860 \pm 101$   $\mu$ Sv/y, srednje vrednosti od 156  $\mu$ Sv/y.

Posebnu pažnju treba obratiti na dozu zračenja kojoj su deca izložena, jer ona imaju veći faktor rizika zbog intenzivnog rasta kostiju i zato treba preduzeti velike korake da se ograniči njihovo izlaganje na bilo koji način [14], a što je i razlog postojanja odvojenih kolona u tabeli 2 sa proračunatim vrednostima doza ingestije za tri različite starosne grupe: odojčad ( $\leq 1$ ), deca (2-17) i odrasli ( $\geq 17$ ). Efektivne doze ingestije određene su pomoću obrasca [13, 14]:

$$E_{ing} = C_{wRn} \times A_i \times D_f \quad (3)$$

gde je:  $C_{wRn}$  koncentracija radona u vodi (Bq/l),  $A_i$  je vrednost godišnjeg unosa vode (l/y): za odojčad - 230, za decu - 330 i za odrasle - 730 [15],  $D_f$  je faktor konverzije ingestione doze za radon (nSv/Bq): za novorođenčad ( $\leq 1$ ) - 23, za decu (2–17) - 5,9 i za odrasle ( $\geq 17$ ) - 3,5 [16].

Srednje vrednosti efektivnih doza ingestije za decu – 120,3  $\mu$ Sv/y i odrasle – 157,8  $\mu$ Sv/y, dok je srednja vrednost efektivne doze ingestije za odojčad – 326,7  $\mu$ Sv/y. Usled razlike u metabolizmu i manjoj težini organa kod odojčadi su zabeležene znatno veće efektivne doze ingestije nego kod dece i odraslih. Takođe, kod odojčadi su i efektivne doze ingestije mnogo veće od efektivnih doza inhalacije, što navodi na zaključak da je želudačno tkivo izloženije ozračivanju od bronhijalnog.

Ukoliko se izuzmu visoke vrednosti efektivnih doza inhalacije i ingestije na lokalitetu 2, efektivne doze inhalacija i ingestija na ispitivanim lokalitetima ispod preporučene vrednosti od 100  $\mu$ Sv/y [6] i na ovim mestima nisu potrebne dodatne mere opreza prilikom korišćenja. U slučaju konzumiranja vode sa lokaliteta 2 potrebno je preduzeti određene korake kako bi se koncentracija radona u vodi smanjivala, u prvom redu njena aeracija. Generalno se može reći da se sa radiološkog aspekta ove vode mogu koristiti za piće, ali i za širu upotrebu.

### 5. Zaključak

Istraživanjem su obuhvaćeni alternativni izvori vodom na 6 lokaliteta u ruralnim sredinama opštine Novo Brdo. Rezultati pokazuju da se koncentracija radona u vodi kreće od  $2,3 \pm 0,4$  Bq/l do  $341 \pm 40$  Bq/l, srednje vrednosti od 61,8 Bq/l. Zastupljenost radona u vodi sa ispitivanih lokaliteta je ispod preporučene WHO vrednosti, osim koncentracije radona u vodi na lokalitetu 2- $341 \pm 40$  Bq/l. Posmatrajući geološku strukturu terena može se reći da je ona odgovorna za ovako visoku vrednost koncentracije radona, jer merno mesto 2 leži na terenu gde preovlađuju kvarc, mermerne i granitoidne stene različitog metamorfizma. Srednja vrednost efektivne doze inhalacije je 156  $\mu$ Sv/y, dok su srednje efektivne doze ingestije različitih starosnih grupa sledeće: za odojčad – 326,7  $\mu$ Sv/y, za decu – 120,3  $\mu$ Sv/y i odrasle – 157,8  $\mu$ Sv/y.

Proračunate efektivne doze inhalacije i ingestije na pet ispitivanih lokaliteta su ispod preporučene vrednosti od 100  $\mu\text{Sv}/\text{y}$ , dok lokalitet 2 karakterišu vrednosti efektivnih doza inhalacije i ingestije iznad preporučenih vrednosti. Posmatrajući srednje vrednosti istraživanih parametara može se zaključiti da je sa radiološkog aspekta voda ispravna i da se može koristiti kako za piće, tako i za druge potrebe u domaćinstvu. Rezultati prezentovani u ovom radu mogu poslužiti kao osnova u dalje radu na istraživanju kvaliteta voda za piće sa alternativnih izvora snabdevanja.

### 6. Zahvalnica

Rad je podržan od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije ugovorom br. 451-03-9/2021-14/200123.

### 7. Literatura

- [1] O.M. Isinkaye et al. Annual effective dose from  $^{222}\text{Rn}$  in groundwater of a Nigeria University campus area, *Applied Water Science* 11, 2021, 85.
- [2] I. Opoku-Ntim et al. Annual effective dose of radon in groundwater samples for different age groups in Obuasi and Offinso in the Ashanti Region, Ghana, *Environ. Res. Commun.* 1(10), 2019, 105002.
- [3] K.M.Thabayneh. Measurement of  $^{222}\text{Rn}$  concentration levels in drinking water and the associated health effects in the Southern part of West Bank—Palestine, *Appl. Radiat. Isot.* 103, 2015, 48–53.
- [4] M.Inaciom et al. Radon concentration assessment in water sources of public drinking of Covilhã's county, Portugal, *J. Radiat. Res. Appl. Sci.* 10 (2), 2017, 135-139.
- [5] USEPA, US Environmental Protection Agency, Radon in drinking water health risk reduction and cost analysis. EPA Federal Register 64 (USEPA, Office of Radiation Programs), Washington, DC, 1999.
- [6] WHO, World Health Organization. Guidelines for drinking water quality. 3rd ed. WHO Press, Geneva, 2004.
- [7] Opštinski razvojni plan Novo Brdo, (2013)  
<https://helvetas-ks.org/wp/wp-content/uploads/2013/08/Opstinski-Razvojni-Plan-Novo-Brdo.pdf>
- [8] Geološka karta Srbije, Geološka mapa br.2 – drugo izdanje, 1: 2.000000. Ministarstvo rudarstva i energetika Srbije i Geomagnetni Institut, Barex, Beograd, 1999.. <http://geoliss.mre.gov.rs/karte/geomorf300.html>
- [9] RAD7 RAD H<sub>2</sub>O, Radon in Water Accessory, DURRIDGE Co., USA, 2012.
- [10] N. Todorović et al. Public exposure to radon in drinking water in Serbia. *Appl. Radiat. Isot.* 70, 2012a, 543–549.
- [11] E.H. El-Araby et al. Measurement of radon levels in water and the associated health hazards in Jazan, Saudi Arabia, *J. Radiat. Res. Appl. Sci.* 12(1), 2019, 31–36.
- [12] UNSCEAR, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiations. Report to the General Assembly, With Scientific Annexes, United Nations Sales Publication E.94.IX.2; United Nations: New York, 1993.
- [13] UNSCEAR, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiations. Report to general assembly with scientific annexes. Annex B, New York, 2000.
- [14] V. Duggal et al. Risk assessment of radon in drinking water in Khetri Copper Belt of Rajasthan, India. *Chemosphere* 239, 2020, 124782

- [15] WHO, World Health Organisation. Guidelines for Drinking Water Quality, Vol. 1. pp.197-209,WHO Press, Geneva, 1988.
- [16] UNSCEAR, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiations. Sources and Effects of Ionizing Radiation, Report to the General Assembly, with Scientific Annexes, Volume I, Annex A, New York, 2000.



HEALTH RISK ASSESSMENT OF RADON EXPOSURE FROM DRINKING  
WATER IN THE MUNICIPALITY OF NOVO BRDO

**Biljana VUČKOVIĆ<sup>1</sup>, Boban ĐOKIĆ<sup>1</sup>, Nataša TODOROVIĆ<sup>2</sup>,  
Jovana NIKOLOV<sup>2</sup> and Ljiljana GULAN<sup>1</sup>**

- 1) *University of Priština in Kosovska Mitrovica, Faculty of Science and Mathematics, Lole Ribara 29, 38220 Kosovska Mitrovica, Serbia, [biljana.vuckovic@pr.ac.rs](mailto:biljana.vuckovic@pr.ac.rs), [boban.djokic@pr.ac.rs](mailto:boban.djokic@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, Trg Dositeja Obradovića 4, 21000 Novo 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 existence of radon in drinking water leads to internal exposure, directly (through the processes of radioactive decomposition, ingestion and inhalation) and indirectly (when combined as part of the food chain). Measuring the presence of radon in drinking water helps to assess the risk of radiation exposure during daily water consumption. In this paper, the concentration of radon activity in water from alternative supply sources in the municipality of Novo Brdo was measured by the alpha spectrometric method RAD7 device (DurrIDGE Co.). The concentration value ranged from  $2.3 \pm 0.4$  Bq/l to  $341 \pm 40$  Bq/l, with a mean value of 61.8 Bq/l. Based on these values, the annual effective inhalation doses were determined, with a mean value of 156  $\mu$ Sv/y, as well as the annual effective ingestion doses for certain age groups, with mean values of: infants ( $\leq 1$  year old) 326.7  $\mu$ Sv/y, children (2-17 years old) 120.3  $\mu$ Sv/y and adults ( $\geq 17$  years old) 157.8  $\mu$ Sv/y.

## LONG-TERM VARIATIONS IN TRITIUM ACTIVITY CONCENTRATION IN PRECIPITATION REFLECT THE SOLAR ACTIVITY CYCLE

Damir BORKOVIĆ and Ines KRAJCAR BRONIĆ

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

### ABSTRACT

*Long-term record (1976-2020) of tritium activity concentration in precipitation in Zagreb, Croatia, was statistically analyzed by the frequency analysis, the Wavelet analysis and sinusoidal fitting. In addition to the 12-month period due to the seasonal variations, strong evidence of the variations with the 10 – 12 year period was obtained by all applied methods. This period may be related to a solar cycle supporting the hypothesis of solar influence on meteoric tritium. A delay of about 30 months was observed between the maxima in the sunspot number and the minima in  $^3\text{H}$  activity concentration in precipitation and plausibly explained by the life cycle of tritium in the atmosphere. Our finding points to the importance of further monitoring of tritium in precipitation that could contribute to the atmospheric sciences. However, for studies of natural production and relation with the solar cycle, local effects (technogenic  $^3\text{H}$ ) should be minimized or absent.*

### 1. Introduction

Tritium ( $^3\text{H}$ ), the radioactive isotope of hydrogen, with the half-life of 12.32 years ( $4500 \pm 8$  days) [1], is of both cosmogenic and anthropogenic origin. Natural cosmogenic tritium is produced in the atmosphere from the interaction of cosmic radiation with atmospheric nitrogen and as tritiated water,  $\text{H}^3\text{HO}$ , enters the natural water cycle. The average natural tritium activity concentration in environmental waters prior to nuclear testing has been estimated to range from 1 to 8 TU [2]. *Note:* Tritium activity concentrations are here expressed in „tritium units“, TU, which is a widely used unit in atmospheric and hydrologic studies. One tritium unit (TU) is defined as one tritium atom per  $10^{18}$  atoms of hydrogen, equivalent to  $0.118 \text{ Bq l}^{-1}$ .

Anthropogenic production of tritium, both the “bomb-produced” tritium and technogenic tritium, has disturbed natural levels of tritium in the environment. The bomb-produced tritium has been a consequence of a series of thermonuclear atmospheric testing of fusion weapons between 1952 and 1963. The highest activity concentration of tritium of about 6000 TU was observed in 1963 in precipitation at the continental stations of the Northern Hemisphere [2-4]. After the ban/cessation of atmospheric thermonuclear tests in 1963, tritium activity concentrations began to decline gradually due to the relatively short half-life of tritium and exchange between the compartments of the hydrological cycle. The bomb-peak tritium labelled global precipitation and other types of water bodies in the hydrological cycle and for the past five decades of the 20th century tritium has been widely used to obtain time scales for various processes in oceanographic and hydrologic systems [5]. Tritium activity concentration in precipitation has been monitored by International Atomic Energy Agency (IAEA) and World Meteorological Organization (WMO) through a Global Network of Isotopes in Precipitation GNIP program [3]. However, the bomb-produced tritium is barely present in modern precipitation and the scientific value of tritium in precipitation for hydrological applications is no more as high as earlier.

Technogenic tritium is a source of local or regional tritium activity above the new natural level. It is produced in various industries, such as nuclear power plants, nuclear

reactors, future fusion reactors, fuel reprocessing plants, and is present in various commercial products [4].

Prevailing anthropogenic bomb tritium in precipitation before 1996 prevented studies on whether the natural production of (cosmogenic) tritium was influenced by variations in solar activities. Recently, it was shown that some long-term tritium activity data exhibited modulation of cosmogenic tritium in meteoric precipitation by the 11-year cycle of solar activity [6]. Local maxima in  $^3\text{H}$  activity concentration in precipitation at several stations with long enough data record appeared to coincide with the maxima in neutron count rate, i.e., minima in the sunspot numbers. A periodicity in  $^3\text{H}$  activity concentration variations of  $12.4 \pm 1.8$  years was determined [6], in good agreement with the 11-year solar cycle. Here we present the statistical treatment of our long-term data on tritium activity concentration in precipitation in a search for a long-term periodicity.

### 2. Methods

Monitoring of tritium activity concentration in monthly precipitation at Zagreb (Croatia, 15.98 E, 45.81 N) has been continuously performed since 1976 and experimental methods have been continuously improved [7]. Currently, the liquid scintillation counting (LSC Quantulus 1220) with electrolytic enrichment of water with tritium is applied [8].

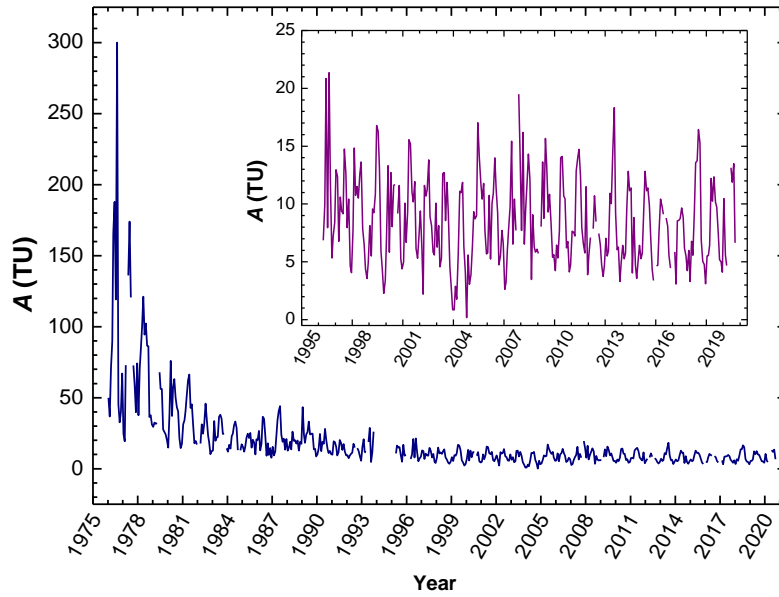
Our long-term data were evaluated by applying frequency analysis (FA), wavelet analysis (WA), and sinusoidal curve fitting (SF). The Lomb periodogram [9] was used to perform FA for unevenly spaced discrete data. For the WA evaluation of the frequency spectrum in the time dimension we used the algorithm based on the Weighted Wavelet z-transform [10]. Sinusoidal regression was performed on data since 1996 to find dominant frequencies.

### 3. Results

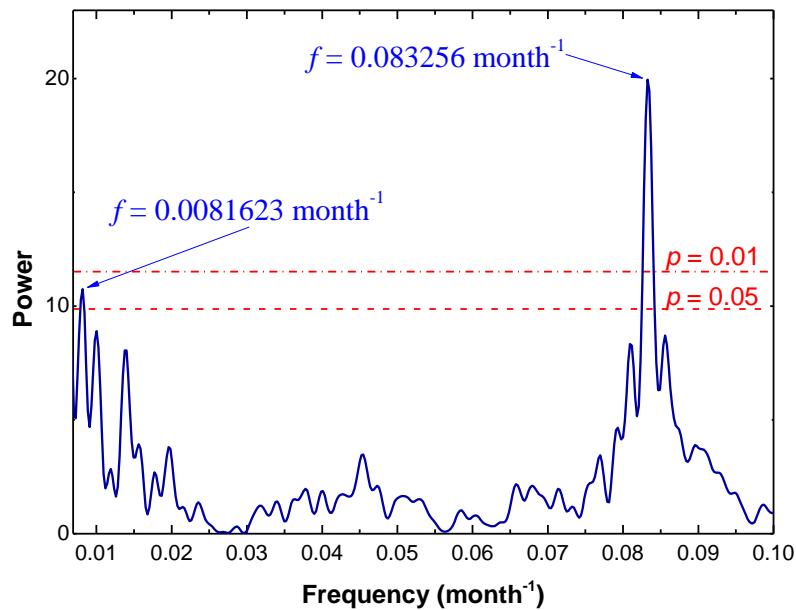
The tritium activity concentrations (A) in monthly precipitation in Zagreb, for the period 1976 – 2020 (Figure 1) show the pattern typical of continental stations of the Northern Hemisphere. Seasonal variations were superposed to the basic decreasing trend of mean annual values until approximately 1996 [7]. The maximal  $^3\text{H}$  activity concentration at station Zagreb is observed between May-July, mostly in June. A secondary maximum is observed occasionally in January and/or February. Since 1996 no significant decrease has been observed. The average value for the period 1996 – 2020 is  $8.7 \pm 3.9$  TU. Note the gap in 1994 due to local contamination with the technogenic tritium close to the sampling site.

Results of frequency analysis (FA) based on the data from 1976 to 2020 show two peaks (Figure 2). The strongest peak, well above the significance level  $p = 0.01$ , is obtained at the frequency  $f = 0.08326 \text{ month}^{-1}$  corresponding to the period of 12.01 months. This is a consequence of strong annual seasonality of tritium in precipitation. The other peak above the significance level of  $p = 0.05$  is observed at the frequency  $f = 0.00816 \text{ month}^{-1}$ , corresponding to the period of 122.55 months or 10.21 years.

Similar results are obtained by Wavelet analysis. Strong frequency signal in the around  $f \approx 0.085 \text{ month}^{-1}$  corresponds to a period of one year ( $\approx 12$  months). The other pronounced frequencies are in the lower range corresponding to the period  $\approx 11$  years.



**Figure 1. The complete set of tritium activity concentration data in monthly precipitation in Zagreb, Croatia, for period 1976 – 2020.**



**Figure 2. Frequency – Power spectrum for precipitation data in Zagreb for period 1976 – 2020. Significance levels  $p$  of 0.01 and 0.05 are also shown.**

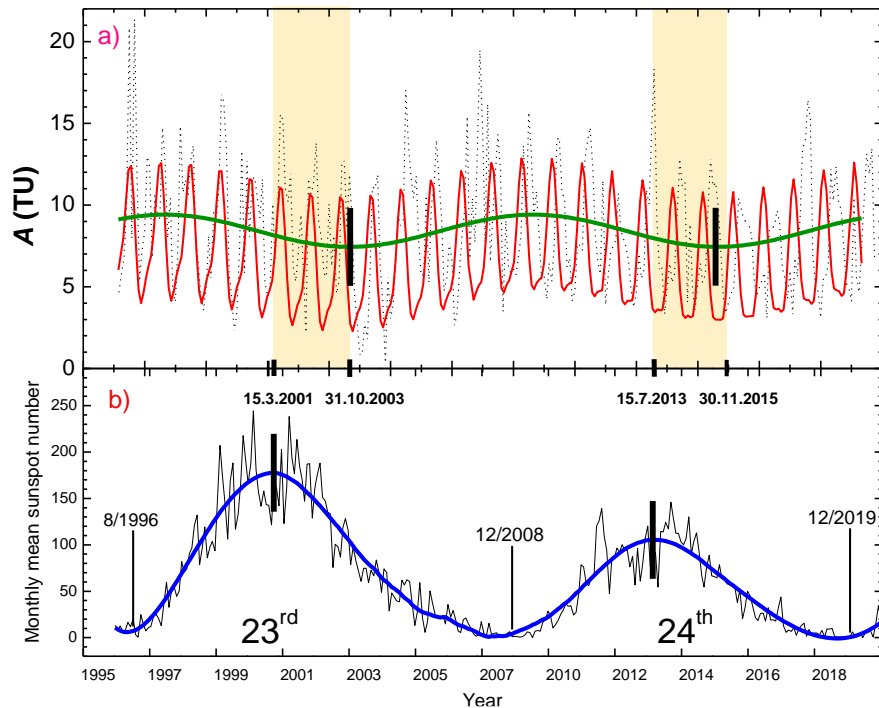
The measured data from period 1996 to 2020 (when no bomb-tritium was observed) were fitted to the three most dominant sinusoidal functions

$$y_1 = 3.417 \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{12} m\right) - 2.165 \quad (1a)$$

$$y_2 = 1.138 \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{5.976} m\right) + 0.9848 \quad (1b)$$

$$y_3 = 0.9848 \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{146.1} m\right) - 0.9848 \quad (1c)$$

where  $m$  is a number of months starting from January 1996. The period of 12 months (eq. 1a) is explained by the seasonal annual variations and the period of  $\approx 6$  months (eq. 1b) is a consequence of occurrence of secondary maxima. The sinusoidal curve (1c) with the longest period of 146.1 months has maxima in 1997 and 2009 and minima in October 2003 and November 2015 (Figure 3a).



**Figure 3. a) Tritium activity concentrations in monthly precipitation in Zagreb, period 1996 – 2020 (dotted line). Red line: summed sinusoidal fitting (1a), (1b) and (1c). Green line: sinusoid (1c). Shaded area: the delay between the maximum in sunspot number and the minimum of sinusoid (1c). b) Monthly number of the sunspots (thin black line) [11] and smoothed curve (thick blue line). The 23rd and 24th solar cycles and the months of the minima are marked.**

#### 4. Discussion

The statistical methods of analysis of long-term data of tritium activity in precipitation of Zagreb, Croatia, resulted in two distinct periods. The period of 1 year corresponded to seasonal variations of tritium in precipitation. The longer period of 122.5 months or 10.21 yr (FA),  $\approx 11$  years (WA) and 146.1 months or 12.17 yr (SF) is close to the solar activity cycle period. Namely, the periods available for 24 solar cycles since 1755 [11] range from 9 years to 13.58 yr, with an average of  $11.0 \pm 1.1$  yr. The 23rd cycle lasted for 12 years and 4 months, and the 24th cycle for exactly 11 years (Figure 3b).

The 12.17 yr SF curve (eq. 1c) was compared to the monthly number of Sun spots (Figure 3). Maxima in the sunspot number, based on the smoothed curve (Figure 3b, vertical black lines) are observed in March 2001 and July 2013 for the 23rd and 24th solar cycle, respectively. The minima in the tritium activity concentration, based on the sinusoidal curve 1c, are observed in October 2003 and November 2005, respectively (vertical black lines in Figure 3a). Therefore, a delay of 31 months and 28 months in 23rd and 24th cycle, respectively, of the lowest tritium activity concentration compared to the maximum in sunspot number is observed (Figure 3a, shaded area). The plausible

explanation of the delay may be the life cycle of tritium in the atmosphere:  $^3\text{H}$  is produced in nuclear reactions in the stratosphere and then it enters the troposphere by temporary mixing between the stratosphere and troposphere at high latitudes in early spring. The atmospheric mixing that occurs in early springs suggests a delay of at least several months to a year of appearance of tritium in the meteoric water. Taking into account that not all tritium is exchanged in a year, what was clearly shown by a long-term appearance of bomb-produced tritium in precipitation, a delay of about 30 months is a reasonable delay.

### 5. Conclusion

Strong evidence of the variations in tritium activity concentration in precipitation at Zagreb, Croatia, with the 10 – 12 year period is obtained by the statistical analysis of the long-term data. This period may be related to a solar cycle supporting the hypothesis of solar influence on meteoric tritium. Sinusoidal fit to the data after 1996, when bomb-tritium is no longer observed in precipitation, resulted in the periodicity of 146.1 months (12.17 years). A delay of about 30 months was observed between the maxima in the sunspot number and the minima in  $^3\text{H}$  activity concentration in precipitation and plausibly explained by the life cycle of tritium in the atmosphere. This feature has been reported for the first time. Our finding points to the importance of further monitoring of tritium in precipitation. New observations may thus contribute to the atmospheric science in studying the rate of exchange between the stratosphere and the troposphere and in determining the life-time of cosmogenic tritium in the stratosphere. However, for studies of natural production and relation with the solar cycle, local effects (technogenic  $^3\text{H}$ ) should be minimized or absent.

### 6. Acknowledgment

We thank all collaborators who collected monthly precipitation samples at the Zagreb station and who participated in measurement of tritium activity concentration.

### 7. References

- [1] L.L. Lucas, M.P. Unterweger. Comprehensive review and critical evaluation of the half-life of tritium. *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.* 46, 2000, 541-549.
- [2] W.G. Mook. *Environmental Isotopes in the Hydrological Cycle, Principles and Applications*, Volumes I, IV and V, Technical Documents in Hydrology No. 39, IAEA-UNESCO, Paris 2000.
- [3] IAEA, International Atomic Energy Agency. *Global Network of Isotopes in Precipitation, The GNIP Database*. <http://www.iaea.org/water>. (accessed 1 March 2021).
- [4] J. Nikolov, I. Krajcar Bronić, N. Todorović, I. Stojković, J. Barešić, T. Petrović-Pantić. *Tritium in Water: Hydrology and Health Implications*. In: *Tritium - Advances in Research and Applications*. M. Janković, Ed. New York, NOVA Science Publishers, 2018, 157-211.
- [5] R.L. Michel. *Tritium in the hydrologic cycle*. In: *Isotopes in the Water Cycle: Past, Present and Future of a Developing Science*. P.K. Aggarwal, J.R. Gat, K. Froehlich, Eds., IAEA, 2005, 53-66.
- [6] L. Palcsu, U. Morgenstern, J. Sültenfuss, G. Koltai, E. Laszlo, M. Ternovski, Z. Major, J.T. Nagy, L. Papp, C. Varlam, I. Faurescu, M. Túri, L. Rinyu, G. Czuppon, E. Botyán, A.J.T. Jull. Modulation of Cosmogenic Tritium in Meteoric Precipitation by the 11-Year Cycle of Solar Magnetic Field Activity. *Scientific*

- Reports* 8, 2018, 12813.
- [7] I. Krajcar Bronić, J. Barešić, D. Borković, A. Sironić, I. Lovrenčić Mikelić, P. Vreča. Long-Term Isotope Records of Precipitation in Zagreb, Croatia. *Water* 12, 2020, 226.
- [8] I. Stojković, N. Todorović, J. Nikolov, I. Krajcar Bronić, J. Barešić, U. Kozmidic Luburić. *Methodology of tritium determination in aqueous samples by Liquid Scintillation Counting techniques*. In: Tritium - Advances in Research and Applications. M. Janković, Ed. New York, NOVA Science Publishers, 2018, 99-156.
- [9] J.H. Horne, S.L. Baliunas. A prescription for period analysis of unevenly sampled time-series. *Astrophys. J.* 302, 1986, 757–763.
- [10] G. Foster. *Wavelets for period analysis of unevenly sampled time series*. *Astron. J.* 112, 1996, 1709–1729.
- [11] SILSO, World Data Center for the production, preservation and dissemination of the international sunspot number, <http://www.sidc.be/silso/home>. (accessed 10 April 2021)

**VARIJACIJE KONCENTRACIJE AKTIVNOSTI TRICIJA U OBORINAMA  
ODRAŽAVAJU CIKLUS SUNČEVE AKTIVNOSTI**

**Damir BORKOVIĆ i Ines KRAJCAR BRONIĆ**

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

**SADRŽAJ**

Podaci o koncentraciji aktivnosti tricija u kišnicama Zagreba, Hrvatska, u razdoblju 1976-2020 statistički su analizirani radi određivanja periodičnosti u zapisima. Primijenjene su metode frekvencijske analize, Wavelet analize i prilagodba na sinusne funkcije. Sve metode su, uz očekivani period od 1 godine zbog sezonskih varijacija, ukazale i na period od 10 – 12 godina, koji se može usporediti sa solarnim ciklusima potvrđujući tako pretpostavku o mogućem utjecaju ciklusa Sunčeve aktivnosti na produkciju tricija u stratosferi. Opažen je i pomak između maksimuma broja sunčevih pjega i minimuma koncentracije aktivnosti tricija od oko 30 mjeseci u dva solarna ciklusa. Taj je fazni pomak objašnjen životnim ciklusom tricija u atmosferi, od nastanka u stratosferi do oborina. Ukazano je na potrebu daljnjeg praćenja koncentracije aktivnosti tricija u oborinama, što bi moglo doprinijeti znanosti o atmosferi. Pri tome treba voditi računa da je utjecaj tehnogenog tricija zanemariv.



## SADRŽAJ RADIONUKLIDA U IZVORSKIM VODAMA U OKOLINI SMEDEREVSKE PALANKE

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

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

### SADRŽAJ

*U radu su prikazani rezultati merenja radioaktivnosti u izvorskim vodama u okolini Smederevske Palanke. Određivanje sadržaja radionuklida urađeno je gama-spektrometrijskom metodom sa HPGe detektorom, dok je za merenje ukupne alfa i ukupne beta aktivnosti u uzorcima korišćen gasni proporcionalni alfa beta brojač THERMO-EBERLINE FHT 770T. Uzorci su sakupljeni tokom proleća 2021. godine. Dobijeni rezultati upoređeni su sa dozvoljenim vrednostima sadržaja radionuklida u vodi za piće propisanim Zakonskom regulativom.*

### 1. Uvod

Prema zakonskoj regulativi u Republici Srbiji, voda za piće podleže određivanju ukupne alfa i ukupne beta aktivnosti i gamaspektrometrijskoj analizi. Ukoliko su izmerene vrednosti ukupne alfa ili ukupne beta aktivnosti veće od Pravilnikom definisanih parametarskih vrednosti, vrši se određivanje sadržaja pojedinačnih radionuklida specifičnim metodama [1]. U vodama, prirodna radioaktivnost potiče od izotopa uranijuma i torijuma  $^{238,235}\text{U}$  i  $^{232}\text{Th}$  kao i od njihovih potomaka, zatim od  $^{40}\text{K}$ . Pored prirodnih radionuklida, u vodama se mogu naći i proizvedeni radionuklidi ( $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ), kao posledica nuklearnih akcidenata i proba [2].

Cilj ovog rada je određivanje sadržaja ukupne alfa i ukupne beta aktivnosti i spektrometrija gama emitera u izvorskim vodama u okolini Smederevske Palanke, s obzirom da se vode sa tih izvora koriste za piće.

Opština Smederevska Palanka nalazi se u Podunavskom okrugu. Kroz područje opštine protiču reke Jasenica, Kubršnica i Mali Lug. Posebnu vrednost područja predstavljaju izvorišta mineralne i termomineralne vode. Najznačajniji izvor mineralne vode je Palanački Kiseljak. Zbog obilja minerala, posebno selena, spada u lekovite vode. U okolnim selima nalaze se i drugi izvori, uključujući i izvori mineralne kisele vode u Cerovcu i Vodicama kao i izvori prirodnih voda. Voda sa Palanačkog Kiseljaka se koristi još od 1719. godine. Izvor mineralne kisele vode "Palanački Kiseljak" kaptiran je 1934. godine i nosi ime poznatog akademika i hemičara dr Marka Leke. U Smederevskoj Palanci pored crkve "Svete Petke" nalazi se izvor prirodne vode iz 2007. koja potiče sa velikih dubina. U selu Vodice nalazi se izvor "Vidovača" iz 1908. godine, dok se u neposrednoj okolini u istom selu nalazi i izvor kisele vode iz 1963. godine. Fotografije izvora prikazane su na slici 1.



**Slika 1. Izvori vode u okolini Smederevske Palanke.**

## 2. Eksperimentalni deo

Uzorci izvorskih voda sakupljeni su u okolini Smederevske Palanke (izvor prirodne vode kod crkve "Sveta Petka" u Smederevskoj Palanci, izvor kisele vode "Palanački Kiseljak", izvor prirodne vode "Vidovača" u selu Vodice i izvor kisele vode u selu Vodice). Priprema uzoraka za merenje ukupne alfa i ukupne beta aktivnosti i za gamaspektrometrijsku analizu podrazumeva uparavanje određene zapremine do suvog ostatka i mineralizaciju na 450 °C. U uzorcima sa niskim koncentracijama radionuklida potrebno je upariti što veću zapreminu vode. Određivanje ukupne alfa i ukupne beta aktivnosti urađeno je metodom EPA [3], dok se za gamaspektrometrijsku analizu koristi metoda IAEA Technical Reports Series No. 295 [4].

Za određivanje ukupne alfa i ukupne beta aktivnosti, uzorci su mereni na gasnom proporcionalnom brojaču THERMO-EBERLINE FHT 770T. Efikasnost merenja alfa

zračenja je 26 %, a za beta zračenje je 35 %. Kalibracija je urađena sertifikovanim radioaktivnim standardima  $^{241}\text{Am}$  i  $^{90}\text{Sr}$ . Vreme merenja uzoraka je 14400 s. Spektrometrija gama emitera urađena je na HPGe detektorima relativnih efikasnosti 20 % i 50 %, firme CANBERRA. Rezolucija detektora je 1,8 keV na energiji od 1332 keV. Za kalibraciju detektora korišćen je referentni radioaktivni materijal u geometriji plastične kutije od  $125\text{ cm}^3$ , koji je dobijen od sertifikovanog radioaktivnog rastvora, Czech Metrology Institute, Praha, 1035-SE-40844-17, type ERX, ukupne aktivnosti 79,89 kBq na dan 22.12.2017. godine ( $^{241}\text{Am}$ ,  $^{109}\text{Cd}$ ,  $^{139}\text{Ce}$ ,  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{85}\text{Sr}$ ,  $^{88}\text{Y}$ ,  $^{51}\text{Cr}$ ). 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 %.

### 3. Rezultati i diskusija

U tabeli 1 prikazani su rezultati merenja sadržaja gama emitera i ukupne alfa i ukupne beta aktivnosti u izvorskim vodama u okolini Smederevske Palanke.

**Tabela 1. Sadržaj radionuklida i sadržaj ukupne alfa i ukupne beta aktivnosti u izvorskim vodama (rezultati su predstavljeni u Bq/l).**

Lokacija	Izvor vode kod crkve "Sveta Petka": Smed. Palanka	Izvor vode: "Palanački Kiseljak"	Izvor vode: "Vidovača" - Vodice	Izvor kisele vode: Vodice
<b>Ukupna alfa aktivnost</b>	< 0,09	$0,27 \pm 0,08$	< 0,07	< 0,05
<b>Ukupna beta aktivnost</b>	$0,10 \pm 0,02$	$0,8 \pm 0,1$	< 0,06	< 0,07
$^{210}\text{Pb}$	< 0,1	< 0,1	< 0,09	< 0,008
$^{238}\text{U}$	< 0,05	< 0,06	< 0,04	< 0,1
$^{235}\text{U}$	< 0,004	< 0,003	< 0,002	< 0,004
$^{226}\text{Ra}$	< 0,03	$0,32 \pm 0,02$	$0,15 \pm 0,01$	$0,18 \pm 0,01$
$^{232}\text{Th}$	< 0,01	$0,14 \pm 0,01$	$0,014 \pm 0,005$	< 0,02
$^{40}\text{K}$	< 0,09	$2,2 \pm 0,2$	$0,12 \pm 0,02$	< 0,1
$^{137}\text{Cs}$	< 0,002	< 0,002	< 0,002	< 0,004

U ispitivanim uzorcima koncentracije prirodnih radionuklida  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  i proizvedenog radionuklida  $^{137}\text{Cs}$  su ispod minimalne detektibilne koncentracije. U uzorcima sa izvora "Palanački Kiseljak" i "Vidovača" detektovani su prirodni radionuklidi  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  i  $^{40}\text{K}$ , dok je u uzorku sa izvora kisele vode u Vodicama detektovan samo  $^{226}\text{Ra}$ . Svi gama emiteri u uzorku sa izvora kod crkve su ispod minimalne detektibilne koncentracije. Dobijeni rezultati gamaspektrometrijske analize za sve ispitivane uzorke su ispod izvedenih koncentracija propisanih Pravilnikom [1]. U uzorcima sa izvora kod crkve, "Vidovača" i "Vrelo", vrednosti ukupne alfa aktivnosti su manje od 0,1 Bq/l (dozvoljena vrednost propisana Pravilnikom [1]). U uzorku sa izvora "Palanački Kiseljak" detektovana je ukupna alfa aktivnost vrednosti 0,27 Bq/l koja je iznad vrednosti definisanih Pravilnikom. Međutim, gamaspektrometrijskom analizom datog uzorka, detektovani su prirodni radionuklidi, alfa emiteri, čije su vrednosti ispod dozvoljenih. U svim ispitivanim uzorcima ukupna beta aktivnost je manja od vrednosti propisanih Pravilnikom, 1,0 Bq/l.

### 4. Zaključak

Rezultati analize sadržaja pojedinačnih radionuklida kao i ukupne alfa i ukupne beta aktivnosti u uzorcima pijaćih voda sa izvora u okolini Smederevske Palanke pokazuju da su dobijene vrednosti u skladu sa važećom zakonskom regulativom.

### 5. Zahvalnica

Istraživanje je finansirano od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije (evidencioni broj ugovora: 451-03-9/2021-14/ 200017).

### 6. Literatura

- [1] 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.
- [2] M. M. Jankovic, N. B. Sarap, D.J. Todorovic, J. D. Joksic, Natural and artificial (90Sr) radionuclides in some carbonated mineral waters used in Serbia, *Nuclear Technology & Radiation Protection*, 28 (3), 2013, 284-292
- [3] Prescribed Procedures for Measurement of Radioactivity in Drinking Water, Method 900.0, EPA-600/4-80-032, 1980.
- [4] Measurements of Radionuclides in Food and Environment, Method for Determining Gamma Emitters, IAEA Technical Reports Series No. 295, Vienna, 1989.

**CONTENT OF RADIONUCLIDES IN SPRING WATERS IN THE VICINITY  
OF SMEDEREVSKA PALANKA**

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

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

**ABSTRACT**

The results of gamma spectrometric analysis and determination of gross alpha and gross beta activity in spring waters in the vicinity of Smederevska Palanka are presented in this paper. Determination of radionuclide content was performed with HPGe gamma spectrometry, while determination of gross alpha and gross beta activity was performed using gas proportional alpha/beta counter THERMO-EBERLINE FHT 770T. Samples were collected in spring of 2021. The obtained results were compared with the permitted values of radionuclide content in drinking water prescribed by the Legislation.

## UTICAJ GAMA ZRAČENJA NA STABILNOST AFLATOKSINA U MLEKU

Vojislav STANIĆ<sup>1</sup>, Srđan STEFANOVIĆ<sup>2</sup>, Srdoljub STANKOVIĆ<sup>1</sup>,  
 Slađana TANASKOVIĆ<sup>3</sup>, Branislav NASTASIJEVIĆ<sup>1</sup>,  
 Dragoljub JOVANOVIĆ<sup>4</sup> i Vukosava ŽIVKOVIĆ<sup>5</sup>

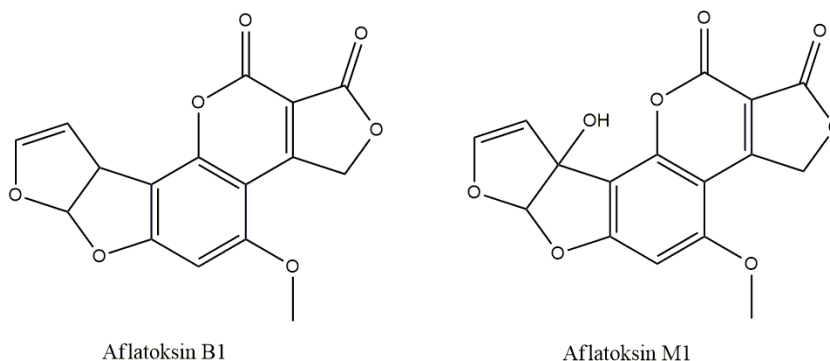
- 1) Univerzitet u Beogradu, Institut za nuklearne nauke "Vinča", Beograd, Srbija  
[voyo@vinca.rs](mailto:voyo@vinca.rs), [srbas@vinca.rs](mailto:srbas@vinca.rs), [branislav@vin.bg.ac.rs](mailto:branislav@vin.bg.ac.rs)
- 2) Institut za higijenu i tehnologiju mesa, Beograd, Srbija, [stefanovic@inmes.rs](mailto:stefanovic@inmes.rs)
- 3) Univerzitet u Beogradu, Farmaceutski fakultet, Beograd, Srbija,  
[sladjana.tanaskovic@pharmacy.bg.ac.rs](mailto:sladjana.tanaskovic@pharmacy.bg.ac.rs)
- 4) Univerzitet u Beogradu, Veterinarski fakultet, Beograd, Srbija,  
[djovanovic@vet.bg.ac.rs](mailto:djovanovic@vet.bg.ac.rs)
- 5) Univerzitet u Beogradu, Hemijski fakultet, Beograd, Srbija, [vuka@chem.bg.ac.rs](mailto:vuka@chem.bg.ac.rs)

### SADRŽAJ

Aflatoksini su značajan problem u oblasti bezbednosti hrane i rizika po zdravlje ljudi. Gama zračenje uništava opasne загађиваче u hrani kao što su bakterije, virusi, gljivice, pesticidi i toksini. U ovoj studiji je korišćeno gama zračenje da bi se smanjila količina aflatoksina u mleku. Rezultati su pokazali smanjenje aflatoksina u mleku za 9 % - 35,26 % u poređenju sa kontrolnim uzorkom. Smanjenje koncentracija aflatoksina u mleku nije proporcionalno primenjenoj dozi grama zračenja usled zgrušavanja mleka.

### 1. Uvod

Kontaminacija prehrambenih proizvoda mikotoksinima su često neizbežna i predstavljaju problem po zdravlje ljudi i životinja širom sveta. Mikotoksini su toksični metaboliti proizvedeni od brojnih gljivica, uglavnom od *Aspergillus*, *Penicillium* i *Fusarium* rodova. Aflatoksini su nastali kao sekundarni metaboliti gljivica iz roda *Aspergillus*, naročito *Aspergillus flavus* i *Aspergillus parasiticus*. Postoji oko 20 različitih vrsta aflatoksina, od kojih su najznačajniji aflatoksini B1 (AFB1), B2 (AFB2), G1 (AFG1), G2 (AFG1), M1 (AFM1) i M2 (AFM2). Aflatoksini M1, M2 su hidroksilirani derivati aflatoksina B1 i B2 nastali u mlečnim žlezdama sisara hranjenih biljnim hranjivima koja su sadržavala navedene B aflatoksine [1]. Na Slici 1. prikazane su hemijske strukturne formule aflatoksina: B1 i M1.



**Slika 1. Hemijske strukturne formule aflatoksina: B1 i M1.**

Količina aflatoksina u mleku zavisi od njegove količine u hranivima, od uzrasta, vrste i rase životinje, perioda laktacije, zdravstvenog stanja životinje, godišnjeg doba, i raznih drugih faktora [2]. Aflatoksin je termostabilan, konjugovan je sa proteinima u mleku koji ga štite od vanjskih uticaja, pa se u procesu prerade mleka ne menja, i može se naći u svim proizvodima (sir, jogurt, kefir) bez vidljivog prisustva gljivica. Bolesti koje uzrokuju aflatoksini nazivaju se aflatoksikoze, a one mogu biti akutne ili hronične. Ciljni organ djelovanja aflatoksina je jetra gde se kao posledica akutnog trovanja primarno razvija nekroza, dok usled dugotrajne izloženosti dolazi do pojave hepatitisa i ciroze. Aflatoksini nisu toksični samo za jetru nego imaju i druga neželjena dejstva: imunosupresivnost, mutagenost, teratogenost i karcinogenost [3-5]. Kako bi se smanjio rizik po zdravlje ljudi u svetu su uspostavljene najveće dozvoljene količine AFM1 u mleku i mlečnim proizvodima. Maksimalno dozvoljena koncentracija AFM1 u mleku u Republici Srbiji utvrđene su važećim pravilnikom („Službeni glasnik RS“ 37/2014 i 72/2014) i iznosi 0,25 µg/kg. Razne fizičke, hemijske i biološke metode su razvijene za uklanjanje aflatoksina iz mleka [6]. Cilj ovog rada je bio da se u laboratorijskim uslovima ispita efikasnost gama zračenja na razgradnju AFM1 u mleku.

## 2. Eksperimentalni deo

### 2.1. ELISA test

Za ova ispitivanja uzorak mleka dobijen je od individualnog poljoprivrednog gazdinstva iz okoline Valjeva. Mleko prilikom ispitivanja je bilo delimično usireno. ELISA metoda korišćena za određivanje sadržaja aflatoksina M1 u mleku predstavlja sendvič tip ELISA testa [7]. Mikrotitarski bunarčići su impregnirani sa anti-aflatoksin M1 antitelima i tokom prve inkubacije aflatoksin M1 iz uzoraka se vezuje za antitela. Nakon ispiranja nevezanog materijala, u bunarčiće se dodaje tačno određena količina HRP enzimom konjugovanog aflatoksina M1. Konjugat se vezuje za slobodna mesta na impregniranim antitelima. Nakon ispiranja viška materijala, u bunarčiće se dodaje TMB supstrat, koji reaguje sa enzimom i nastaje obojeni proizvod. Nakon dodavanja 0,1 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> i zaustavljanja reakcije, boja se očitava na spektrofotometru (λ), na talasnoj dužini od 450 nm. Za internu kontrolu korišćeni su slepa proba (blanko uzorak), i tri obogaćene slepe probe u koncentracijama od 0,010; 0,020; 0,050 i 0,075 µg/kg AFM1.

### 2.2. Eksperimenti gama zračenje

Eksperimenti ozračivanja uzoraka u polju gama zračenja su sprovedeni u Metrološkoj Dozimetrijskoj Laboratoriji koja je deo Laboratorije „Zaštita“ iz Instituta za nuklearne nauke (Beograd). Polje gama zračenja je bilo ostvareno korišćenjem uredjaja IRPIK-B koji je generator gama zračenja iz radioaktivnog izvora Co-60, nominalne aktivnosti 238 TBq na dan 1.09.1999.godine. Vrednost jačine apsorbovane doze gama zračenja u vazduhu na poziciji referentne tačke za ozračivanje uzoraka je bila 23,43 Gy/h. Nakon svake pojedinačne kampanje zračenja, povećavala se vrednost ukupne apsorbovane doze gama zračenja u uzorcima. Pri tome, na poziciji na kojima su ozračivani uzorci, vrednosti ukupne apsorbovane doza gama zračenja u vazduhu (D) su iznosile 4 Gy, 8 Gy, 40 Gy, 80 Gy, 400 Gy i 800 Gy u zavisnosti od vremena ozračivanja uzoraka.

## 3. Rezultati i diskusija

Gama zračenje je visoko-energetsko elektromagnetno zračenje koje emituju radioaktivna jezgra, najčešće se kao izvor zračenja koristi <sup>60</sup>Co. Izlaganje supstanci jonizujućem zračenju može doći do cepanja hemijskih veza, odnosno razgradnje molekula, koje zavisi od apsorbovane doze. Danas se γ-zračenje sve više koristi u prehrambenoj industriji za uništavanje patogenih i kvarećih mikroorganizama bez

ugrožavanja bezbednosti nutritivnih i senzornih svojstava hrane. Gama zračenjem se može u velikoj meri smanjiti količina aflatoksina u raznim prehrambenim namirnicama [9, 10]. U Tablici 1 prikazani su rezultati ozračivanja uzorka mleka. Pre  $\gamma$ -zračenja, koncentracija AFM1 u testiranom mleku iznosila je 0,190  $\mu\text{g}/\text{kg}$  (uzorak 0). U svim uzorcima je usled dejstva zračenja došlo do smanjenja koncentracije aflatoksina. Smanjenje ne zavisi od primenjene doze što se može objasniti da je testirano mleko bilo usireno i nehomogeno. Hassanpour, i saradnici su pokazali da se primenom niskih doza  $\gamma$ -zračenja dolazi do smanjenja koncentracije aflatoksina za 51,5 % u mleku [9].

**Tablica 1. Sadržaj aflatoksina u mleku u zavisnosti od adsorbovane doze gama zračenja**

Redni broj uzorka	Apsorbovana doza D(Gy)	Izmerena koncentracija aflatoksina ( $\mu\text{g}/\text{kg}$ )
1	0	0,190
2	4	0,150
3	8	0,154
4	40	0,123
5	80	0,171
6	400	0,123
7	800	0,144

#### 4. Zaključak

U ovoj studiji je primenjeno gama zračenje da bi se ispitala njegova efikasnost na razgradnju aflatoksina (AFM1) u mleku. Rezultati su pokazali smanjenje aflatoksina u mleku za 9 % - 35,26 % u poređenju sa kontrolnim uzorkom. Smanjenje koncentracija aflatoksina u mleku nije proporcionalno primenjenoj dozi grama zračenja usled zgrušavanja mleka.

#### 5. Zahvalnica

Istraživanje predstavljeno u ovom radu urađeno je uz finansijsku podršku Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije, u okviru finansiranja naučnoistraživačkog rada Univerziteta u Beogradu, Institut za nuklearne nauke Vinča (Ugovor br. 451-03-9/2021-14/200017).

#### 6. Literatura

- [1] U. Diener, N. Davis. Aflatoxin production by isolates of *Aspergillus flavus*. *Phytopathology* 56, 1996, 390-393.
- [2] H. P. Van Egmond, S. Dragacci. In: *Mycotoxin Protocols*. M. W. Trucksess, A. E. Pohland (Eds.), Liquid chromatographic method for aflatoxin M1 in milk. Humana Press, Totowa, USA 2001, 59-69.



- [3] S. Marchese, A. Polo, A. Ariano, S. Velotto, S. Costantini, L. Severino. Aflatoxin B1 and M1: Biological properties and their involvement in cancer development. *Toxins* 10, 2018, 214.
- [4] O. Adejumo, O. Atanda, A. Raiola, Y. Somorin, R. Bandyopadhyay, A. Ritieni. Correlation between aflatoxin M1 content of breast milk, dietary exposure to aflatoxin B1 and socioeconomic status of lactating mothers in Ogun State, Nigeria. *Food Chem. Toxicol.* 56, 2013, 171-177.
- [5] A. Magnussen, M. A. Parsi. Aflatoxins, hepatocellular carcinoma and public health. *World J Gastroenterol.* 14, 2013, 1508–1512.
- [6] Z. Peng, L. Chen, Y. Zhu, Y. Huang, X. Hu, Q. Wu, A. K. Nüssler, L. Liu, W. Yan. Current major degradation methods for aflatoxins: A review. *Trends Food Sci. Technol.* 80, 2018, 155-166.
- [7] D. M. Spirić, S. M. Stefanović, T. M. Radičević, J. M. Đinović Stojanović, V. V. Janković, B. M. Velebit, S. D. Janković. Studija o nalazu aflatoksina u hrani za životinje i sirovom mleku u Srbiji tokom 2013. godine. *Hem. Ind.* 69, 2015, 651–656.
- [8] M. J. Adamović, S. T. Jovanović, O. D. Maćej, A. S. Daković, S. S. Stanković. Mogućnost adsorpcije mikotoksina (aflatoksin M1 I M2) u jogurtu adsorbentima na bazi prirodnog i modifikovanog zeolite. *Preh. ind.* 1–2, 2006, 39-42.
- [9] M. Hassanpour, M. R. Rezaie, A. Baghizadeh. Practical analysis of aflatoxin M1 reduction in pasteurized Milk using low dose gamma irradiation. *J. Environ. Health Sci. Eng.* 17, 2019, 863–872.
- [10] P. P. Akhila, K. V. Sunooj, B. Aaliya, M. Navaf, C. Sudheesh, S. Sabu, A. Sasidharan, S. A. Mir, J. George, A. M. Khaneghah. Application of electromagnetic radiations for decontamination of fungi and mycotoxins in food products: A comprehensive review. *Trends Food Sci. Technol.* 114, 2021, 399–409.

**INFLUENCE OF GAMMA RADIATION ON THE STABILITY OF  
AFLATOXIN IN MILK**

**Vojislav STANIĆ<sup>1</sup>, Srdan STEFANOVIĆ<sup>2</sup>, Srdoljub STANKOVIĆ<sup>1</sup>,  
Slađana TANASKOVIĆ<sup>3</sup>, Branislav NASTASIJEVIĆ<sup>1</sup>,  
Dragoljub JOVANOVIĆ<sup>4</sup> and Vukosava ŽIVKOVIĆ<sup>5</sup>**

- 1) *Univerzitet u Beogradu, Institut za nuklearne nauke "Vinča", Beograd, Srbija*  
[voyo@vinca.rs](mailto:voyo@vinca.rs), [srbas@vinca.rs](mailto:srbas@vinca.rs), [branislav@vin.bg.ac.rs](mailto:branislav@vin.bg.ac.rs)
- 2) *Institut za higijenu i tehnologiju mesa, Beograd, Srbija, [stefanovic@inmes.rs](mailto:stefanovic@inmes.rs)*
- 3) *Univerzitet u Beogradu, Farmaceutski fakultet, Beograd, Srbija,*  
[sladjana.tanaskovic@pharmacy.bg.ac.rs](mailto:sladjana.tanaskovic@pharmacy.bg.ac.rs)
- 4) *Univerzitet u Beogradu, Veterinarski fakultet, Beograd, Srbija,*  
[djovanovic@vet.bg.ac.rs](mailto:djovanovic@vet.bg.ac.rs)
- 5) *Univerzitet u Beogradu, Hemijski fakultet, Beograd, Srbija, [vuka@chem.bg.ac.rs](mailto:vuka@chem.bg.ac.rs)*

**ABSTRACT**

Aflatoxins are a significant problem in the field of food safety and risk to human health. Gamma irradiation destroys dangerous contaminants in foods such as bacteria, viruses, fungi, pesticides, and toxins. In this study, we used gamma radiation to reduce the amount of aflatoxins in milk. The results showed a 9 % - 35.26 % reduction of aflatoxin in milk compared to the control sample. Reductions in aflatoxin concentrations in milk are not proportional to the applied dose of grams of radiation due to milk coagulation

## ISPITIVANJE RADIOAKTIVNOSTI SUSPENDOVANIH ČESTICA ATMOSFERE UZORKOVANIH KASKADNIM IMPAKTOROM NISKOG PRITISKA

Sofija FORKAPIĆ<sup>1</sup>, Dragana ĐORĐEVIĆ<sup>2</sup>, Jelena ĐURIČIĆ-MILANKOVIĆ<sup>3</sup>,  
Igor ČELIKOVIĆ<sup>4</sup>, Aleksandar KANDIĆ<sup>4</sup>, Jan HANSMAN<sup>1</sup> i Kristina BIKIT<sup>1</sup>

- 1) Univerzitet u Novom Sadu, Prirodno-matematički fakultet, Trg Dositeja Obradovića 4, 21000 Novi Sad, Srbija, [sofija@df.uns.ac.rs](mailto:sofija@df.uns.ac.rs),  
[jan.hansman@df.uns.ac.rs](mailto:jan.hansman@df.uns.ac.rs), [kristina.bikit@df.uns.ac.rs](mailto:kristina.bikit@df.uns.ac.rs)
- 2) NU Institut za Hemiju, Tehnologiju i Metalurgiju – Centar izuzetnih vrednosti za hemiju i inženjering životne sredine, Njegoševa 12 (Studentski trg 12-16), 11000 Beograd, [dragadj@chem.bg.ac.rs](mailto:dragadj@chem.bg.ac.rs)
- 3) Akademija strukovnih studija Šabac, Odsek za medicinske i poslovno-tehnološke studije, Hajduk Veljkova 10, Šabac, [jdjuricmilankovic@vmpts.edu.rs](mailto:jdjuricmilankovic@vmpts.edu.rs)
- 4) Institut za nuklearne nauke Vnča Univerziteta u Beogradu, Laboratorija za nuklearnu i plazma fiziku, Mike Petrovića Alasa 12-14, Vinča, Beograd, [icelikovic@vin.bg.ac.rs](mailto:icelikovic@vin.bg.ac.rs), [akandic@vin.bg.ac.rs](mailto:akandic@vin.bg.ac.rs)

### SADRŽAJ

Glavni izvori aerozagađenja u Srbiji su energetska sektor u koji spadaju termoelektrane, toplane i pojedinačno grejanje domaćinstava, potom transportni sektor i industrijska aktivnost (rafinerije nafte, hemijska industrija, rudarstvo i sl.). Procenjeno je da je broj preranih smrti izazvanih aerozagađenjem u Srbiji, među najvećima u Evropi. Najvažniji parametri za praćenje su koncentracija čestica i njihova raspodela u veličini. Uzorkovanje suspendovanih čestica atmosfere (particulate matter - PM) frakcionisanih po veličini sprovedeno je u periodu od marta 2012. godine do decembra 2013. godine u suburbanom delu Beograda na pozadinskoj mernoj stanici Zeleno brdo, kao receptorskom mestu. Svaki šesti dan uziman je po jedan usrednjeni 48-časovni uzorak aerosolnih čestica razdvojenih na jedanaest intervala aerodinamičkih prečnika čestica (particle diameter -  $D_p$ ) pomoću kaskadnog impaktora niskog pritiska prof. dr. Bernera - LPI 25/0,0085/2 u opsegu veličine čestica ( $0,0085 \mu\text{m} < D_p < 16 \mu\text{m}$ ). Tehnika mikrotalasne digestije korišćena je za razaranje sakupljenog depozita aerosolnih čestica iz šest krupnijih frakcija ( $0,27 \mu\text{m} < D_p < 16 \mu\text{m}$ ). Koncentracije 25 ispitivanih elemenata su određene primenom indukovano spregnute plazme sa masenom spektrometrijom. Najzastupljeniji elementi u ispitivanom aerosolu su bili Ca, Fe, Al, K i Mg. Najveći procentualni udeo As, Cd, K, Pb i Sb bio je prisutan u frakcijama čestica finog moda, dok su u grubom modu dominirali Al, Ba, Ca, Cr, Fe, Mg, Mn i Ti. Naknadno je vršena i gama spektrometrijska analiza uzoraka. Jedan deo ispitivanja je obuhvatao merenje svake od 11 frakcija posebno, a drugi deo analizu svih 11 frakcija odjednom. Takođe, merene su i aktivnosti više različitih uzoraka iste frakcije. U spektru su nađeni u tragovima prirodni radionuklidi, dok radionuklidi veštačkog porekla nisu detektovani. U radu su diskutovane istražene korelacije dobijenih rezultata koncentracije aktivnosti radionuklida sa dominantnim elementarnim sastavom i dijametrom čestica, kao i moguće poreklo aerozagađenja.

### 1. Uvod

Suspendovane čestice su jedan od polutanata vazduha koji u poslednje vreme izaziva veliku zabrinutost stanovništva, s obzirom na to da se dnevne prosečne granične vrednosti u ambijentalnom vazduhu utvrđene Direktivom EU 2008/50/EC [1] često

prevazilaze, naročito u urbanim sredinama. Pojmovi  $PM_{10}$  i  $PM_{2,5}$  koji se koriste kako u evropskoj [1], tako i u domaćoj zakonskoj regulativi [2], predstavljaju grube i fine čestice atmosferskog aerosola prema EPA klasifikaciji ( $PM_{10}$  – čestice čiji aerodinamički dijametar je manji ili jednak  $10\ \mu m$  i  $PM_{2,5}$  – čestice čiji je aerodinamički prečnik manji ili jednak  $2.5\ \mu m$ ). Ove čestice sadrže elemente u tragovima, kao što su mineralni elementi i teški elementi koji potiču iz prirodnih izvora (površinska prašina, erozija zemljišta, vulkanske erupcije, šumski požari) ili antropogeni izvori (sagorevanje fosilnih goriva i drveta, industrija, saobraćaj, sagorevanje otpada). Iako se različite naučne i stručne institucije bave problemima aerozagađenja, ne postoji multidisciplinarni pristup prilikom uzorkovanja, analiza i tumačenja rezultata. Nekoliko studija povezuje čestice PM u ambijentalnom i zatvorenom vazduhu sa kancerogenim i nekancerogenim teškim metalima koji putem udisanja dospevaju u respiratorni sistem kao dominantan način izlaganja [3, 4]. Pored toga, ispitivanje radioaktivnosti suspendovanih čestica u atmosferi doprinela bi tačnijoj i sveobuhvatnoj proceni rizika po zdravlje stanovništva, kao i utvrđivanju da li su čestice prirodnog ili antropogenog porekla. I radioaktivne čestice i teški metali su svrstani u istu I grupu karcinogena za ljudska pluća prema WHO i IARC [5].

## 2. Ispitivano područje, materijal i metode

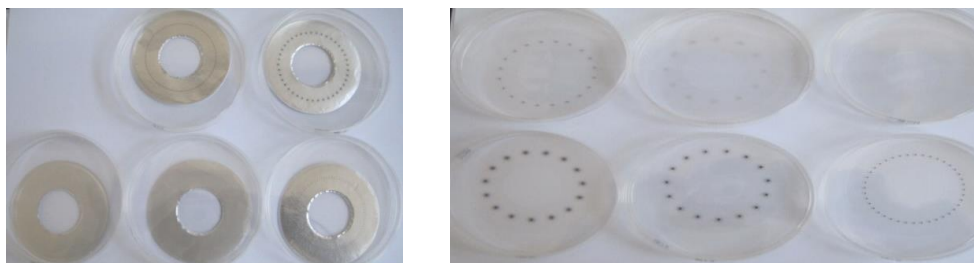
Uzorci čestica atmosferskog aerosola su sakupljani svaki šesti dan u cilju uključivanja svakog dana u nedelji [6] na mernoj stanici Beograd - Zeleno brdo ( $44^{\circ}47'11''$  severno i  $20^{\circ}31'18''$  istočno). Merna stanica Beograd - Zeleno brdo je deo državne mreže mernih stanica za automatski monitoring kvaliteta vazduha Republike Srbije od 2008. godine. Ova merna stanica je klasifikovana kao pozadinska (background) stanica koja se nalazi u suburbanjoj zoni, na oko 5 kilometara u pravcu istok-jugoistok od centra Beograda. Nalazi se na 240 m nadmorske visine i predstavlja najvišu tačku u Beogradu gde dominiraju pojedinačne porodične kuće i niska stambena gradnja, bez industrijskih aktivnosti u neposrednoj blizini. Uzorkivač je bio postavljen na visinu od 2,5 m iznad tla i zemljište prekriveno travom je izabrano za ispitivanje karakteristika sakupljenih čestica (Slika 1). Uzorkivač je bio udaljen od drugih objekata u radijusu od 50m. ISAP usisna vakuum pumpa radila je pri konstantnom protoku od 25 l/min.



**Slika 1. Kaskadni impaktor niskog pritiska Prof. Dr. Berner – LPI 25/0,0085/2 (levo) sa ISAP vakuum pumpa (sredina) i presa za montiranje (desno): a) osnovna ploča poluge (M-G), okvir (M-B), zavrtanj kompresije (M-S), matica (M-H), omotač impaktora (J-G), brava (I-V), b) impaktor sa omotačem spreman za upotrebu, c) niz faza impaktora, baza impaktora sa ispusnom ivicom i koordinantnom prskalicom (I-B), ulazni stalak impaktora (I-E), stalci impaktora (I-T1 do I-T11) (<https://www.isap.com>).**

### 2.1 Impaktor niskog pritiska Prof. Dr. Berner

Posebna karakteristika kaskadnog impaktora niskog pritiska Prof. Dr. Bernera – LPI 25/0,0085/2 je širok merni opseg veličina čestica od 0,008 do 16  $\mu\text{m}$ , pri primeni niskog pritiska, tako da celokupna raspodela čestica po veličinama može biti izmerena jednim uređajem. Uzorci čestica atmosferskog aerosola su sakupljeni na aluminijumskim i Tedlar (polivinil-fluorid) filterima (Slika 2). Aluminijumski filteri (mase od oko 0,09 g) su korišćeni za sakupljanje frakcija sitnijih čestica aerodinamičkog prečnika (u  $\mu\text{m}$ ): PM<sub>0,0085–0,018</sub> (f1), PM<sub>0,018–0,035</sub> (f2), PM<sub>0,035–0,07</sub> (f3), PM<sub>0,07–0,138</sub> (f4), PM<sub>0,138–0,27</sub> (f5); dok su Tedlar filteri (mase od oko 0,2 g) korišćeni za sakupljanje frakcija PM<sub>0,27–0,53</sub> (f6), PM<sub>0,53–1,06</sub> (f7), PM<sub>1,06–2,09</sub> (f8), PM<sub>2,09–4,11</sub> (f9), PM<sub>4,11–8,11</sub> (f10) i PM<sub>8,11–16</sub> (f11). Trajanje uzorkovanja za svaki set uzoraka je bilo 48h. U cilju identifikacije mogućih izvora kontaminacije, slepe probe su sakupljane koristeći istu proceduru, kao i za uzorke aerosola, ali bez korišćenja pumpe [7]. Uzorci sakupljeni na aluminijumskim i Tedlar filterima, kao i slepe probe stavljani su u Petri šolje i čuvani na temperaturi od -20°C do analize.



**Slika 2. Aluminijumski filteri sa deponitima – levo i Tedlar filteri sa deponitima – desno.**

Tehnika mikrotalasne digestije korišćena je za razaranje sakupljenog depozita aerosolnih čestica iz šest ispitivanih opsega veličina, od f6 do f11. Hemijske analize čestica atmosferskog aerosola su urađene u laboratoriji Katedre za analitičku hemiju, Hemijskog fakulteta, Univerziteta u Beogradu metodom masene spektrometrije sa induktivno spregnutom plazmom na uređaju Thermo Scientific iCAP Qc ICP-MS (Bremen, Germany). Gama spektrometrijska analiza suspendovanih čestica na filterima je izvršena na HPGe detektorima u pasivnoj zaštiti u toku 2020. godine. Jedan deo ispitivanja je obuhvatao merenje svake od 11 frakcija posebno, a drugi deo analizu svih 11 frakcija odjednom. U Laboratoriji za ispitivanje radioaktivnosti uzoraka i doze jonizujućeg i nejonizujućeg zračenja na Departmanu za fiziku, PMF-a u Novom Sadu izvršena su preliminarna merenja na HPGe detektoru velike zapremine, relativne efikasnosti od 100 % proširenog raspona energije od 6 keV do 3 MeV proizvođača Canberra USA, model GX10021 u originalnoj zaštiti od olova debljine 15 cm. Dva seta filtera u originalnim Petrijevim šoljama su merena direktno na kapi detektora, kao i 3 filtera iz jednog seta (frakcije f6, f7 i f8) posebno. Vreme merenja je iznosilo u opsegu od 80 – 160 ks. U Laboratoriji za nuklearnu i plazma fiziku, Instituta za nuklearne nauke „Vinča“, gamaspektrometrijska merenja su vršena na 2 HPGe detektora: ORTEC GEM 30–70, relativne efikasnosti od 37% i 1.7 keV rezolucije za  $^{60}\text{Co}$  na energiji od 1332.5 keV i Canberra GX5019, relativne efikasnosti od 55% i 1.9 keV rezolucije za  $^{60}\text{Co}$  na energiji od 1332.5 keV. Mereni su kompletni setovi filtera koji se odnose na određeni datum i vreme uzorkovanja koji su navedeni u Tabeli 2. (setovi pod rednim brojem: 14, 15, 21, 23, 24, 39, 40, 43, 44 i 72), kao i pojedinačne frakcije svih ovih

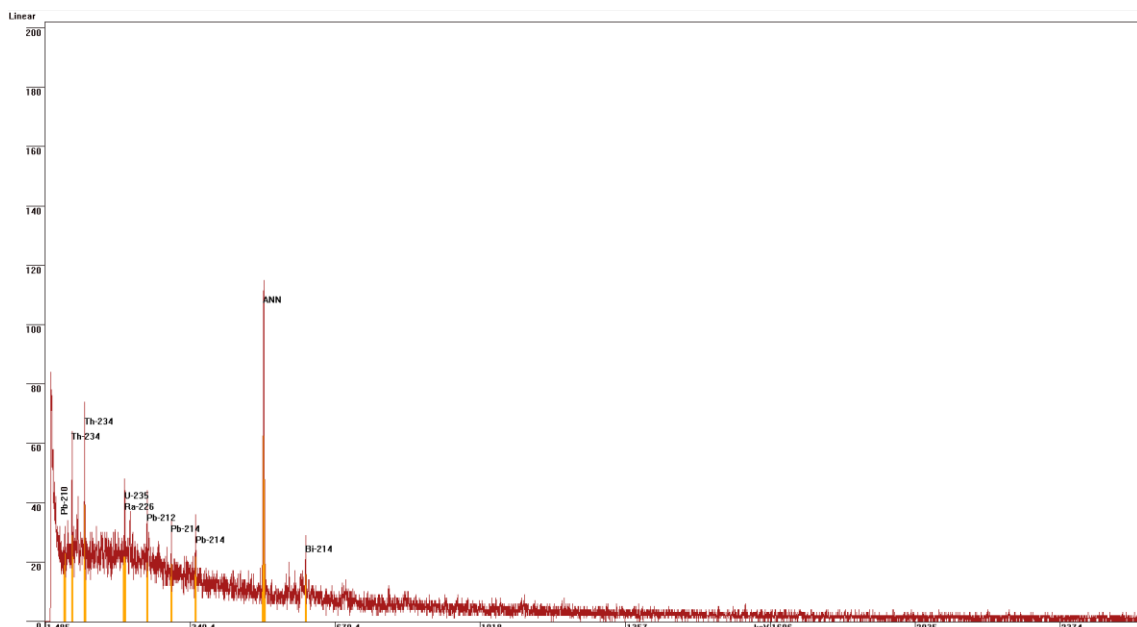
setova zajedno (rezultati navedeni u Tabeli 3). Vreme merenja je iznosilo u opsegu od 100 – 335 ks.

### 3. Rezultati ispitivanja

Na osnovu podataka o zapremini provučenog vazduha u m<sup>3</sup> tokom usisavanja i konstantnog protoka pumpe, na osnovu intenziteta linija u gama spektru (Slika 3) određene su specifične aktivnosti detektovanih radionuklida (Tabela 1 i 2). Koncentracija aktivnosti radijuma određena je na osnovu intenziteta linije 186,1 keV. U tabelama su dati podaci o datumu i vremenu trajanja uzorkovanja u satima. U Tabeli 1 su dati rezultati gama-spektrometrijskih merenja u Laboratoriji za ispitivanje radioaktivnosti uzoraka i doze jonizujućeg i nejonizujućeg zračenja na Departmanu za fiziku, PMF-a u Novom Sadu i to pojedinih frakcija f6, f7 i f8 (oznake seta: 55-6, 55-7 i 55-8; kao i celih setova filtera u kompletu (66 i 73)). U Tabeli 2 su dati rezultati gama-spektrometrijskih merenja pojedinih setova filtera (svih frakcija), dok su u Tabeli 3 prikazane ukupne aktivnosti pojedinih frakcija svih izmerenih setova u Laboratoriji za nuklearnu i plazma fiziku, Instituta za nuklearne nauke „Vinča“.

**Tabela 1. Rezultati gama-spektrometrijskih ispitivanja filtera na Departmanu za fiziku, PMF-a u Novom Sadu.**

SET	Datum uzorkovanja	t <sub>U</sub> [h]	V [m <sup>3</sup> ]	<sup>40</sup> K [mBq/m <sup>3</sup> ]	<sup>232</sup> Th [mBq/m <sup>3</sup> ]	<sup>226</sup> Ra [mBq/m <sup>3</sup> ]	<sup>210</sup> Pb [mBq/m <sup>3</sup> ]	<sup>238</sup> U [mBq/m <sup>3</sup> ]
55-6	2-4.2.2013.	48	77,472	1,9±1,1	0,28±0,13	0,29±0,09	< MDA	< MDA
55-7				2,6±1,3	1,3±0,4	1,8±0,5	< MDA	< MDA
55-8				< MDA	< MDA	0,91±0,21	< MDA	< MDA
66	9-11.4.2013.	48	77,472	< MDA	0,72±0,25	2,6±1,5	22±13	27±6
73	27-29.5.2013.	51	82,314	< MDA	1,3±0,8	3,4±1,8	16±10	28±6



**Slika 3. Gama spektar suspendovanih čestica SET 66 sa identifikacijom gama linija.**

**Tabela 2. Rezultati gama-spektrometrijskih ispitivanja setova filtera u Laboratoriji za nuklearnu i plazma fiziku, Instituta za nuklearne nauke „Vinča“.**

SET	Datum uzorkovanja	V [m <sup>3</sup> ]	<sup>210</sup> Pb [mBq/m <sup>3</sup> ]	<sup>235</sup> U [mBq/m <sup>3</sup> ]	<sup>238</sup> U [mBq/m <sup>3</sup> ]	<sup>40</sup> K [mBq/m <sup>3</sup> ]	<sup>226</sup> Ra [mBq/m <sup>3</sup> ]	<sup>228</sup> Ac [mBq/m <sup>3</sup> ]
14	19-21.05.2012.	77,472	0,62±0,14	0,15±0,04	1,23±0,26	3,37±0,21	2,18±0,18	0,22±0,04
15	25-27.05.2012.	77,472	23±5	0,168±0,013	1,5±0,6	2,14±0,14	2,8±0,3	<MDA
21	30.06.-02.07.2012.	77,472	0,49±0,03	0,035±0,003	1,14±0,28	<MDA	<MDA	<MDA
23	06-08.07.2012.	45,192	<MDA	0,019±0,002	9±2	12,6±0,08	<MDA	<MDA
24	10-12.07.2012.	72,63	<MDA	0,044±0,004	1,5±0,2	2,09±0,12	<MDA	<MDA
39	11-13.10.2012.	77,472	<MDA	0,22±0,04	5,4±1,4	2,75±0,15	<MDA	<MDA
40	17-19.10.2012.	77,472	9,4±1,7	0,15±0,03	6,8±1,7	4,18±0,23	<MDA	<MDA
43	4-6.11.2012.	77,472	<MDA	0,059±0,008	0,71±0,19	0,29±0,02	<MDA	<MDA
44	10-12.11.2012.	77,472	23±3	0,090±0,013	8,4±0,4	<MDA	0,29±0,03	<MDA
72	21-23.05.2013.	77,472	<MDA	0,10±0,01	4,0±0,9	1,50±0,12	<MDA	<MDA

**Tabela 3. Ukupne aktivnosti pojedinih frakcija svih setova zajedno (setovi: 14, 15, 21, 23, 24, 39, 40, 43, 44 i 72) ispitanih u Laboratoriji za nuklearnu i plazma fiziku, Instituta za nuklearne nauke „Vinča“.**

Oznaka frakcije	<sup>210</sup> Pb [Bq]	<sup>235</sup> U [Bq]	<sup>238</sup> U [Bq]	<sup>40</sup> K [Bq]	<sup>226</sup> Ra [Bq]	<sup>228</sup> Ac [Bq]
f1	1,2(3)	0,010(1)	0,35(8)	0,32(2)	0,14(2)	0,023(4)
f2	<MDA	<MDA	<MDA	<MDA	<MDA	<MDA
f3	0,23(2)	0,035(5)	0,48(13)	<MDA	<MDA	<MDA
f4	<MDA	0,0006(2)	0,025(7)	0,127(8)	<MDA	<MDA
f5	0,78(13)	0,009(1)	0,35(9)	0,222(13)	<MDA	0,012(2)
f6	<MDA	0,0054(13)	0,038(1)	0,027(2)	<MDA	<MDA
f7	2,23(13)	0,026(3)	0,31(6)	0,022(1)	<MDA	<MDA
f8	<MDA	<MDA	0,19(3)	0,091(6)	<MDA	0,091(6)
f9	0,23(5)	0,013(9)	0,492(9)	0,34(2)	0,070(5)	0,0033(5)
f10	<MDA	<MDA	0,18(5)	0,060(4)	<MDA	<MDA
f11	0,69(9)	0,0007(2)	<MDA	0,026(2)	<MDA	<MDA

Rezultati hemijskih analiza čestica atmosferskog aerosola dati su u Tabeli 4. Najzastupljeniji elementi u ispitivanom aerosolu su bili Ca, Fe, Al, K i Mg. Najveći procentualni udeo elemenata As, Cd, K, Pb i Sb bio je prisutan u frakcijama čestica finog moda, dok su u grubom modu dominirali Al, Ba, Ca, Cr, Fe, Mg, Mn i Ti.

**Tabela 4. Raspon koncentracija čestica ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) na svim ispitanim filterima po frakcijama u periodu od marta 2012. do decembra 2013. godine [6].**

Frakcija (opseg dijametara)	Raspon koncentracija čestica [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]
f1 (0,0085–0,018 $\mu\text{m}$ )	0,00 – 1,29
f2 (0,018–0,035 $\mu\text{m}$ )	0,13 – 1,81
f3 (0,035–0,07 $\mu\text{m}$ )	0,00 - 2,32
f4 (0,07–0,138 $\mu\text{m}$ )	0,39 – 4,26
f5 (0,138–0,27 $\mu\text{m}$ )	0,65 – 7,74
f6 (0,27–0,53 $\mu\text{m}$ )	1,94 – 22,46
f7 (0,53–1,06 $\mu\text{m}$ )	1,55 – 42,85
f8 (1,06–2,09 $\mu\text{m}$ )	1,03 – 30,46
f9 (2,09–4,11 $\mu\text{m}$ )	0,90 – 13,81
f10 (4,11–8,11 $\mu\text{m}$ )	0,90 – 10,58
f11 (8,11–16 $\mu\text{m}$ )	0,90 – 9,04

#### 4. Diskusija rezultata i zaključak

Gama-spektrometrijska metoda je dovoljno precizna za merenje radioaktivnosti suspendovanih čestica iz atmosfere uzorkovanih na filterima kaskadnog impaktora niskog pritiska koji je u stanju da razdvoji fine frakcije uzorkovanih čestica u skladu sa međunarodnim standardima. Prednost ove metode je nedestruktivna i brza priprema uzoraka za merenje i preporuka je da se izvrše promptna merenja odmah nakon uzorkovanja zbog mogućnosti detekcije radonovih i toronovih potomaka pre sečenja filtera za mikrotalasnu digestiju. U radu su dati preliminarni rezultati ispitivanja sadržaja radionuklida filtera sa uzorkovanim suspendovanim česticama iz atmosfere koja su sprovedena u dve naučne institucije sa različitim detektorskim sistemima. Prirodni radionuklidi – kalijum, torijum, radijum, olovo i uranijum su detektovani u tragovima, dok antropogeni radionuklidi nisu detektovani ni u jednom ispitivanom uzorku. Problemi detekcije koji zaslužuju detaljniju analizu u narednom periodu su: problem fona i ispitivanje čistih nosača, filtera/Petrijevih šolja zbog preciznijeg određivanja aktivnosti samih suspendovanih čestica i drugi problem određivanja efikasnosti za komplikovanu geometriju uzorka.

Poređenjem rezultata ispitivanja radioaktivnosti (Tabele 1 i 3) i koncentracija čestica po frakcijama (Tabela 4), može se zaključiti da se maksimalne koncentracije mere u frakcijama f6, f7 i f8 koje predstavljaju finu komponentu koja se vezuje za sagorevanje fosilnih goriva i izuzetno se registruje tokom jesenjih i zimskih meseci [6]. Gruba frakcija f9, f10 i f11 koja se objašnjava dominantno resuspenzijom prašine i čestice zemljišta takođe sadrži prirodne radionuklide (kalijum, uranijum i olovo) što ukazuje na prirodno poreklo ove frakcije koja je dominantna u toku prolećnih i letnjih meseci zbog intenzivnog dejstva vetrova.

Ispitivanje korelacije koncentracija aktivnosti radionuklida i elementarnog sastava suspendovanih čestica iz atmosfere na pojedinim setovima (Tabela 5) pokazuju dobro slaganje za većinu ispitanih radionuklida (osim za  $^{40}\text{K}$ ) i detektovanih hemijskih elemenata, što verovatno ukazuje na isto poreklo.



**Tabela 5. Vrednosti Pirsonovih koeficijenata linearne regresione analize korelacija između koncentracija aktivnosti radionuklida i koncentracije hemijskih elemenata za pojedine setove.**

r	<sup>40</sup> K	<sup>232</sup> Th	<sup>226</sup> Ra	<sup>210</sup> Pb	<sup>238</sup> U
Na	-0,65	0,5	0,9	0,94	0,99
Mg	-0,44	0,56	0,76	0,52	0,7
Al	-0,61	0,54	0,9	0,85	0,95
K	-0,13	0,19	0,35	0,74	0,61
Ca	-0,63	0,49	0,83	0,68	0,82
Ti	-0,46	0,1	0,27	0,3	0,45
V	-0,35	0,06	0,38	0,79	0,64
Cr	0,21	0,92	0,73	0,42	0,43
Mn	-0,6	0,56	0,9	0,81	0,92
Fe	-0,53	0,59	0,87	0,7	0,84
Co	-0,48	0,09	0,49	0,86	0,72
Cu	-0,58	0,54	0,86	0,72	0,86
Zn	-0,65	0,46	0,88	0,97	1
As	-0,44	0,57	0,77	0,55	0,72
Cd	-0,53	0,55	0,84	0,76	0,88
Sb	-0,39	0,56	0,71	0,43	0,62
Ba	-0,4	0,55	0,71	0,44	0,63
Pb	-0,42	0,55	0,73	0,47	0,65

Međutim poređenje izmerenih koncentracija elemenata i ukupne aktivnosti u pojedinim frakcijama svih ispitanih setova na istom detektorskom sistemu (Tabela 6) dobijaju se većinom negativne ili niske korelacije što najverovatnije ukazuje na veliku zavisnost od vremenskih prilika i grejne sezone.

**Tabela 6. Vrednosti Pirsonovih koeficijenata linearne regresione analize korelacija između koncentracija aktivnosti radionuklida i koncentracija hemijskih elemenata za frakcije f6 – f11 svih setova (setovi: 14, 15, 21, 23, 24, 39, 40, 43, 44 i 72).**

r	<sup>210</sup> Pb	<sup>235</sup> U	<sup>238</sup> U	<sup>40</sup> K	<sup>226</sup> Ra	<sup>228</sup> Ac
Na	-0,35	-0,69	-0,27	-0,1	-0,26	0,62
Mg	-0,45	-0,64	-0,08	0,08	-0,02	0,07
Al	-0,2	-0,54	-0,29	0,03	0,02	-0,09
K	-0,12	-0,33	-0,35	-0,4	-0,54	0,9
Ca	-0,38	-0,72	-0,38	-0,13	-0,2	-0,01
Ti	0	-0,38	-0,24	0	-0,02	0,17
V	-0,72	-0,25	0,22	0,45	0,37	0,24
Cr	-0,01	0,08	0,7	0,74	0,69	0,09
Mn	-0,34	-0,48	0	0,07	-0,13	0,94
Fe	-0,42	-0,52	0,13	0,26	0,07	0,8
Co	0,06	-0,31	-0,42	-0,12	-0,05	-0,19
Cu	-0,16	-0,16	0	-0,09	-0,25	0,95
Zn	-0,34	-0,44	-0,08	0,02	-0,17	0,99
As	-0,07	-0,49	-0,48	-0,21	-0,25	0,37
Cd	0,47	0,47	-0,04	-0,43	-0,44	0,38
Sb	-0,29	-0,39	-0,11	-0,06	-0,24	0,99
Ba	-0,36	-0,22	0,55	0,8	0,74	0,03
Tl	0,32	0,37	0,41	0,55	0,65	-0,25
Pb	-0,21	-0,25	0,02	-0,01	-0,19	0,99

### 5. Zahvalnica

Rad je podržan od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije Ugovorima br. 451-03-9/2021-14/ 200125, 451-03-9/2021-14/200026 i br. No. 451-03-9/2021-14/ 200017.

### 6. Literatura

- [1] Directive 2008/50/EC on ambient air quality and cleaner air for Europe
- [2] Uredba o uslovima za monitoring i zahtevima kvaliteta vazduha, "Službeni glasnik Republike Srbije" br. 11/2010, 75/2010 i 63/2013
- [3] Hernández, F., Hernández-Armas, J., Catalán, A., Fernández-Aldecoa, J.C., Karlsson, L., 2004. Gross alpha, gross beta activities and gamma emitting radionuclides composition of airborne particulate samples in an oceanic island. *Atmos. Environ.* 39, 4057–4066.
- [4] Marguerite M. Nyhana, Mary Rice, Annelise Blomberg, Brent A. Coull, Eric Garshick, Pantel Vokonas, Joel Schwartz, Diane R. Gold, Petros Koutrakis, 2019. Associations between ambient particle radioactivity and lung function *Environment International* 130, 104795
- [5] IARC Scientific Publications; 161, 2013, Air pollution and cancer, editors, K. Straif, A. Cohen, J. Samet ISBN 978-92-832-2166-1
- [6] Đorđević D., A. Mihajlidi-Zelić A., Relić D., Ignjatović Lj., Huremović J., Stortini A.M., Gambaro A., 2012. Size-segregated mass concentration and water-soluble inorganic ions in an urban aerosol of the Central Balkans (Belgrade). *Atmospheric Environment* 46, 309-317.
- [7] Karanasiou, A. A., Sitaras, I. E., Siskos, P. A., & Eleftheriadis, K.(2007). Size distribution and sources of trace metals and nalkanes in the Athens urban aerosol during summer. *Atmospheric Environment*, 41, 2368–2381.

## RADIOACTIVITY TESTING OF SUSPENDED ATMOSPHERIC PARTICLES SAMPLED BY LOW PRESSURE CASCADE IMPACTOR

**Sofija FORKAPIĆ<sup>1</sup>, Dragana ĐORĐEVIĆ<sup>2</sup>, Jelena ĐURIČIĆ-MILANKOVIĆ<sup>3</sup>,  
Igor ČELIKOVIĆ<sup>4</sup>, Aleksandar KANDIĆ<sup>4</sup>, Jan HANSMAN<sup>1</sup> and Kristina BIKIT<sup>1</sup>**

1) *University of Novi Sad, Faculty of Sciences, Trg Dositeja Obradovića 4, 21000*

*Novi Sad, Serbia, [sofija@df.uns.ac.rs](mailto:sofija@df.uns.ac.rs), [jan.hansman@df.uns.ac.rs](mailto:jan.hansman@df.uns.ac.rs),  
[kristina.bikit@df.uns.ac.rs](mailto:kristina.bikit@df.uns.ac.rs)*

2) *Institute of Chemistry, Technology and Metallurgy - Centre of Excellence in  
Environmental Chemistry and Engineering, Njegoševa 12 (Studentski trg 12-16),  
11000 Beograd, [dragadj@chem.bg.ac.rs](mailto:dragadj@chem.bg.ac.rs)*

3) *Academy of Applied Studies Šabac, Department of Medical and  
Business-Technological Studies, Hajduk Veljkova 10, Šabac,  
[jdjuricmilankovic@vmpts.edu.rs](mailto:jdjuricmilankovic@vmpts.edu.rs)*

4) *Institute of Nuclear Sciences, University of Belgrade, Laboratory for Nuclear  
and Plasma Physics, Mike Petrovića Alasa 12-14, Vinča, Beograd,  
[icelikovic@vin.bg.ac.rs](mailto:icelikovic@vin.bg.ac.rs), [akandic@vin.bg.ac.rs](mailto:akandic@vin.bg.ac.rs)*

### ABSTRACT

The main sources of air pollution in Serbia are the energy sector, which includes thermal power plants, heating plants and individual heating of households, then the transport sector and industrial activity (oil refineries, chemical industry, mining, etc.). It is estimated that the number of premature deaths caused by air pollution in Serbia is among the highest in Europe. The most important parameters for monitoring are the concentration of particles and their size distribution. Sampling of suspended atmospheric particles (particulate matter - PM) fractionated by size was conducted in the period from March 2012 to December 2013 in the suburban part of Belgrade at the background measuring station Zeleno brdo, as a receptor site. Every sixth day, one averaged 48-hour sample of aerosol particles was taken, separated into eleven intervals of aerodynamic particle diameters ( $D_p$ ) using a low-pressure cascade impactor prof. dr. Berner-LPI \25 /0.0085 /2. The microwave digestion technique was used to destroy the collected aerosol particle deposit from the six tested size ranges:  $0.27 \leq D_p \leq 0.53 \mu\text{m}$ ,  $0.53 \leq D_p \leq 1.06 \mu\text{m}$ ,  $1.06 \leq D_p \leq 2.09 \mu\text{m}$ ,  $2.09 \leq D_p \leq 4.11 \mu\text{m}$ ,  $4.11 \leq D_p \leq 8.11 \mu\text{m}$  and  $8.11 \leq D_p \leq 16 \mu\text{m}$ . Concentrations of 25 test elements were determined using induced conjugated plasma by mass spectrometry. The most common elements in the tested aerosol were Ca, Fe, Al, K and Mg. The highest percentage of As, Cd, K, Pb and Sb was present in the fractions of fine mode particles, while in the coarse mode Al, Ba, Ca, Cr, Fe, Mg, Mn and Ti dominated. Subsequently, gamma spectrometric analysis of the samples was performed. One part of the study included the measurement of each of the 11 fractions separately, and the other part the analysis of all 11 fractions at once. Also, the activities of several different samples of the same fraction were measured. Traces of natural radionuclides were found in the spectrum, while radionuclides of artificial origin were not detected. The paper discusses the investigated correlations of the obtained results of the activity concentrations of radionuclides with the dominant elemental composition and particle diameter, as well as the possible origin of air pollution.

## <sup>131</sup>I У ВАЗДУХУ У НЕПОСРЕДНОЈ ОКОЛИНИ ИНСТИТУТА ЗА МЕДИЦИНУ РАДА СРБИЈЕ "ДР ДРАГОМИР КАРАЈОВИЋ" У БЕОГРАДУ

Сузана БОГОЈЕВИЋ, Ирена ТАНАСКОВИЋ, Јована ИЛИЋ и Весна АРСИЋ

*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),*

*[jovana.ilic@institutkarajovic.rs](mailto:jovana.ilic@institutkarajovic.rs), [yesna.arsic@institutkarajovic.rs](mailto:yesna.arsic@institutkarajovic.rs)*

### САДРЖАЈ

У оквиру мониторинга радионуклида у животној средини у Београду, у Институту за медицину рада Србије "Др Драгомир Карајовић", врши се праћење садржаја вештачких радионуклида у приземном слоју ваздуха, у дворишту зграде Института. Прате се концентрације вештачког <sup>137</sup>Cs, као и радионуклида космогеног порекла <sup>7</sup>Be. За узорковање ваздуха користи се пумпа АСС-500, произвођача из Пољске, просечног протока ваздуха 600 m<sup>3</sup>/h. Мерње седмичних узорака се врши на гамаспектрометријском систему са полупроводничким детекторима (HPGe) ефикасности 25% и 40%. Време мерења износило је 250.000 s. Крајем 2020. године (новембар и децембар) идентификован је <sup>131</sup>I у концентрацијама од 1,0 до 2,2 μBq/m<sup>3</sup>, као и у 2021. години у фебруару у концентрацијама од 0,9 до 2,4 μBq/m<sup>3</sup>. Измерене концентрације су веома ниске и нису регистроване на осталим мерним местима у Београду, као ни глобално, што указује на тип локалног испуштања <sup>131</sup>I у ваздух.

### 1. Увод

<sup>131</sup>I је вештачки радионуклид времена полураспада од око 8 дана, емитује бета минус и гама зрачење. Производи се у нуклеарним реакторима, бомбардовањем телура неутронима и присутан је у значајним количинама у производима нуклеарне фисије – чини око 3% (тежинских) укупних фисионих продуката цепања језгара урана и плутонијума. Као бета емитер <sup>131</sup>I може да продре неколико милиметара у површински слој коже и узрокује мутације и смрт ћелија и веома је опасан при уношењу у организам ингестијом и инхалацијом пошто се концентрише у тироидној жлезди. Користи се у нуклеарној медицини за дијагностику и терапију.

У нормалним условима <sup>131</sup>I се не налази у животној средини у детектабилним количинама. Након нуклеарних проба у атмосфери и акцидентна нуклеарних постројења може доћи до глобалне контаминације ваздуха радиоактивним материјама. Са обзиром да се 60-тих година престало са атмосферским нуклеарним пробама, на радиоактивну контаминацију највише утичу нуклеарни акциденти. Најзначајније последице на животну средину су оставили акцидент на 4. блоку нуклеарне електране у Чернобилу у априлу 1986. године и акцидент у нуклеарној електрани Фукушима у Јапану у марту 2011. године. Приликом та два акцидента је велика количина радиоактивног материјала доспела у животну средину и, у зависности од атмосферских прилика, дошло је доконтаминације широм земљине кугле. У нашој земљи је после ових акцидентата, уз друге радионуклиде (<sup>137</sup>Cs, <sup>134</sup>Cs, <sup>90</sup>Sr,...) регистрован је и <sup>131</sup>I у концентрацијама реда 1 Bq/m<sup>3</sup> ваздуха после Чернобилског, односно 0,001 Bq/m<sup>3</sup> ваздуха после акцидента у Фукушими [1-4].

Као последица Чернобилског акцидента, вештачки радионуклид <sup>137</sup>Cs, времена полураспада око 30 година, који је путем падавина доспео на територију наше

земље, задржао се на површини земљишта, одакле ресуспензијом доспева у површинске слојеве ваздуха. Највећа вредност овог радионуклида, у мају 1986. године, била је реда величине  $0,1 \text{ Bq/m}^3$  [1].  $^{137}\text{Cs}$  још увек може да се региструје у ваздуху у Београду, у концентрацијама  $1\text{--}6 \mu\text{Bq/m}^3$  [2-4]. Због много краћег времена полураспада, концентрације  $^{131}\text{I}$  у животној средини су већ крајем 1986. године опале испод границе детекције, све до акцидента у нуклеарној електрани Фукушима у Јапану. Приликом акцидента у Фукушими, у последњој недељи марта месеца 2011. године, у узорцима аеросола у Београду детектовани су  $^{131}\text{I}$ ,  $^{134}\text{Cs}$  и  $^{137}\text{Cs}$ . 29-30 марта измерене су највеће вредности концентрација од  $0,14 \text{ mBq/m}^3$  за  $^{134}\text{Cs}$  и  $0,16 \text{ mBq/m}^3$  за  $^{137}\text{Cs}$  [2]. Активност  $^{131}\text{I}$  варира је од  $0,03$  до  $1,6 \text{ mBq/m}^3$  у периоду 23.3.-19.4. 2011. године, да би већ крајем априла пала испод границе детекције [2].

Због могућности контаминације, неопходна је контрола радиоактивности у животној средини која подразумева систематско праћење концентрација радионуклида у ваздуху, води, земљишту, као и прехранбеним производима за људе и животиње, што је обухваћено програмом мониторинга животне средине у Републици Србији. Саставни део мониторинг програма је праћење активности радионуклида у ваздуху. Прате се концентрације вештачког  $^{137}\text{Cs}$  ( $T_{1/2}$  30 година), као и радионуклида космогеног порекла  $^7\text{Be}$  ( $T_{1/2}$  53 дана) који настаје као резултат спалације протона и неутрона високе енергије са азотом и кисеоником у атмосфери.

### 2. Експериментални део

До 2007. године прикупљање узорака вршено је пумпама за узимање узорака ваздуха које имају мали проток –  $7,5 \text{ m}^3/\text{h}$ . Од 2007. године за узорковање ваздуха користи се пумпа АСС-500, произвођача из Пољске, просечног протока ваздуха  $600 \text{ m}^3/\text{h}$ . Ваздух се непрекидно просисава кроз филтер папир тип Петрианов, FPP-15-1.5, на висини од  $1 \text{ m}$  изнад некултивисане травнате површине у дворишту Института за медицину рада Србије "Др Драгомир Карајовић" - ИМРС. Дневни проток је око  $14\,000 \text{ m}^3$  ваздуха [2-4].

Редовна гамаспектрометријска мерења врше се на композитним седмичним узорцима ваздуха. Изузетно, након акцидента у нуклеарној електрани Фукушима у Јапану, гамаспектрометријска мерења вршена су свакодневно. Узорци аеросола мере се на два чиста германијумска детектора релативне ефикасности  $25\%$  и  $40\%$  и енергетске резолуције  $1,85$  и  $1,95 \text{ keV}$ , респективно. Време мерења износило је  $250.000 \text{ s}$ . Енергетска калибрација и калибрација на ефикасност обавља се помоћу радиоактивног стандарда који је направљен у Институту, накапавањем сертификованог раствора на филтер истих геометријских карактеристика као код узорака за испитивање. Специфична активности  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^7\text{Be}$  и  $^{131}\text{I}$  одређене су на основу линија:  $661,7 \text{ keV}$ ;  $477,6 \text{ keV}$  и  $364,5 \text{ keV}$ , респективно. Време мерења узорка као и основног зрачења је  $250\,000 \text{ s}$ .

### 3. Резултати и дискусија

Гамаспектрометријска анализа композитних месечних узорака ваздуха у Београду показује спектар углавном радионуклида природног порекла (у табели 1 је приказан само космогени радионуклид,  $^7\text{Be}$ ) и вештачког радионуклида  $^{137}\text{Cs}$ .

Табела 1. Концентрације радионуклида у ваздуху у непосредној околини ИМРС.

Месец	Недеља (време излгања)	Проток пумпе ( $m^3$ )	$^{137}Cs$ ( $\mu Bq/m^3$ )	$^7Be$ ( $mBq/m^3$ )	$^{131}I$ ( $\mu Bq/m^3$ )
<b>2020. година</b>					
Новембар	I	-	-	-	-
	II (06.11.-12.11.)	51 810	$2,8 \pm 0,6$	$2,2 \pm 0,1$	<b><math>2,1 \pm 0,1</math></b>
	III (13.11.-23.11.)	100 856	$< 0,8$	$4,4 \pm 0,1$	$< 0,3$
	IV (24.11.-30.11.)	74 200	$1,7 \pm 0,1$	$3,0 \pm 0,1$	<b><math>2,2 \pm 0,1</math></b>
Децембар	I (31.11.-07.12.)	90 317	$3,4 \pm 0,2$	$2,3 \pm 0,1$	<b><math>1,6 \pm 0,1</math></b>
	II (07.12.-17.12.)	124 723	$1,3 \pm 0,1$	$0,8 \pm 0,1$	<b><math>1,0 \pm 0,4</math></b>
	III (18.12.-25.12.)	90 499	$1,6 \pm 0,4$	$1,2 \pm 0,1$	$< 0,3$
	IV (26.12.20.04.01.21.)	112 114	$1,3 \pm 0,1$	$2,5 \pm 0,1$	$< 0,3$
<b>2021. година</b>					
Јануар	I (04.01- 10.01.)	78 453	$1,8 \pm 0,2$	$2,4 \pm 0,3$	$< 0,3$
	II (011.01.-17.01.)	81 745	$< 0,8$	$2,1 \pm 0,1$	$< 0,3$
	III (18.01.-22.01.)	60 889	$2,2 \pm 0,3$	$3,5 \pm 0,1$	$< 0,3$
	IV (23.01.29.01.)	90 630	$< 0,4$	$2,9 \pm 0,1$	$< 0,3$
Фебруар	I (30.01. – 05.02.)	71 457	$1,6 \pm 0,2$	$1,8 \pm 0,1$	<b><math>0,9 \pm 0,3</math></b>
	II (06.02.-12.02.)	65788	$1,4 \pm 0,3$	$2,6 \pm 0,7$	$< 0,6$
	III (13.02.-19.02.)	90162	$2,2 \pm 0,2$	$3,9 \pm 0,1$	$< 0,3$
	IV (20.02.-26.02.)	78933	$4,2 \pm 0,4$	$4,4 \pm 0,1$	<b><math>2,4 \pm 0,6</math></b>
Март	I (27.03. – 05.03.)	58176	$4,0 \pm 0,1$	$3,0 \pm 0,1$	$< 0,5$
	II (06.03.-12.03.)	72871	$3,1 \pm 0,3$	$5,8 \pm 0,2$	$< 0,3$
	III (13.03.-19.03.)	96749	$0,6 \pm 0,2$	$2,5 \pm 0,1$	$< 0,7$
	IV (19.03.-31.03.)	126127	$0,9 \pm 0,1$	$3,2 \pm 0,1$	$< 0,3$
Април	I (01.04. - 09.04.)	78047	$1,5 \pm 0,2$	$6,5 \pm 0,2$	$< 0,6$
	II (09.01.-16.04.)	92881	$1,0 \pm 0,2$	$4,9 \pm 0,1$	$< 0,5$
	III (16.04.-23.04.)	101394	$1,1 \pm 0,1$	$2,2 \pm 0,1$	$< 0,7$
	IV (23.04.-30.04.)	81581	$< 0,5$	$7,3 \pm 0,2$	$< 0,6$
Мај	I (01.05- 07.01.)	103543	$0,7 \pm 0,2$	$6,0 \pm 0,2$	$< 0,4$
	II (07.05.-18.05.)	101784	$< 0,3$	$6,0 \pm 0,1$	$< 0,4$
	III (19.05. – 25.05.)	100934	$< 0,4$	$3,6 \pm 0,1$	$< 0,2$
	IV (25.05. – 31.05.)	143332	$< 0,3$	$5,1 \pm 0,1$	$< 0,4$
Јун	I (31.05. – 08.06.)	93534	$1,1 \pm 0,2$	$10,5 \pm 0,3$	$< 0,2$
	II (08.06. – 14.06.)	102408	$< 0,2$	$8,3 \pm 0,2$	$< 0,3$
	III (14.06. – 21.06.)	98926	$0,5 \pm 0,1$	$5,0 \pm 0,1$	$< 0,2$
	IV (21.06. – 30.06.)	83512	$1,4 \pm 0,2$	$8,9 \pm 0,2$	$< 0,3$
Јул	I (30.06. – 09.07.)	112598	$0,7 \pm 0,2$	$6,1 \pm 0,2$	$< 0,5$
	II (09.07. – 16.07.)	100992	$0,6 \pm 0,3$	$8,7 \pm 0,1$	$< 0,3$
	III (16.07. – 23.07.)	102793	$0,8 \pm 0,1$	$10,3 \pm 0,1$	$< 0,7$
	IV (23.06. – 30.07.)	96017	$< 0,3$	$6,9 \pm 0,2$	$< 0,4$
Август	I (30.07. – 06.08.)	99270	$< 0,4$	$7,9 \pm 0,2$	$< 0,6$
	II (06.08. – 13.08.)	96570	$< 0,7$	$5,8 \pm 0,1$	$< 0,5$
	III (13.08. – 20.08.)	93144	$< 0,9$	$5,1 \pm 0,1$	$< 0,6$
	IV (21.06. – 30.06.)	83512	$1,4 \pm 0,2$	$8,9 \pm 0,2$	$< 0,3$

Вредности концентрације  ${}^7\text{Be}$  (у  $\text{mBq/m}^3$ ) прате сезонске варијације овог радионуклида у ваздуху. Концентрације  ${}^{137}\text{Cs}$  су за три реда величине мање ( $\mu\text{Bq/m}^3$ ) у односу на  ${}^7\text{Be}$  и одговарају вишегодишњем просеку [4]. У новембру и децембру 2020. године, као и у фебруару 2021. године, регистрован је  ${}^{131}\text{I}$  у ваздуху у околини ИМРС, у концентрацијама од 0,9 - 2,4  $\mu\text{Bq/m}^3$  ваздуха. Након овог периода, закључно са августом 2021. концентрације  ${}^{131}\text{I}$  су поново пале испод границе детекције која се, у зависности од количине пропуштеног ваздуха, кретала у интервалу: 0,2 – 0,7  $\mu\text{Bq/m}^3$  ваздуха, Табела 1 [4].

#### 4. Закључак

У периоду који се односи на приказане резултате мерења, није регистрован ни један нуклеарни акцидент који би могао да доведе до радиоактивне контаминације атмосфере. Концентрације  ${}^{137}\text{Cs}$  не одступају од вишегодишњег просека а, концентрације  ${}^7\text{Be}$  показују уобичајене сезонске варијације. Осим  ${}^{131}\text{I}$ , није регистровано присуство других вештачких радионуклида у ваздуху. Измерене концентрације  ${}^{131}\text{I}$  су веома ниске, хиљаду пута су мање од оних измерених после акцидента у Фукушими и милион пута мање у односу на мерења после Чернобилског акцидента (у нашој земљи) а, нису ни регистроване на осталим мерним местима у Београду, као ни глобално, што указује на тип локалног испуштања  ${}^{131}\text{I}$  у ваздух. У случају да се овакви налази понове, било би неопходно урадити додатна испитивања како би се лоцирао извор испуштања  ${}^{131}\text{I}$  у ваздух.

#### 5. Литература

- [1] Гордана К. Пантелић, Марија М. Јанковић, Јелена Д. Крнета Николић, Драгана Ј. Тодоровић, Милица М. Рајачић, Наташа Б. Сарап, „Акциденти и мониторинг радиоактивности“ Монографија ЧЕРНОБИЛ 30 година после, Друштво за заштиту од зрачења Србије и Црне Горе, 2016, 18-40.
- [2] Маја Еремић Свковић, Ирена Танасковић, Љиљана Јаворина, Гордана Пантелић, Ведрана Вулетић, "Контрола радиоактивности ваздуха у Београду", XXVI Симпозијум ДЗЗСЦГ, Тара, 12- 14. октобар 2011. године, Зборник радова стр. 116-119.
- [3] Ирена Петровић, Р. Брновић, Љ. Мијатовић, М. Вукотић и Г. Пантелић, „Радиоактивност у ваздуху и падавинама у Србији за период 1984-1994“, ЈДЗЗ, „Чернобил 10 година после“, Саветовање Будва јун 1996, Зборник радова стр. 63-66.
- [4] Годишњи елаборати: Радиоактивност животне средине у Београду, Извештаји ИНН „Винча“ и ИМРС ”др Драгомир Карајовић”, Београд, 2004-2020. године.

**<sup>131</sup>I IN THE AIR IN THE IMMEDIATE VICINITY OF THE SERBIAN  
INSTITUTE OF OCCUPATIONAL HEALTH "DR DRAGOMIR KARAJOVIĆ"  
IN BELGRADE**

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

**ABSTRACT**

As a part of radioactivity monitoring of Belgrade environment, at the Serbian Institute of Occupational Health "Dr Dragomir Karajović", the content of artificial radionuclides in the ground layer air, in the yard of the Institute building, is being monitored. Activity concentrations of artificial <sup>137</sup>Cs are monitored, as well as radionuclide of cosmogenic origin, <sup>7</sup>Be. An ASS-500 pump, manufactured in Poland, with an average air flow of 600 m<sup>3</sup>/h is used for air sampling. Measurements of weekly samples are performed on a gamma spectrometry system with semiconductor detectors (HPGe) with efficiencies of 25% and 40%. Measuring time was 250 000 s. At the end of 2020 (November and December) <sup>131</sup>I was identified, in activity concentrations of 1.0 to 2.2 μBq/m<sup>3</sup> and also in February 2021. in concentrations of 0.9 to 2.4 μBq/m<sup>3</sup>. The measured activity concentrations are very low and were not registered at other measuring points in Belgrade, nor globally, which indicates the type of local release of <sup>131</sup>I into the air.



## RADIONUKLIDI U ZEMLJIŠTU U OBLASTI GRADA NIŠA

**Branko RADOJKOVIĆ<sup>1</sup>, Dejan MLADENOVIĆ<sup>1</sup>, Goran MANIĆ<sup>1</sup>,  
Dušica VUČIĆ<sup>1</sup>, Marin JOVANOVIĆ<sup>1</sup> i Vesna MANIĆ<sup>2</sup>**

- 1) Odeljenje za zaštitu od zračenja, Zavod za zdravstvenu zaštitu radnika "Niš", Niš, Srbija, [branislav6874@gmail.com](mailto:branislav6874@gmail.com), [zracenje@medradanis.rs](mailto:zracenje@medradanis.rs)
- 2) Departman za fiziku, Prirodno-matematički fakultet, Niš, Srbija, [mvesna@pmf.ni.ac.rs](mailto:mvesna@pmf.ni.ac.rs)

### SADRŽAJ

U radu je prezentovana koncentracija aktivnosti radionuklida u zemljištu uzorkovanom u oblasti grada Niša. Uzorkovanje je izvršeno u 5 opština Niša. Uzorci su takođe kategorisani prema specifičnim lokacijama sa kojih su uzeti. U svakom od ispitivanih 638 uzoraka, prikupljenih i merenih u toku perioda od 6 godina, detektovani su prirodni radionuklidi:  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  i  $^{40}\text{K}$ . U mnogim uzorcima izmeren je i  $^{137}\text{Cs}$ , dok ostali veštački radionuklidi nisu detektovani. Merenja su izvršena korišćenjem standardnog sistema za gama – spektrometriju sa HPGe detektorom. Rezultati pokazuju da su srednje vrednosti aktivnosti  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  i  $^{137}\text{Cs}$ : 21 Bq/kg, 26 Bq/kg, 414 Bq/kg i 4.7 Bq/kg, respektivno. Izmerena je velika vrednost koncentracije  $^{226}\text{Ra}$  u sedimentu iz opštine Niška Banja, 573 Bq/kg. U radu su takođe određene i doze koje potiču od gama zračenja radionuklida iz zemljišta. Izračunata srednja jačina apsorbovane doze u vazduhu iznosi 39 nGy/h, a odgovarajuća godišnja efektivna doza ima vrednost 0.048 mSv.

### 1. Uvod

Gama zračenje koje potiče od prirodnih radionuklida, prisutnih u svim vrstama zemljišta, predstavlja jedan od glavnih izvora spoljašnjeg ozračivanja. Prirodna radioaktivnost je široko zastupljena u zemljinoj kori i prvenstveno zavisi od geoloških i geografskih uslova. Postoji velika prostorna varijabilnost prirodne radioaktivnosti u zemljištu u različitim delovima sveta [1].

Nivo terestrijalnog zračenja određen je sadržajem primordijalnih radionuklida,  $^{238}\text{U}$  i  $^{232}\text{Th}$  nizova i  $^{40}\text{K}$ , u stenama iz kojih potiče zemljište. Usled vremenskih uslova, sedimentacije ili hemijske interakcije u zemljinoj kori, oni su prisutni u različitim količinama u zemljištu. Uopšteno, najveće koncentracije prirodnih radionuklida nalaze se u akcesornim mineralima koji mogu biti prisutni u magmatskim granitima. Količine radionuklida u ostalim stenama zavise od tipa protolita i izloženosti vremenskim uslovima, i uglavnom su određene sadržajem litofilnih minerala [2]. Najmanju radioaktivnost ispoljavaju stene formirane hemijskom sedimentacijom u kojima se prisustvo radionuklida pojavljuje zbog nekarbonatnih konstituenata. Klastični sedimenti, pesak i šljunak, u kojima dominira kvarc, ne sadrže veće količine radioaktivnih elemenata – one su uslovljene transportom različitih stenskih materijala. U sedimentarnim glinovitim depozitima velika moć adsorpcije slojeva minerala gline može značajno doprineti koncentracijama uranijuma i torijuma [3].

Sadržaj radionuklida u zemljištu može biti povećan usled određenih ljudskih aktivnosti. U prošlosti su se događale dve glavne kontaminacije: testiranje nuklearnog oružja i akcidenti na nuklearnim postrojenjima. .

Niš (43° 19' 15'' N, 21° 53' 45'' E, 201 m) je najveći grad u jugoistočnoj Srbiji sa oko 260.000 stanovnika i sastoji se iz 5 opština. U jednoj od opština Niša, Niškoj Banji, izmerene su visoke koncentracije radona [4-6], što može ukazivati na velike količine

$^{226}\text{Ra}$  u zemljištu. Pedološke karakteristike Niša su takve da aluvijalno zemljište i crnica preovlađuju sa 24,8 %. Smonica zauzima 21,6 % površine, gajnjača pokriva oblast od 14,6 %, a crvenica i podzol zauzimaju 23,8 % površine. Skeletna i skeletoidna zemljišta, tlo koje je prekriveno peskom, šljunkom, kamenjem i stenama, zauzimaju oblast od 23,8 %.

U cilju dobijanja referentnih podataka o radioaktivnosti životne sredine i odgovarajućeg izlaganja, obavljena su mnoga istraživanja u različitim zemljama. Takođe, izvršena su i neka merenja radioaktivnosti zemljišta u Srbiji [7-11]. Pošto nema dovoljno sistematizovanih podataka o radioaktivnosti životne sredine u jugoistočnoj Srbiji, glavni cilj ovog rada je merenje koncentracije aktivnosti radionuklida u uzorcima zemljišta u oblasti grada Niša, kao i određivanje odgovarajuće jačine apsorbovane doze u vazduhu, koja potiče od detektovanih prirodnih radionuklida, i godišnje efektivne doze.

### 2. Metod

U toku perioda od 6 godina prikupljeno je i izmereno 638 uzoraka zemljišta. Uzorkovanje je izvršeno ravnomerno u 5 opština (navedenih u Tabeli 1). Takođe, uzorci su kategorisani prema specifičnim lokacijama (navedenih u Tabeli 2) sa kojih su uzeti. Mapa uzorkovanja data je na: [www.radioactivityofsoilnish.wordpress.com](http://www.radioactivityofsoilnish.wordpress.com). Dodatno, u Niškoj Banji, pored zemljišta, uzeta su i 3 uzorka sedimenta, bigra nastalog oko izvora. Svi uzorci uzeti su sa dubine od oko 10- 20 cm, osim sedimenta koji je uzorkovan sa dubine od oko 50 cm. Period odležavanja uzoraka u zatvorenim Marinelli posudama zapremine 1 l je najmanje 28 dana, da bi se postigla sekularna ravnoteža između  $^{226}\text{Ra}$  i njegovih potomaka.

Merenja koncentracije aktivnosti radionuklida u uzorcima zemljišta obavljena su korišćenjem standardnog sistema za gama spektrometriju sa Canberra HPGe detektorom i softverom Genie 2000. Sistem je kalibrisan u opsegu energija od 40 – 2000 keV sa relativnom efikasnošću od 26%, a FWHM na liniji 1332 keV ( $^{60}\text{Co}$ ) iznosi 1,85 keV. Uzorci su mereni u trajanju od 3600 – 7200 s. Koncentracije aktivnosti merene su sa pridruženom kombinovanom standardnom neodređenošću od oko 10 % za faktor  $k = 1$  standardne Gausove raspodele, koji odgovara nivou poverenja od 68 %.

Izmerene aktivnosti  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  i  $^{40}\text{K}$  u uzorcima zemljišta korišćene su za izračunavanje jačine apsorbovane doze u vazduhu na 1 m iznad zemlje. Upotrebljena je jednačina:

$$D = q_{\text{Ra}}A_{\text{Ra}} + q_{\text{Th}}A_{\text{Th}} + q_{\text{K}}A_{\text{K}} \quad (1)$$

gde je  $\dot{D}$  jačina doze u nGy/h,  $A_{\text{Ra}}$ ,  $A_{\text{Th}}$  i  $A_{\text{K}}$  su koncentracije aktivnosti  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  i  $^{40}\text{K}$  u Bq/kg, respektivno. Konverzioni koeficijenti  $q_{\text{Ra}}$ ,  $q_{\text{Th}}$  i  $q_{\text{K}}$  su specifične jačine apsorbovane doze ovih radionuklida u (nGy/h)/(Bq/kg). Vrednosti ovih konverzionih koeficijenata za zemljište u obliku ploče su: 0,462, 0,604 i 0,042, respektivno [12]. Godišnja efektivna doza usled zračenja zemlje uobičajeno se određuje pomoću formule:

$$E(\text{mSv}) = D(\text{nGy/h}) \cdot f \cdot 8760(\text{h}) \cdot E/D(\text{Sv/Gy}) \cdot 10^{-6} \quad (2)$$

gde je faktor zauzetosti  $f=0,2$ , a konverzioni koeficijent  $E/D=0,7 \text{ Sv/Gy}$  [1].

### 3. Rezultati i diskusija

U svim uzorcima detektovani su prirodni radionuklidi:  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  i  $^{40}\text{K}$ , a u većini od njih nađen je i  $^{137}\text{Cs}$ . Rezultati merenja za sve uzorke dati su na:

[www.radioactivityofsoilnish.wordpress.com](http://www.radioactivityofsoilnish.wordpress.com). U Tabeli 1 prikazane su minimalne, maksimalne i srednje vrednosti koncentracije aktivnosti za sve detektovane radionuklide za sve uzorke zemljišta, u svakoj od 5 opština Niša: Medijani, Panteleju, Paliluli, Crvenom Krstu i Niškoj Banji. Tabela 2 prikazuje raspodelu minimalnih, maksimalnih i srednjih vrednosti koncentracije aktivnosti  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  i  $^{40}\text{K}$ , kao i  $^{137}\text{Cs}$  u različitim karakterističnim lokacijama uzoraka zemljišta.

**Tabela 1. Koncentracije aktivnosti radionuklida u uzorcima zemljišta u 5 opština grada Niša (Bq/kg), kao i odgovarajuće jačine apsorbovane doze u vazduhu (nGy/h) i godišnje efektivne doze (mSv).**

Opština (Broj uzoraka)	Koncentracija aktivnosti (Bq/kg) (Opseg)				Jačina doze (Opseg)	
	Srednja vrednost ± standardna devijacija				Srednja vrednost ± st. devijacija	
	$^{226}\text{Ra}$	$^{232}\text{Th}$	$^{40}\text{K}$	$^{137}\text{Cs}$	<i>D</i> (nGy/h)	<i>E</i> (mSv)
Medijana (177)	(6,0 – 49) 19 ± 5,7	(7,6 – 72) 26 ± 9,1	(190 – 713) 414 ± 94	(<2 – 27) 4,3 ± 3,7	(16 – 89) 41 ± 11	(0,020 – 0,110) 0,051 ± 0,014
Pantelejš (117)	(11 – 70) 20 ± 6,8	(5,6 – 46) 27 ± 6,6	(137 – 715) 409 ± 82	(< 2 – 30) 5,0 ± 4,6	(14 – 70) 42 ± 8,5	(0,017 – 0,085) 0,052 ± 0,011
Palilula (143)	(9,8 – 103) 21 ± 9,0	(11 – 44) 26 ± 6,7	(241 – 652) 431 ± 84	(< 2 – 21) 3,8 ± 3,5	(25 – 78) 44 ± 9,0	(0,030 – 0,097) 0,054 ± 0,011
Crveni Krst (142)	(7,0 – 77) 19 ± 6,9	(4,4 – 41) 26 ± 7,2	(162 – 700) 411 ± 99	(< 2 – 76) 5,9 ± 10	(15 – 66) 41 ± 9,6	(0,020 – 0,082) 0,051 ± 0,012
Niška Banja (59)	(8,0 – 139) 34 ± 28	(9,7 – 49) 24 ± 8,7	(179 – 656) 389 ± 108	(< 2 – 46) 4,6 ± 3,3	(17 – 120) 47 ± 20	(0,022 – 0,146) 0,058 ± 0,024

Iz Tabela 1 i 2 može se videti da se minimalne i maksimalne vrednosti koncentracije aktivnosti radionuklida manje ili više razlikuju u zavisnosti od ispitivane tipične lokacije zemljišta. Varijacije minimalnih i maksimalnih vrednosti takođe su prisutne u zavisnosti od opštine, ali srednje vrednosti koncentracija se ne razlikuju značajno. Minimalna vrednost koncentracije aktivnosti  $^{226}\text{Ra}$ , 6 Bq/kg, izmerena je u zemljištu u blizini izvorišta Naisus koji pripada opštini Medijana. Maksimalna vrednost, 139 Bq/kg, izmerena je u poljoprivrednom zemljištu u opštini Niška Banja. Srednje vrednosti koncentracije na različitim lokacijama variraju od 15 Bq/kg do 34 Bq/kg. Srednja vrednost koncentracije aktivnosti  $^{226}\text{Ra}$  za ceo grad je 21 Bq/kg. Minimalna vrednost koncentracije aktivnosti  $^{232}\text{Th}$  je 4,4 Bq/kg i izmerena je u zemljištu iz industrijske zone koja pripada opštini Crveni Krst. Maksimalna vrednost, nađena u Medijani, je 72 Bq/kg i detektovana je u uzorku uzetom iz dvorišta obdaništa. Srednja vrednost koncentracije dobijena je iz vrednosti za sve lokacije zemljišta koje pripadaju uskom opsegu od 22 Bq/kg – 28 Bq/kg i iznosi 26 Bq/kg.

Minimalna vrednost koncentracije aktivnosti  $^{40}\text{K}$ , 137 Bq/kg, nađena je u zemljištu u blizini saobraćajnice u Panteleju, a maksimalna vrednost, 715 Bq/kg, detektovana je u nepoljoprivrednom zemljištu, uzorkovanom takođe u opštini Pantelejš. Srednje vrednosti koncentracije  $^{40}\text{K}$  na različitim lokacijama su u opsegu 377 – 449 Bq/kg, dok je srednja vrednost za grad 414 Bq/kg. U svim lokacijskim grupama zemljišta, minimalna koncentracija aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  je ispod MDA od oko 2 Bq/kg. Maksimalna vrednost koncentracije aktivnosti, 76 Bq/kg, izmerena je u nepoljoprivrednom zemljištu koje

prripada opštini Crveni Krst. Srednje vrednosti koncentracije ovog radionuklida variraju od 2,2 do 6,9 Bq/kg, sa ukupnom srednjom vrednošću od 4,7 Bq/kg. Tako niske vrednosti ne predstavljaju rizik po zdravlje populacije Niša i verovatno su posledica Černobilskog akcidenta

**Tabela 2. Koncentracije aktivnosti radionuklida u zemljištu sa različitim karakterističnih lokacija u Nišu (Bq/kg), kao i odgovarajuće jačine apsorbovane doze u vazduhu (nGy/h) i godišnje efektivne doze (mSv).**

Uzorci zemljišta (Broj uzoraka)	Koncentracija aktivnosti (Bq/kg) (Opseg)				Jačina doze (Opseg)	
	Srednja vrednost ± st. dev.				Srednja vrednost ± st. dev.	
	<sup>226</sup> Ra	<sup>232</sup> Th	<sup>40</sup> K	<sup>137</sup> Cs	D (nGy/h)	E (mSv)
Zemljište u blizini saobraćajnica i industrijskih objekata (101)	(8,3–94) 22±13	(5,6–38) 24±7,1	(137–544) 397±80	(<2–12) 2,7±2,6	(13–76) 38±9,6	(0,016–0,093) 0,047±0,012
Zemljište iz industrijskih radnih područja (80)	(11–77) 21±8,1	(4,4–42) 25±7,0	(178–530) 387±78	(<2–13) 2,2±2,1	(14–56) 37±7,8	(0,018–0,068) 0,050±0,010
Zemljište iz dvorišta škola i obdaništa (105)	(11–95) 23±11	(9,9–72) 28±8,6	(196–714) 416±91	(<2–56) 5,7±6,9	(21–82) 41±11	(0,025–0,101) 0,050±0,013
Zemljište iz nereguliranih deponija (56)	(6,2–103) 20±12	(9,8–39) 23±7,1	(182–700) 393±96	(<2–22) 3,2±3,9	(16–72) 37±10	(0,020–0,089) 0,044±0,012
Poljoprivredno zemljište (162)	(8,0–139) 22±14	(12–59) 28±7,1	(231–693) 449±89	(<2–46) 6,9±5,2	(19–110) 42±11	(0,023–0,134) 0,052±0,013
Nepoljoprivredno zemljište (100)	(7,0–109) 22±14	(9,3–46) 26±7,6	(162–715) 416±100	(<2–76) 5,7±10	(15–74) 40±10	(0,018–0,090) 0,049±0,012
Zemljište u blizini izvora vode "Naisus" (34)	(6,0–20) 15±3,4	(7,6–38) 22±7,3	(191–531) 377±93	(<2–7,6) 2,8±2,4	(15–49) 33±8,8	(0,018–0,060) 0,041±0,011

Uopšteno, u svetu postoje varijacije u sadržaju <sup>226</sup>Ra (<sup>238</sup>U), <sup>232</sup>Th i <sup>40</sup>K u zemljištu, koji su na nekim lokalitetima značajno različiti u odnosu na prikazane rezultate za teritoriju Niša. Prema podacima UNSCEAR –a (2008) [12] za svet, srednje koncentracije aktivnosti <sup>226</sup>Ra i <sup>232</sup>Th u zemljištu, 32 i 45 Bq/kg, respektivno, su za 52 i 74 % veće od rezultata ovog rada, dok je aktivnost <sup>40</sup>K, 412 Bq/kg, skoro identična srednjoj vrednosti ovog rada.

U opštini Niška Banja izmerena je maksimalna aktivnost <sup>226</sup>Ra, 139 Bq/kg, kao i najveći srednji sadržaj <sup>226</sup>Ra, 30 Bq/kg. Takođe, na teritoriji Niške Banje izmerene su veoma visoke koncentracije <sup>222</sup>Rn [5, 6], koje mogu ukazivati na visoke koncentracije <sup>226</sup>Ra u zemljištu. Zato su, u cilju daljeg istraživanja radioaktivnosti u Niškoj Banji, obavljena merenja uzoraka sedimenta. Rezultati su prikazani u Tabeli 3. Uzorci sedimenta ispoljavaju velike sadržaje <sup>226</sup>Ra u odnosu na koncentracije u svetu. Naime, prema podacima UNSCEAR-a (2000) [1] za 41 državu, u samo jednoj od njih maksimalna aktivnost <sup>226</sup>Ra u zemljištu (900 Bq/kg, Švajcarska) veća je od maksimalne vrednosti (573 Bq/kg) za sediment u Niškoj Banji.

**Tabela 3. Koncentracija aktivnosti  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  i  $^{137}\text{Cs}$  u uzorcima sedimenata u Niškoj Banji (Bq/kg)**

Uzorci	Koncentracija aktivnosti (Bq/kg)			
	$^{226}\text{Ra}$	$^{232}\text{Th}$	$^{40}\text{K}$	$^{137}\text{Cs}$
Sediment 1	573	< 2	106	< 2
Sediment 2	340	< 2	25	< 2
Sediment 3	353	< 2	61	< 2

Jačine apsorbovane doze u vazduhu i godišnja efektivna doza izračunate iz rezultata za aktivnosti  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  i  $^{40}\text{K}$  izmerenih u ovom radu, prikazane su u Tabelama 1 i 2. Minimalna jačina doze, 14 nGy/h (0,017 mSv), određena je za zemljište u lokacijskoj grupi: zemljište u blizini saobraćajnica i industrijskih objekata u opštini Panteleji. Maksimalna doza, 120 nGy/h (0,146 mSv), nađena je za poljoprivredno zemljište u opštini Niška Banja. Srednja vrednost jačine apsorbovane doze je 42 nGy/h, a odgovarajuća efektivna doza je 0,052 mSv. Jačine doza, izračunate u ovom radu, generalno su niže od srednjih vrednosti određenih za druge države. Naime, prema raspodeli populacije za 38 zemalja, srednja jačina doze je 59 nGy/h, dok su srednje vrednosti za pojedinačne države u opsegu od 18 nGy/h do 93 nGy/h [1, 12]. Srednja vrednost apsorbovane doze usled zračenja sedimenta u Niškoj Banji je 200 nGy/h. Ova vrednost pripada opsegu većih doza, kojima je izloženo < 30 % svetske populacije.

#### 4. Zaključak

Rezultati merenja radioaktivnosti u svim uzorcima iz oblasti grada Niša pokazuju prisustvo prirodnih radionuklida oko srednjih vrednosti u svetu i dugoživećih radionuklida veštačkog porekla u značajno niskim koncentracijama. Ova zemljišta nisu kontaminirana radioaktivnim materijalima koji su gama - emiteri i, sa tog aspekta, ne predstavljaju rizik po zdravlje ljudi, tako da nije potrebno preduzimati zaštitne mere. Međutim, usled rizika od akcidenata, kao što je akcident u Fukušimi, rizika od moguće kontaminacije kao rezultat ilegalnih aktivnosti, kao i kontaminacije usled zagađenja iz rezidualnih izvora zračenja iz fabričkih pogona koji više nisu u upotrebi, neophodno je nastaviti monitoring prisustva radionuklida u zemljištu, koji uvek služi kao polazna osnova za upoređivanje aktivnosti radionuklida u slučaju akcidenta.

#### 5. Literatura

- [1] UNSCEAR, Sources and Effects of ionizing radiation. *Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation to the General Assembly*. New York, 2000.
- [2] Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry, IAEA – TECDOC – 1363, IAEA, Vienna, 2003.
- [3] P. Egidi, C. Hull. Naturally occurring and technologically enhanced naturally occurring radioactive materials. In: *Producers, users and proposed regulations*, PEP Course 1.A Notes, 32nd Midyear Topical Meeting, Albuquerque, Health Physics Society, 1999.
- [4] Z. S. Žunić et al. High natural radiation exposure in radon spa areas: a detailed field investigation in Niška Banja (Balkan region). *J. Environ. Radioact.* 89, 2006, 249 – 260.

- [5] G. Manić, S. Petrović, V. Manić, D. Popović, D. Todorović. Radon concentrations in a spa in Serbia. *Environ. Int.* 32, 2006, 533-537.
- [6] J. Nikolov et al. Exposure to radon in the radon spa Niška Banja, Serbia. *Radiat. Meas.* 47, 2012, 443-450.
- [7] I. Bikit et al. Radioactivity of the soil in Vojvodina (northern province of Serbia and Montenegro). *J. Environ. Radioact.* 78, 2005, 11-19.
- [8] G. Dugalić et al. Heavy metals, organics and radioactivity in soil of western Serbia. *J. Hazard. Mater.* 177, 2010, 697-702.
- [9] Serbian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency. The report about the level of population exposure to environmental ionizing radiations in the Republic of Serbia during 2010. year. <http://srbatom.gov.rs>, 2011.
- [10] M. Papić et al. Multi-criteria analysis of soil radioactivity in Čačak basin, Serbia. *Rom. J. Phys.* 59, 2014, 846-861.
- [11] B. Milenković, J. M. Stajić, Lj. Gulan, T. Zeremski, D. Nikezić. Radioactivity levels and heavy metals in the urban soil of central Serbia. *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* 22, 2015, 16732-16741.
- [12] G. Manić, V. Manić, D. Nikezić, D. Krstić. The dose of gamma radiation of building materials and soil. *Nukleonika.* 60, 2015, 951-958.
- [13] UNSCEAR. Sources, effects and risks of ionizing radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation Report. New York, 2008.

RADIONUCLIDES IN SOIL IN THE REGION OF THE TOWN OF NIŠ

**Branko RADOJKOVIĆ<sup>1</sup>, Dejan MLADENOVIĆ<sup>1</sup>, Goran MANIĆ<sup>1</sup>,  
Dušica VUČIĆ<sup>1</sup>, Marin JOVANOVIĆ<sup>1</sup> and Vesna MANIĆ<sup>2</sup>**

- 1) *Institute of Occupational Health, Department for Radiological Protection, Niš, Serbia, [branislav6874@gmail.com](mailto:branislav6874@gmail.com), [zracenje@medradanis.rs](mailto:zracenje@medradanis.rs)*
- 2) *Department of Physics, University of Niš, Niš, Serbia, [mvesna@pmf.ni.ac.rs](mailto:mvesna@pmf.ni.ac.rs)*

ABSTRACT

The activity concentration of radionuclides in samples of soil, collected in the region of the town of Niš, was presented in the paper. The sampling was performed in 5 municipalities of Niš. Samples were also categorized according to the specific locations from which they were taken. Naturally occurring radionuclides, <sup>226</sup>Ra, <sup>232</sup>Th and <sup>40</sup>K, were found in all 638 samples, collected and measured over a period of 6 years. In many of them <sup>137</sup>Cs was also measured, while the other artificial radionuclides were not detected. The measurements were carried out using the standard gamma spectrometry system with HPGe detector. The results show that the average activity concentrations of <sup>226</sup>Ra, <sup>232</sup>Th, <sup>40</sup>K and <sup>137</sup>Cs are: 21, 26, 414 and 4,7, in Bq/kg, respectively. The sediment in the municipality spa Niška Banja exhibits a high content of <sup>226</sup>Ra, 573 Bq/kg. The outdoor dose rates, due to the gamma radiation of the ground were also determined for all soils. The average absorbed dose rate in air was estimated to be 42 nGy/h, while the corresponding annual effective dose is 0,052 mSv.

## **РАДОН**



## VISOKE KONCENTRACIJE RADONA U PORODIČNOJ KUĆI U OKOLINI KOSOVSKJE MITROVICE

Duřica SPASIĆ i Ljiljana GULAN

*Univerzitet u Priřtini sa privremenim sedištem u Kosovskoj Mitrovici,  
Prirodno–matematički fakultet, Kosovska Mitrovica, Republika Srbija,  
[ducica.spasic@pr.ac.rs](mailto:ducica.spasic@pr.ac.rs), [ljiljana.gulan@pr.ac.rs](mailto:ljiljana.gulan@pr.ac.rs)*

### SADRŽAJ

*U ovom radu su prikazani rezultati merenja koncentracije radona u jednoj porodičnoj kući u blizini Kosovske Mitrovice u periodu od 24.03.2020 – 31.05.2020. Interval merenja je obuhvatio period proglašenja vanredne situacije izazvane pandemijom COVID-19. Merenje koncentracije radona izvršeno je sa dva aktivna detektora radona (Airthings Corentium Home) postavljena u dnevnoj i spavaćoj sobi kuće starosti preko 30 godina. Vrednosti koncentracija radona očitavane dnevno su se kretale u opsegu 368-1290 Bq/m<sup>3</sup> u dnevnoj sobi i 796-2330 Bq/m<sup>3</sup> u spavaćoj sobi; srednje vrednosti za dati period su: 710 Bq/m<sup>3</sup> i 1377 Bq/m<sup>3</sup>, respektivno. Direktivom Saveta Evropske unije (Directive 2013/59/EURATOM) državama članicama naloženo je da utvde nacionalne referentne nivoe za koncentraciju radona u radnim i boravišnim prostorijama ne veće od 300 Bq/m<sup>3</sup>. Izmerene vrednosti mogu ukazati na geogeni potencijal radona, ali i na uticaj tehnološke aktivnosti iz obližnjeg rudarskog kompleksa "Trepča", koje su mogle izmeniti koncentracije prirodnih radioaktivnih materijala u životnom okruženju.*

### 1. Uvod

Najzastupljeniji izotop radioaktivnog gasa radona jeste radon <sup>222</sup>Rn, sa periodom poluraspada od 3.824 dana, prisutan u nizu uranijuma <sup>238</sup>U. Produkti njegovog raspada su čvrste čestice metalnog karaktera, odgovorne za veliko radiološko opterećenje i predstavljaju zdravstveni hazard pored radona. Produkti iz raspada radona pokazuju visoka adsorpciona svojstva i vezuju se za fine disperzivne čestice u vazduhu gradeći radioaktivne aerosole. Zbog visoke energije koju  $\alpha$  čestice nose imaju jako radiotoksično i kancerogeno dejstvo. Na osnovu nedavno sprovedenih objedinjenih epidemioloških studija u Evropi [1], Americi [2] i Aziji [3], koje su ukazale na postojanje veze između koncentracije radona u zatvorenim prostorijama i kancera pluća, Svetska Zdravstvena Organizacija je procenila da između 3 % i 14 % svih kancera pluća potiče od radona i njegovih potomaka [4].

Zahvaljujući svojoj hemijskoj inertnosti i relativno dugom vremenu poluraspada, radon lako napušta mesto formiranja i difunduje kroz debele slojeve zemljišta usled gradijenta u koncentraciji i pritisku i može nastati njegovo nagomilavanje u zatvorenom prostoru. Na koncentraciju radona u boravišnim i radnim prostorijama utiče mnogo faktora koji se mogu podeliti na: privremene, koji zavise od antropogenog uticaja ili trenutnih uslova (kao što su životne navike, način gradnje, građevinski materijal, meteorološki uslovi) i trajne, koje zavise od geofizičkih parametara (kao što su raspored stena u tlu, sadržaj uranijuma i radijuma u zemljištu i stenama, permeabilnost zemljišta za radon, granulacija i hemijske karakteristike zemljišta) [5]. Direktivom Saveta Evropske unije (Directive 2013/59/EURATOM) državama članicama naloženo je da utvde nacionalne referentne nivoe za koncentraciju radona u radnim i boravišnim prostorijama ne veće od 300 Bq/m<sup>3</sup> [6]. Poslednjih nekoliko decenija, intenzivirana su merenja koncentracije radona, lociranje pojedinih objekata, kao i mapiranje čitavih područja i država. U našoj

zemlji je u periodu od 2015-2016. godine sproveden „Nacionalna kampanja za merenje koncentracija radona u zatvorenim prostorijama”. Autori istraživanja navode nedovoljan broj detektora u odnosu na broj zainteresovanih ljudi da se u njihovim objektima ispita prisustvo radona [7].

U ovom radu predstavljeni su rezultati merenja koncentracije radona u jednoj porodičnoj kući u blizini Kosovske Mitrovice i to baš u period proglašenja vanredne situacije u našoj zemlji izazavane pandemijom COVID-19, 24.03.2020–31.05.2020. Kako čovek, u proseku provede oko 80 % vremena u zatvorenim prostorijama, važno je u ovakvoj situaciji ispitati vrednosti koncentracije radona, jer su ljudi mnogo više boravili u zatvorenom.

### **2. Mesto istraživanja i metod merenja**

Porodična kuća u kojoj je izvršeno merenje, nalazi se u ruralnom području, u blizini Kosovske Mitrovice, opština Zvečan (42.9343° N and 20.8389° E), 3 km od rudnika “Trepča”, oko 7 km vazdušnom linijom od rudnika “Stari Trg”.

Naselje Zvečan sa okolnim selima smešteno je u severnom delu Kosovske kotline u dolini reke Ibar, na dodiru ogranaka Kopaonika, Mokre Gore i Rogozne. Topografski položaj naselja određen je aluvijalnom ravni reke Ibar i padinama okolnih brda koja predstavljaju delove prostorne celine brdsko planinskog kraha. Ibarska kotlina je sa jugoistoka zatvorena dominantnom vulkanskom kupom Zvečan (799 m), Mali Zvečan (750 m), Sokolica (918 m), i planinom Majdan (1286 m) [8].

Kosovskomitrovički region pripada zoni tercijarnog magmatizma. Geološke strukture formirane su u od ordovicijuma do kvartara. Vulkanogeno-sedimentne formacije srednjeg trijasa karakterišu klastiti sa vulkanitima, dolomiti, mermeri, karbonati, filiti i zeleni škriljci. Laporoviti krečnjaci, peščari i konglomerati nastali su u period krede. Vulkanska aktivnost je proizvela velike mase izlivnih stena dacito-andezita, kvarclatita i piroklastita i intruziju granitnih stena. Pravcem sever-severozapad i jug-jugoistok duž toka reke Sitnice proteže se rased i tektonska zona senonskih depozita [9].

Porodična kuća izgrađena je 70-tih godina prošlog veka. To je tipična seoska kuća sa podrumom, koji se koristi za stanovanje, i gornjim spratom. Prizemlje je izgrađeno od klesanog kamena debljine oko 50 cm, prednjim delom ukopano u zemlju dubine 1 m, (kamen je dopreman sa obližnjeg brda ispod Sokolice). Kuća je podignuta na mestu gde je nekada bilo plodno, obradivo zemljište.

Za postavljanje detektora izabrane su dve prostorije, dnevna soba i spavaća soba, koje se nalaze u prednjem delu kuće. Očitavanja su vršena svakog dana u istom vremenskom terminu, od 14-15 h. Kuća nema betonsku ploču, dok je plafon od betona. Zidovi u obe prostorije su malterisani, prekriveni bojom, prozori su sa duplim, drvenim oknom, na međurastojanju od 30 cm, visine 50 cm. U dnevnoj sobi na podu je laminat, a u spavaćoj sobi su lesonit ploče, razmaknute na spojevima oko 0,5 cm.

Merenje koncentracije radona vršeno je uz pomoć aktivnog detektora Airthing Corentium Home, koji može dati precizne podatke o prosečnoj koncentraciji radona u zatvorenim prostorijama, u vremenskim intervalima od jednog dana do sedam dana, pa i više meseci. Airthing Corentium Home daje prosečne vrednosti u toku vremena. Prvo očitavanje moguće je nakon 24 h, detektor pokazuje usrednjenu dnevnu vrednost (iz sata u sat), a nedeljna vrednost (usrednjena za svakih 24 h) se dobija za predhodnih sedam dana. Rad detektora Airthing Corentium Home zasnovan je na procesu difuzije radona u komoru. To je digitalna verzija detektora bazirana na alfa spektrometrijskom metodu. Tačnost merenja je u okviru  $\pm 5\%$  od rezultata referentnih monitora, merni

opseg od 0-9999 Bq/m<sup>3</sup>, a merna nesigurnost je <10 % za periode merenja veće od 1 meseca [10].

### 3. Rezultati i diskusija

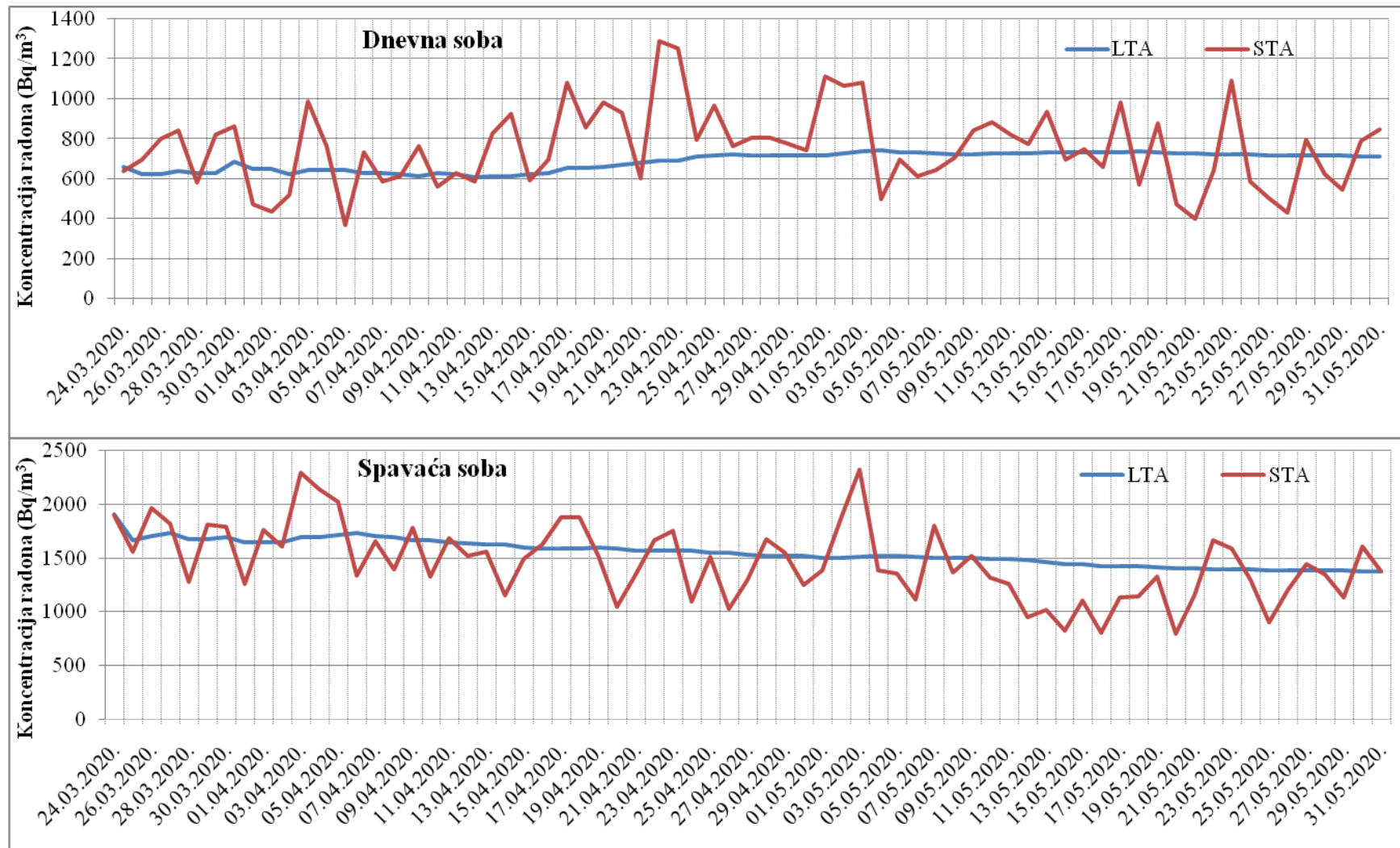
Visoke koncentracije radona u ovoj porodičnoj kući izmerene su CR-39 detektorima 9 godina ranije; koncentracije radona su bile za dnevnu i spavaću sobu, respektivno, 545 Bq/m<sup>3</sup> i 1216 Bq/m<sup>3</sup> (period zima-proleće), 446 i 1034 Bq/m<sup>3</sup> (period leto-jesen) [11]. Merenja su ponovljena, prvi put ovom metodom, a vrednosti koncentracije radona nisu pokazale znatnija odstupanja.

Koncentracije radona u prostorijama po danima predstavljene su na Slici 1. Očigledno je da su vrednosti u svakom očitavanju prelazile preporučeni referentni nivo koncentracije radona za boravišni prostor. Vrednosti koncentracija radona očitavane dnevno su se kretale u opsegu 368-1290 Bq/m<sup>3</sup> u dnevnoj sobi i 796-2330 Bq/m<sup>3</sup> u spavaćoj sobi; srednje vrednosti za dati period su: 710 Bq/m<sup>3</sup> i 1377 Bq/m<sup>3</sup>, respektivno. Na dnevnom nivou STA (short term average), primećuju se znatne varijacije vrednosti koncentracije radona, kako u dnevnoj tako i u spavaćoj sobi. Dugoročne LTA (long term average) vrednosti tokom perioda merenja daju približno ujednačene koncentracije radona za dnevnu sobu, a imaju tendenciju blagog pada za spavaću sobu.

Razlog u razlikama vrednosti koncentracije radona među dvema prostorijama iste kuće, najverovatnije je podna obloga. Dnevna soba poseduje laminat, bez ikakvih pukotina i razmaka među spojevima, dok su u spavaćoj sobi stare lesanit ploče, koje imaju značajan razmak na spojevima. Pod u sobi nije obnavljan od perioda izgradnje kuće. Ovako visoke koncentracije ukazuju da je dominantan izvor radona tlo ispod objekta, s obzirom na to da je zemljište na kome je objekat izgrađen bilo obradivo i da kuća nema betonsku ploču.

Neki autori su došli do zaključaka, da tip zemljišta koji sadrži najveći procenat gline i humusa u najvećoj meri adsorbuje i zadržava radon u zemljištu i doprinosi povišenim koncentracijama radona u zatvorenom, odnosno radonskom potencijalu [5]. Debljina spoja na podu doprinosi ukupnoj koncentraciji radona u zatvorenom i to od 31 % (debljina spoja 1 mm) do 62 % (debljina spoja 2 mm) [12], što može i biti razlog razlike u koncentraciji između prostorija iste kuće, zbog raličite vrste podne obloge.

Srednja godišnja koncentracija radona u stanovima ruralnog područja je 1,7 puta veća od one u stanovima urbanog područja, a u stanovima porodičnih kuća je 2,3 puta veća od one u stanovima kolektivnih stambenih zgrada [13]. Uz to, stariji objekti uglavnom imaju povišenu koncentraciju radona.



Slika1. Varijacije koncentracija radona u dnevnoj (slika-gore) i spavaćoj (slika-dole) sobi prizemne porodične kuće

#### 4. Zaključak

Ponovljena merenja u porodičnoj kući, nesumnjivo pokazuju konstantno prisustvo visokih koncentracija radona, čemu u znatnoj meri doprinose položaj mesta, geološka struktura područja, blizina rudnika „Trepča“, i aktivnog rudnika „Stari Trg“, gde se vrše iskopavanja. S obzirom da je radon detektovan u većim koncentracijama u još nekoliko kuća u istom mestu, to može biti interesantan teren u smislu pronalaženja i identifikovanja područja sklonim radonu. U ovakvim objektima je potrebno sprovesti mere remedijacije. Istraživanja će se i dalje nastaviti uz uključivanje i praćenje ostalih parametara koji se mogu dovesti u vezu sa povišenom koncentracijom radona

#### 5. Zahvalnica

Rad je podržan od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije Ugovorom br. 451-03-9/2021-14/200123.

#### 6. Literatura

- [1] S. Darby et al. Residential radon and lung cancer: detailed results of a collaborative analysis of individual data on 7148 subjects with lung cancer and 14208 subjects without lung cancer from 13 epidemiologic studies in Europe. *Scand. J. Work Environ. Health*. 32 (2006) Suppl1 1-83.
- [2] D. Krewski et al. A combined analysis of North American case-control studies of residential radon and lung cancer. *J. Toxicol. Environ. Health A*, 69 (2006) 533-597.
- [3] J.H. Lubin et al. Risk of lung cancer and residential radon in China: pooled results of two studies. *Int J Cancer*. 109 (2004) 132-137
- [4] World Health Organisation, *WHO Handbook on Indoor Radon*. 2009. WHO, Geneva.
- [5] 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 Društva za zaštitu od zračenja Srbije i Crne Gore*. Urednici Jelena Stanković Petrović i Gordana Pantelić, 27 – 29. Septembar 2017, Srebrno jezero 2017, 210-219.
- [6] Council directive 2013/59/EURATOM of laying down basic safety standards for protection against the dangers arising from exposure to ionising radiation. Office Journal of the European Union, 5 December 2013; L13: 1-73
- [7] M. Eremić Savković, V. Udovičić, D. Maletić, G. Pantelić, P. Ujić, I. Čeliković, S. Forkapić, V. Marković, V. Arsić, J. Ilić, B. Markoski. Results of the first national indoor radon survey performed in Serbia. *J. Radiol. Prot.* 40 (2020) N22.
- [8] Strategija ekonomskog razvoja opštine Zvečan 2014 – 2015
- [9] Lj. Gulan, Dj. Ivanović, B. Vučković. Analiza uticaja različitih građevinskih materijala na nivo radona u kućama starije gradnje. *Zbornik radova XXX simpozijuma Društva za zaštitu od zračenja Srbije i Crne Gore*. Urednici: Mihajlo Jović i Gordana Pantelić, 2-4. oktobar 2019, Divčibare 2019, 258 – 266.
- [10] Geološki Atlas Srbije, Ministarstvo za zaštitu prirodnih bogatstava i životne sredine Republike Srbije, 2002. Bareks, Beograd.
- [11] Lj. Gulan. Radon i toron u vazduhu zatvorenih prostorija na Kosovu i Metohiji: korelacija i mape rizika, Monografija, Akademska misao, Beograd, 2015.

- [12] E. Munoz, B. Frutos, M. Olaya, J. Sanchez. A finite element model development for simulation of the impact of slab thickness, joints, and membranes on indoor radon concentration. *Journal of Environmental Radioactivity* 177 (2017) 280 – 289.
- [13] P. Vukotić, N. Antović, R. Zekić, N. Svrkota, T. Anđelić, R. Svrkota, R. Mrdak, A. Đurović, A. Dlabach, N. Bjelica, T. Đurović, M. Bogičević. Istraživanje radona u stanovima u Crnoj Gori. *Zbornik radova XXIX simpozijuma Društva za zaštitu od zračenja Srbije i Crne Gore*. Urednici Jelena Stanković Petrović i Gordana Pantelić, 27 – 29. Septembar 2017, Srebrno jezero 2017, 161-167.

---

**HIGH INDOOR RADON CONCENTRATIONS IN A FAMILY HOUSE NEAR  
KOSOVSKA MITROVICA****Dušica SPASIĆ and Ljiljana GULAN**

*University of Priština in Kosovska Mitrovica, Faculty of Sciences and Mathematics,  
Lole Ribara 29, Kosovska Mitrovica, Serbia, [dusica.spasic@pr.ac.rs](mailto:dusica.spasic@pr.ac.rs),  
[ljiljana.gulan@pr.ac.rs](mailto:ljiljana.gulan@pr.ac.rs)*

**ABSTRACT**

This paper presents the results of indoor radon measurements in a family house near Kosovska Mitrovica in the period from 24.03.2020 - 31.05.2020. The measurement interval included the period of declaring a state of emergency caused by the COVID-19 pandemic. Radon concentration was measured with two active radon detectors (Airthings Corentium Home) placed in the living room and bedroom of a house over 30 years old. The values of radon concentrations which were read daily ranged from 368-1290 Bq/m<sup>3</sup> in the living room and 796-2330 Bq/m<sup>3</sup> in the bedroom; the mean values for this period were: 710 Bq/m<sup>3</sup> and 1377 Bq/m<sup>3</sup>, respectively. The Directive of the Council of the European Union (Directive 2013/59/EURATOM) requires Member States to set national reference levels for the concentration of radon in workplaces and dwellings not exceeding 300 Bq/m<sup>3</sup>. The measured values can indicate the geogenic potential of radon, but also the influence of technological activity from the nearby mining complex "Trepča", which could change the concentrations of natural radioactive materials in the living environment.

## RADONSKI RAVNOTEŽNI FAKTOR U IZABRANIM REZIDENCIJALNIM I RADNIM OBJEKTIMA U SRBIJI I CRNOJ GORI

Igor ČELIKOVIĆ<sup>1</sup>, Ranko ZEKIĆ<sup>2</sup>, Nikola SVRKOTA<sup>2</sup>, Ivana VUKANAC<sup>1</sup>,  
Miloš ŽIVANOVIĆ<sup>1</sup>, Jelena KRNETA NIKOLIĆ<sup>1</sup>,  
Perko VUKOTIĆ<sup>3</sup> i Gordana PANTELIĆ<sup>1</sup>

1) Institut za nuklearne nauke Vinča, Institut od nacionalnog značaja za Republiku Srbiju, Univerzitet u Beogradu, Srbija, [icelikovic@vin.bg.ac.rs](mailto:icelikovic@vin.bg.ac.rs), [vukanac@vinca.rs](mailto:vukanac@vinca.rs), [milosz@vin.bg.ac.rs](mailto:milosz@vin.bg.ac.rs), [jnikolic@vin.bg.ac.rs](mailto:jnikolic@vin.bg.ac.rs), [pantelic@vin.bg.ac.rs](mailto:pantelic@vin.bg.ac.rs)

2) Centar za eko-toksikološka istraživanja, Podgorica, Crna Gora, [rankoz@t-com.me](mailto:rankoz@t-com.me), [nikola.svrkota@ceti.co.me](mailto:nikola.svrkota@ceti.co.me)

3) Crnogorska akademija nauka i umetnosti, Podgorica, Crna Gora, [pvukotic@canu.ac.me](mailto:pvukotic@canu.ac.me)

### SADRŽAJ

*U radu su prikazani rezultati merenja radonskog ravnotežnog faktora aktivnom metodom na 5 lokacija u Crnoj Gori i Srbiji. Dobijeni rezultati su u rasponu od 0.36 do 0.7, što je u proseku veće od preporučene vrednosti od 0.4. Na istim lokacijama su izvršena interkomparativna merenja koncentracije radona (uređajima Alpha Guard Pro, RAD7 i RTM1688-2), ravnotežne ekvivalentne koncentracije radona (uređajima RNWL i RPM2200) i radonskog ravnotežnog faktora. Slaganje rezultata je testirano Z-testom koji ukazuje da ne postoji statistički značajno odstupanje između rezultata dobijenih različitim mernim uređajima, odnosno ne postoji nekonzistentnost između različitih metodologija merenja kao ni potrebe za harmonizacijom različitih procedura merenja.*

### 1. Uvod

Radon sa svojim potomcima doprinosi sa više od 50 % ukupnoj dozi koju stanovništvo primi od jonizujućeg zračenja [1]. Skorašnje objedinjene epidemiološke studije sprovedene u Evropi, Americi i Aziji su pokazale da je radon drugi uzročnik kancera pluća posle pušenja. Na osnovu ovih istraživanja, Svetska zdravstvena organizacija je procenila da između 3 - 14 % svih kancera pluća potiču od radona, a sam rizik od dobijanja kancera pluća raste 16 % na svakih 100 Bq m<sup>-3</sup> porasta koncentracije radona u zatvorenom prostoru [2].

Budući da je hemijski inertan sa periodom poluraspada koji je znatno veći od brzine disanja, najveći deo radona se izbacuje iz organizma pre nego što se raspadne u respiratornom sistemu. S druge strane, kratkoživeći radonovi potomci su metali koji se po nastanku lepe za površine, najčešće aerosole. Kada se ti aerosoli, odnosno potomci udahnu, oni se lepe za epitelijalno tkivo i zbog kratkog vremena života ozračuju osetljive površine pluća, pre nego što se izbacuju iz organizma. Stoga, radon sam po sebi ne predstavlja rizik po zdravlje, već njegovi kratkoživeći potomci [3].

Modeli za procenu doze ne koriste izmerenu koncentraciju radona kao ulazni parametar, budući da za istu koncentraciju radona u različitim ambijentalnim uslovima koncentracija radonovih potomaka može biti različita. U tu svrhu koristi se ravnotežna ekvivalentna koncentracija radona (EECR) koja predstavlja onu koncentraciju radona u ravnoteži sa njegovim potomcima koji imaju isti PAEC (koncentracija potencijalne alfa energije) kao i neravnotežna smesa na koju se EECR odnosi [3].



Za razliku od merenja radona znatno je manji broj direktnog merenja radonovih potomaka. To je prvenstveno zbog jednostavnosti i niske cene merenja radona u odnosu na njegove potomke. Doza koju prima stanovništvo se najčešće određuje na osnovu izmerene koncentracije radona i pretpostavljene vrednosti za ravnotežni faktor koji se definiše kao količnik ravnotežne ekvivalentne koncentracije radona EECR ( $\text{Bq m}^{-3}$ ) i stvarne koncentracije radona u zatvorenom prostoru  $C_{Rn}$ , ( $\text{Bq m}^{-3}$ ) tj:

$$F = \frac{EECR}{C_{Rn}} \quad (1)$$

Na osnovu preporuke UNSCEAR, za tipičnu vrednost radonskog ravnotežnog faktora se uzima 0.4 [1]. Međutim, pokazano je da ravnotežni faktor može značajno da varira i zavisi od brojnih parametara sobe kao što su: ventilacija, vlažnost, odnos površine i zapremine prostorije, brzina ekshalacije, koncentracija čestica u vazduhu i depozicija potomaka na površine [4]. Brzina ventilacije je jedan od najvažnijih parametara i sa povećanjem ventilacije smanjuje se ravnotežni faktor [5, 6]. Ravnotežni faktor je direktno proporcionalan koncentraciji čestica aerosola. Niži je u „čistijoj“ sredini, dok na primer, raste sa povećanjem koncentracije duvanskog dima u objektu ili spoljašnjeg zagađenja [5, 7, 8].

Svako odstupanje stvarnog ravnotežnog faktora od vrednosti preporučene UNSCEARom, dovodi do odstupanja u proceni koncentracije radonovih potomaka, a posledično i do mogućeg potcenjivanja doze koju stanovnik primi, a time i do mogućeg potcenjivanja rizika od dobijanja kancera pluća.

Situacija se dodatno komplikuje u slučaju procene toronskog ravnotežnog faktora. Naime, usled kratkog vremena života ( $T_{1/2} = 55 \text{ s}$ ), raspodela torona u zatvorenim objektima nije uniformna, dok je raspodela toronovih potomaka usled njihovog dužeg vremena poluraspada uniformna, što za posledicu ima neuniformnu raspodelu ravnotežnog faktora torona unutar samog objekta [9, 10].

Osnovni cilj ovog rada je da se prikažu preliminarni rezultati ispitivanja varijacije ravnotežnog faktora radona na određenim radnim mestima i rezidencijalnim objektima u Crnoj Gori i Srbiji, što će poslužiti kao osnov za realniju procenu izloženosti stanovništva kako u boravišnim objektima tako i na radnim mestima. Takođe, budući da istraživački timove iz Srbije i Crne Gore koriste različite merne tehnike za određivanje koncentracije radona i EECR, odnosno ravnotežnog faktora, jedan od ciljeva je i da se na osnovu sprovedenih interkomparativnih merenja ravnotežnih faktora proceni do koje mere su podaci i metodologije poredive i da li postoji potreba za harmonizacijom različitih procedura merenja.

## 2. Materijal i metode

Interkomparativna merenja koncentracije radona i ravnotežne ekvivalentne koncentracije radona su izvršena u Crnoj Gori u 2 radne prostorije (u okviru Centra za ekotoksikološka ispitivanja- CETI, Podgorica) i u 2 boravišna objekta (porodična kuća i stan u zgradi u Podgorici) dok je u Srbiji merenje izvršeno u jednoj radnoj prostoriji (Institut za nuklearne nauke „Vinča“ - INN „Vinča“, Beograd).

Istraživački tim iz CETI su za merenje koncentracije radona koristili AlphaGuard Pro (Bertin Instruments) i RAD 7 (DurrIDGE Company.) dok je za merenje EEC korišćen Thomson Nielsen Radon WL Meter (RNWL). Istraživački tim iz INN „Vinča“ su za

merenje koncentracije radona koristili RTM1688-2 (SARAD GmbH), dok je za merenje EECR korišćen RPM2200 (SARAD GmbH).

Merenja su sprovedena u novembru i decembru 2019. godine. Sve prostorije osim jedne su bile zatvorene barem 12 sati pre početka merenja. Vršeno je kontinuirano merenje sa periodom integracije od 1 časa. Ukupno merenje na svakoj lokaciji je trajalo oko 24 časa, kako bi se dobila i dnevna varijacija ravnotežnog faktora.

Ravnotežni faktor je izračunat korišćenjem jednačine (1), kao odnos srednje vrednosti EECR izmerene uređajem RNWL i srednje koncentracije radona izmerene Alpha Guard-om s jedne strane, odnosno srednje vrednosti EECR izmerene uređajem RPM2200 i srednje koncentracije radona izmerene RTM1688-2 s druge strane.

### 3. Rezultati i diskusija

U tabeli 1. su prikazani rezultati interkomparativnih merenja koncentracije radona, EECR radona i izvedenih ravnotežnih faktora na 5 različitih lokacija. Dobijeni rezultati predstavljaju prva publikovana merenja ravnotežnog faktora na prostoru Crne Gore. U boravišnim prostorijama dobijen je ravnotežni faktor od 0.38 i 0.70. Rezultati se slažu sa drugim merenjima ravnotežnih faktora u regionu: u Sokobanji i na Kosovu i Metohiji, ravnotežni faktori su mereni dugoročno, pasivnim detektorima. Dobijena srednja vrednost za Sokobanju je  $0.30 \pm 0.20$ , vrednosti za Kosovo i Metohiju se kreću u opsegu od 0.043 do 0.93, dok je u Vojvodini u jednoj porodičnoj kući kratkoročnim merenjem utvrđen ravnotežni faktor od  $0.24 \pm 0.09$  [11 - 13].

U radnim prostorijama, ravnotežni faktor se kretao u opsegu od 0.36 do 0.66. U regionu, ravnotežni faktori su određivani u školama dugoročnim merenjima pasivnim uređajima. Vrednosti F faktora u školama u Makedoniji se kreću u opsegu od 0.1 do 0.84 [14], a u Republici Srpskoj F faktor se kretao u opsegu od 0.013 do 0.32 [15].

Sa većom brzinom ventilacije dobijaju se niže vrednosti ravnotežnog faktora, tako da ne čudi činjenica da su u prikazanim merenjima dobijeni uglavnom viši ravnotežni faktori od svetskog proseka, jer su tokom merenja ispitivane prostorije držane zatvorenima.

Izmerene srednje vrednosti koncentracije radona, prikazane u ovom radu se nalaze u rasponu od  $(48 \pm 11) \text{ Bq m}^{-3}$  do  $(2045 \pm 77) \text{ Bq m}^{-3}$ . Na taj način je interkomparacija ravnotežnih faktora urađena za širok opseg koncentracija radona u zatvorenim prostorijama.

U cilju ispitivanja da li postoji statistički značajna razlika između pojedinačnih merenja koncentracije radona, EECR i ravnotežnih faktora dobijenih pomoću 2 detektorska sistema (Alpha Guard i SARAD-ovi instrumenti) korišćen je Z – test. Za interval poverenja je uzet  $\alpha = 0.05$ , što odgovara kritičnoj vrednosti od  $|Z_{0.05}| < 1.96$ . Z vrednost je izračunata korišćenjem sledeće jednačine [16]:

$$Z = \frac{Bertin - SARAD}{\sqrt{u_{Bertin}^2 + u_{SARAD}^2}} \quad (2)$$

gde *Bertin* predstavlja  $C_{Rn}$ , EECR ili F izmeren Bertinovim uređajima (Alpha Guard i RNWL), a *SARAD* predstavlja  $C_{Rn}$ , EECR ili F izmeren SARADovim uređajima (RTM1688-2 i RPM2200), a  $u_{Bertin}$  odnosno  $u_{SARAD}$  predstavljaju odgovarajuće merne nesigurnosti.

Rezultati EECR dobijeni uređajima RNWL i RPM2200 ne daju mernu nesigurnost, tako da je prilikom primene Z – testa za EECR korišćena procenjena merna nesigurnost od 10 % za oba uređaja i sva merenja.

U tabeli 2. su prikazane proračunate Z – vrednosti dobijene na osnovu poređenja  $C_{Rn}$ , EECR i F dobijenih sa 2 različita seta mernih instrumenata.

**Tabela 1. Koncentracije radona  $C_{Rn}$  (Alpha Guard-a, RAD7 i RTM1688-2), ravnotežne ekvivalentne koncentracije radona EECR (RNWL i RPM2200) i izvedeni ravnotežni faktori F.**

Br.	Lokacija merenja	Zatvorenost pre početka merenja	Uređaj	$C_{Rn}$ [Bq m <sup>-3</sup> ]	EECR [Bq m <sup>-3</sup> ]	F
1.	CETI, radno mesto 1, suteran	<12h	Alpha Guard	48 ± 11		0,65*
			RAD7	48 ± 4		
			RNWL		31	
			RTM1688-2	49 ± 12		0,58
			RPM2200		29	
2.	Kuća, prizemlje, Podgorica	>12h	Alpha Guard	819 ± 66		0,38*
			RAD7	784 ± 14		
			RNWL		314	
			RTM1688-2	787 ± 46		0,42
			RPM2200		326	
3.	Stan, prizemlje, Podgorica	>12h	Alpha Guard	162 ± 24		0,70*
			RAD7	140 ± 6		
			RNWL		114	
			RTM1688-2	161 ± 21		0,68
			RPM2200		109	
4.	CETI, radno mesto 2, prizemlje	>12h	Alpha Guard	2031 ± 130		0,66*
			RAD7	2034 ± 23		
			RNWL		1349	
			RTM1688-2	2045 ± 77		0,58
			RPM2200		1187	
5.	INN Vinča, radno mesto, prizemlje	>12h	Alpha Guard	542 ± 51		0,42
			RNWL		228	
			RTM1688-2	564 ± 39		0,36
			RPM2200		201	

\* F je računat u odnosu na koncentraciju radona koja je izmerena Alpha Guard-om.

Tabela 2. Z-vrednosti za  $C_{Rn}$ , EECR i F dobijenih poređenjem slaganja Bertinovih i Saradovih uređaja.

Br.	Z – vrednost ( $C_{Rn}$ )	Z – vrednost (EECR)	Z – vrednost (F)
1.	-0,06	0,47	0,31
2.	0,40	-0,29	-0,62
3.	0,03	0,32	0,12
4.	-0,10	0,90	0,80
5.	-0,34	0,89	0,83

Za sva merenja,  $|Z_{0.05}|$  vrednost je znatno manja od 1.96 tako da se može reći da nema statistički značajne razlike između  $C_{Rn}$ , EECR i F faktora dobijenih sa dva seta mernih uređaja. Ove vrednosti ukazuju i na usaglašenost različitih tehnika merenja.

#### 4. Zaključak

U radu su prikazana interkomparativna merenja koncentracije radona, ravnotežne ekvivalentne koncentracije radona i ravnotežnog faktora na 5 lokacija u Crnoj Gori i Srbiji. Z test se koristio da bi se utvrdilo da li postoji statistički značajna razlika rezultata pojedinačnih merenja dobijenih različitim uređajima. S obzirom da dva istraživačka tima koriste različite merne tehnike za određivanje, dobro međusobno slaganje rezultata u širokom rasponu koncentracije radona od  $48 \text{ Bq m}^{-3}$  do  $2045 \text{ Bq m}^{-3}$  ukazuje na konzistentnost između različitih metodologija i nepostojanje potrebe za harmonizacijom različitih procedur merenja.

Izmereni radonski ravnotežni faktori kreću se u rasponu od 0.36 do 0.7, što je u proseku veće od svetskog proseka od 0.4. Sa većom brzinom ventilacije dobijaju se niže vrednosti ravnotežnog faktora, tako da ne čudi činjenica da su u prikazanim merenjima dobijeni uglavnom viši ravnotežni faktori od svetskog proseka, jer su tokom merenja ispitivane prostorije držane zatvorenima.

#### 5. Zahvalnica

Autori se zahvaljuju Ministarstvu prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Srbije i Ministarstvu prosvjete, nauke, kulture i sporta Crne Gore koje je odobrilo finansiranje Bilateralnog projekta: „Merenje ravnotežnog faktora radona u tipskim stambenim objektima Srbije i Crne Gore i harmonizacija tehnika merenja radona“ u okviru kojeg je ovo istraživanje sprovedeno.

#### 6. Literatura

- [1] 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).
- [2] World Health Organisation, *WHO Handbook on Indoor Radon*. WHO, Geneva, (2009).
- [3] N. Harley Effect of residential radon decay product dose factor variability on reporting of dose. *Health Phys* 114 (2018) 398–407.

- [4] J. Chen, N. Harley. A review of indoor and outdoor radon equilibrium factors – Part I:  $^{222}\text{Rn}$ , *Health Phys.* 115 (2018) 4, 490-499.
- [5] A. Wicke, J. Porstendörfer Radon daughter equilibrium in dwellings. In: *2nd Special Symposium on Natural Radiation Environment. Proceedings of conference held 19–23 January 1981; Bombay, India: Bhabha Atomic Research Center;* (1981) 132–135.
- [6] J. Vaupotic, I. Kobal. Effective doses in schools based on nanosize radon progeny aerosols. *Atmospheric Environ* 40 (2006) 7494–7507.
- [7] D. Jasaitis, A. Girgzdys The investigation of tobacco smoke influence on the changes of indoor radon and its short-lived decay products volumetric activities. *J Environ Engin Landscape Manag* 21 (2013) 59–66.
- [8] C. Hou, B. Shang, Q. Zhang, H. Cui, Y. Wu, J. Deng, Impact of hazefog days to radon progeny equilibrium factor and discussion of related factors. *Radiat Environ Biophys* 54 (2015) 475–480.
- [9] R. Mishra, R. Prajith, B. K. Sapra, Y. S. Mayya. Response of direct thoron progeny sensors (DTPS) to various aerosol concentrations and ventilation rates. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B* 268, (2010) 671–675.
- [10] R. C. Ramola, M. Prasad, T. Kandari, P. Pant, P. Bossew, R. Mishra, S. Tokonami. Dose estimation derived from the exposure to radon, thoron and their progeny in the indoor environment, *Scientific Reports* 6 (2016) 31061: 1-16.
- [11] R. Mishra, et al., An evaluation of thoron (and radon) equilibrium factor close to walls based on long-term measurements in dwellings. *Radiat Protect Dosim* 160 (2014) 164–168.
- [12] Lj. Gulan, Field experience on indoor radon, thoron and their progenies with solid-state detectors in a survey of Kosovo and Metohija (Balkan region). *Radiat Protect Dosim* 152 (2012) 189–197.
- [13] R. Lakatoš, et al., Simultaneous measurements of radon, thoron and equilibrium equivalent concentrations in family house - single case study, *Nuclear Technology and Radiation Protection* 34 (2019) 2, 181 – 188.
- [14] Z. Stojanovska et al., Results from time integrated measurements of indoor radon, thoron and their decay product concentrations in schools in the Republic of Macedonia. *Radiat Protect Dosim* 162 (2014) 152–156.
- [15] Z. Curguz, Z. Stojanovska, Z. Zunic. Long-term measurements of radon, thoron and their airborne progeny in 25 schools in Republic of Srpska. *J Environ Radioact* 148 (2015) 163–169.
- [16] K. Gopal, 100 statistical tests, *SAGE Publications Ltd; 3rd edition* (2006).

**RADON EQUILIBRIUM FACTOR IN SELECTED DWELLINGS AND  
WORKPLACES IN MONTENEGRO AND SERBIA**

**Igor ČELIKOVIĆ<sup>1</sup>, Ranko ZEKIĆ<sup>2</sup>, Nikola SVRKOTA<sup>2</sup>, Ivana VUKANAC<sup>1</sup>,  
Miloš ŽIVANOVIĆ<sup>1</sup>, Jelena KRNETA NIKOLIĆ<sup>1</sup>,  
Perko VUKOTIĆ<sup>3</sup> and Gordana PANTELIĆ<sup>1</sup>**

- 1) “Vinča” Institute of Nuclear Sciences, National Institute of the Republic of Serbia,  
University of Belgrade, Serbia, [icelikovic@vin.bg.ac.rs](mailto:icelikovic@vin.bg.ac.rs), [vukanac@vinca.rs](mailto:vukanac@vinca.rs),  
[milosz@vin.bg.ac.rs](mailto:milosz@vin.bg.ac.rs), [jnikolic@vin.bg.ac.rs](mailto:jnikolic@vin.bg.ac.rs), [pantelic@vin.bg.ac.rs](mailto:pantelic@vin.bg.ac.rs)
- 2) Center for Eco-Toxicological Research, Podgorica, Montenegro,  
[rankoz@t-com.me](mailto:rankoz@t-com.me), [nikola.svrkota@ceti.co.me](mailto:nikola.svrkota@ceti.co.me)
- 3) Montenegrin Academy of Sciences and Arts, Podgorica, Montenegro,  
[pvukotic@canu.ac.me](mailto:pvukotic@canu.ac.me)

**ABSTRACT**

In this contribution, the results of radon equilibrium factor measurement in selected dwelling and workplaces in Montenegro and Serbia are presented. Radon equilibrium factor was derived from measurements of indoor radon concentration and equilibrium equivalent radon concentration. Measurements were performed one day for each of 5 locations by using different active devices. Obtained radon equilibrium factors range from 0.36 to 0.7 which is in average larger than worldwide average of 0.4 Results are not surprising since measuring locations were kept closed during the measuring time, reducing therefore ventilation rate which as a consequence has an increase of equilibrium factor. Individual measuring results of indoor radon concentrations, equilibrium equivalent radon concentrations and radon equilibrium factors obtained with different detectors systems from 2 research teams was tested using Z – test. Obtained Z – score for each measurement was below critical value, indication that there is no statistical difference between different measuring devices.

## SISTEMATSKO ISPITIVANJE KONCENTRACIJE RADONA NA TERITORIJI BEOGRADA

**Milica RAJAČIĆ, Dragana TODORVIĆ, Jelena KRNETA NIKOLIĆ, Gordana PANTELIĆ, Ivana VUKANAC, Marija JANKOVIĆ i Nataša SARAP**  
*Univerzitet u Beogradu, Institut za nuklearne nauke "Vinča", Institut od nacionalnog značaja za Republiku Srbiju, 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), [pantelic@vinca.rs](mailto:pantelic@vinca.rs), [yukanac@vinca.rs](mailto:yukanac@vinca.rs), [marijam@vinca.rs](mailto:marijam@vinca.rs), [natasas@vinca.rs](mailto:natasas@vinca.rs)*

### SADRŽAJ

*Programom sistematskog ispitivanja nivoa radioaktivnosti u životnoj sredini na teritoriji Beograda predviđeno je merenje koncentracije radona ( $^{222}\text{Rn}$ ) u stambenim objektima, školskim i predškolskim ustanovama. Laboratorija "Zaštita", Instituta za nuklearne nauke "Vinča" je u periodu 2016-2020. izvršila ispitivanja u 547 prostorija (99 u stambenim objektima, 341 u školskim ustanovama i 107 u predškolskim jedinicama).*

*Prosečna koncentracija  $^{222}\text{Rn}$  je iznosila  $105 \text{ Bq/m}^3$ , a koncentracija ispod  $100 \text{ Bq/m}^3$  je izmerena u 76,60 % prostorija. Vrednost od  $400 \text{ Bq/m}^3$  je prekoračena u 4,94 % prostorija. Od 15 beogradskih opština, koliko je pokriveno ovim istraživanjem, u 8 je detektovana koncentracija iznad  $400 \text{ Bq/m}^3$ . Maksimalna izmerena vrednost u stambenim objektima je iznosila  $3550 \text{ Bq/m}^3$ , dok je u vaspitno-obrazovnim ustanovama najveća detektovana koncentracija bila  $1910 \text{ Bq/m}^3$ .*

### 1. Uvod

Sekretarijat za zaštitu životne sredine grada Beograda je prepoznao značaj radona kao potencijalnog izazivača raka pluća i već nekoliko godina finansira monitoring koncentracije radona u stambenim objektima, školskim i predškolskim ustanovama sa teritorije grada Beograda. U periodu od 2016. do 2020. godine, ova merenja je obavljala Laboratorija za zaštitu od zračenja i zaštitu životne sredine, Instituta za nuklearne nauke "Vinča" i u tom periodu je izmerena koncentracija radona u 547 prostorija (99 u stambenim objektima, 341 u školskim ustanovama i 107 u predškolskim jedinicama) [1-3].

Kako je Republika Srbija propisala nivoe intervencije za hronično izlaganje  $^{222}\text{Rn}$  u domovima (Službeni glasnik RS 50/18) koji iznose  $200 \text{ Bq/m}^3$  u vazduhu u novoizgrađenim stambenim objektima i  $400 \text{ Bq/m}^3$  u vazduhu za postojeće stambene objekte [4], u radu je prikazan procentualan broj prostorija u kojima su koncentracije radona bile ispod  $100 \text{ Bq/m}^3$ , u intervalima  $100\text{-}200 \text{ Bq/m}^3$  i  $200\text{-}400 \text{ Bq/m}^3$ , kao i iznad  $400 \text{ Bq/m}^3$ .

### 2. Metode

Prikupljanje uzoraka za ispitivanje koncentracije radona je sprovedeno izlaganjem kanistera sa ugljenim filterima u periodu 2-3 dana. U školskim i predškolskim ustanovama, izlaganja su vršena od petka posle nastave do ponedeljka pre nastave, kada je bilo omogućeno da se prostorije ne otvaraju.

Merenja su vršena po US EPA 520/5-87-005 metodi [5] nakon uspostavljanja radioaktivne ravnoteže između radona i njegovih potomaka (najmanje tri sata posle zatvaranja kanistera). Kalibracija korišćenog NaI detektora je izvršena sertifikovanim

radioaktivnim standardom  $^{226}\text{Ra}$  u geometriji identičnoj geometriji merenja (Ser.No. 1035-SE-40869-17, Czech Metrology Institute, aktivnosti 701,6 Bq), dok se kontrola kvaliteta detektora vrši najmanje jednom u nedelji u kojoj se vrše ispitivanja.

Određivanje koncentracije radona, etaloniranje i kontrola kvaliteta se vrše na osnovu integralnog odbroja u intervalu energija 295-609 keV.

### 3. Rezultati i diskusija

Osim 2016. kada u jednoj predškolskoj ustanovi nije bilo omogućeno postavljanje kanistera, svake godine je ispitivanjem obuhvaćeno po 20 školskih, 10 predškolskih i 20 stambenih objekata, pri čemu su kanisteri, u zavisnosti od veličine objekta, izlagani u 1-5 prostorija. Prosečna koncentracija  $^{222}\text{Rn}$  je iznosila  $105 \text{ Bq/m}^3$ , što je u saglasnosti sa jednim od prethodnih istraživanja [6].

Iz Tabele 1 se vidi da se procenat prostorija u kojima je detektovana koncentracija  $^{222}\text{Rn}$  iznad  $400 \text{ Bq/m}^3$  tokom perioda ispitivanja kretao u intervalu 1,45-10,10 %, dok u najvećem procentu prostorija (72,73-81,00 %) koncentracija  $^{222}\text{Rn}$  nije prelazila  $100 \text{ Bq/m}^3$ .

**Tabela 1. Raspodela koncentracije  $^{222}\text{Rn}$  u svim prostorijama po godinama i intervalima izmerenih vrednosti.**

<i>Procenat ispitanih prostorija u svim objektima sa koncentracijom <math>^{222}\text{Rn}</math> (<math>\text{Bq/m}^3</math>) u pojedinim intervalima:</i>				
<i>Period</i>	<i>&lt; 100</i>	<i>100-200</i>	<i>200-400</i>	<i>&gt; 400</i>
<b>2016.</b>	78,26	14,49	5,80	1,45
<b>2017.</b>	75,45	10,91	5,45	8,18
<b>2018.</b>	72,73	12,12	5,05	10,10
<b>2019.</b>	75,00	15,00	6,00	4,00
<b>2020.</b>	81,00	9,00	8,00	2,00
<b>2016-2020.</b>	<b>76,60</b>	<b>12,43</b>	<b>6,03</b>	<b>4,94</b>

Tokom 2016. godine je ispitano ukupno 130 prostorija, pri čemu je u dvema školskim ustanovama detektovana koncentracija iznad  $400 \text{ Bq/m}^3$ .

U 2017. godini koncentracija  $^{222}\text{Rn}$  je izmerena u 110 prostorija, a iznad  $400 \text{ Bq/m}^3$  je detektovano u tri stambena objekta, dvema školskim i dvema predškolskim ustanovama. Godine 2018. godine je izmerena koncentracija  $^{222}\text{Rn}$  u ukupno 99 prostorija. U objektima 4 školske i 2 predškolske ustanove je detektovano  $400 \text{ Bq/m}^3$ , kao i u 1 stambenom objektu.

Koncentracija  $^{222}\text{Rn}$  iznad zakonom propisane granice je izmerena u dvema školskim ustanovama, od ukupno 100 ispitanih prostorija u 2019. godini.

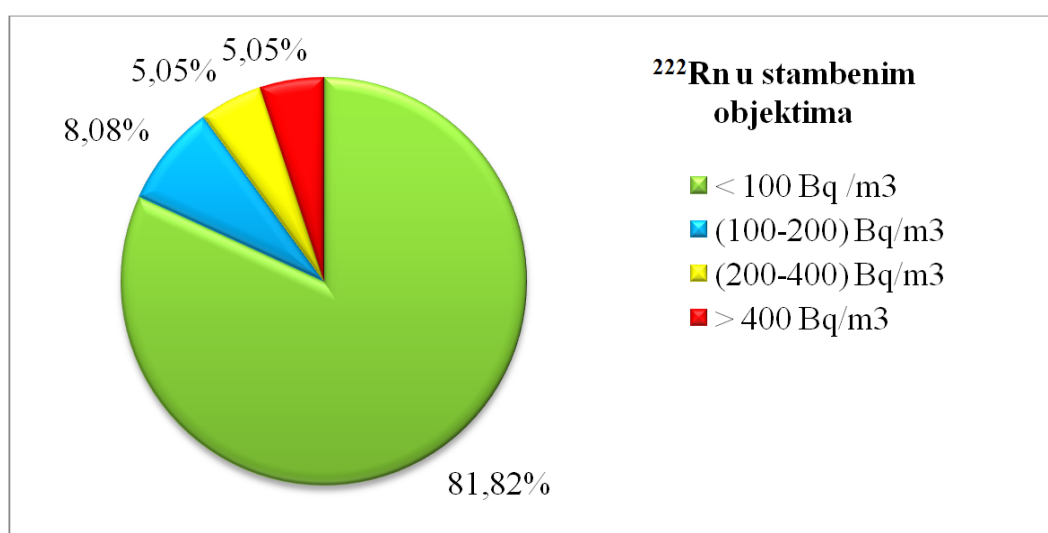
Od ukupno 100 ispitanih prostorija u 2020. godini, iznad  $400 \text{ Bq/m}^3$   $^{222}\text{Rn}$  je izmereno u jednoj školskoj ustanovi i jednom stambenom objektu.

Najviši procenat prostorija sa koncentracijom višom od  $400 \text{ Bq/m}^3$  je bio 2018. godine, kada je u 19,05 % predškolskih ustanova prekoračen propisan interventni nivo. Maksimalna izmerena vrednost u okviru Programa monitoringa Beograda u stambenim objektima je iznosila  $3550 \text{ Bq/m}^3$ , u školskim ustanovama  $1910 \text{ Bq/m}^3$ , dok je u predškolskim ustanovama izmereno najviše  $970 \text{ Bq/m}^3$ . Međutim, nakon izmerene

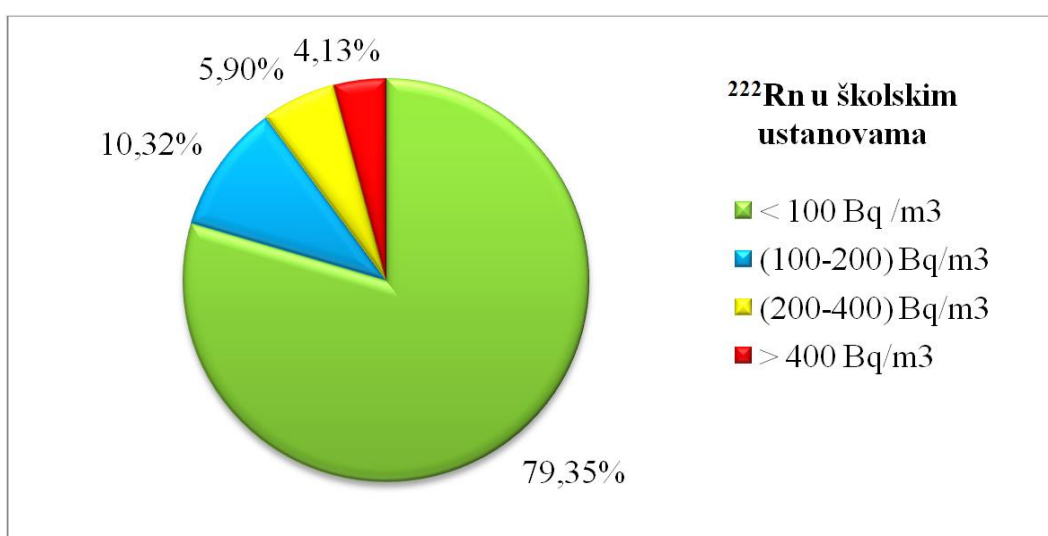


visoke koncentracije radona u jednoj kući u Grockoj ( $3440 \text{ Bq/m}^3$ ), ispitivanje je prošireno i na druge prostorije i druga godišnja doba. Tada su izmerene i koncentracije koje su dostizale do  $4010 \text{ Bq/m}^3$ . Koncentracija radona je u toku letnjih meseci bila mnogo niža ( $27\text{-}57 \text{ Bq/m}^3$ ) nego u zimskom periodu, a uočeno je i smanjenje koncentracije naredne zime, kada je za grejanje umesto uglja korišćen drveni pelet ( $350\text{-}1400 \text{ Bq/m}^3$ ) [7].

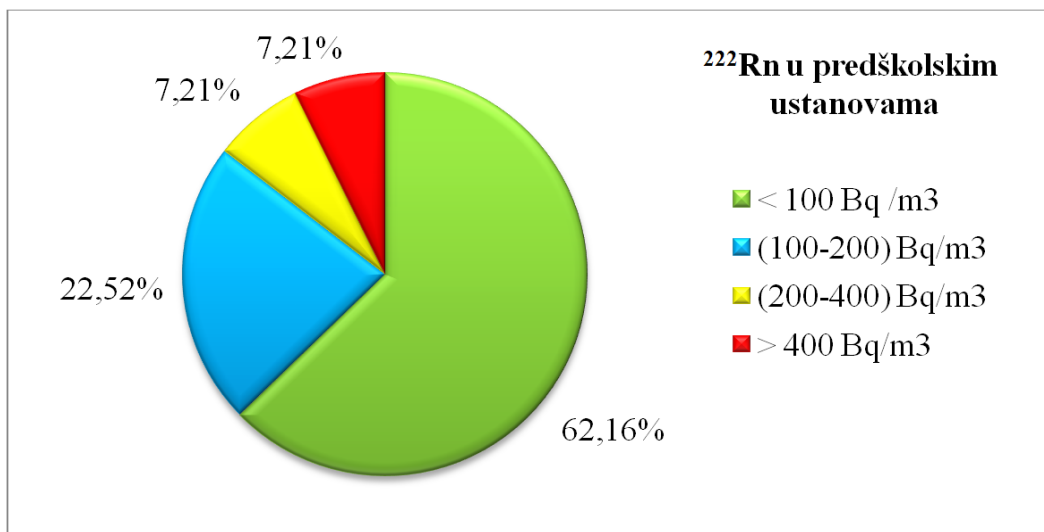
Na sledećim graficima (Grafici 1-3) je prikazan procenat prostorija sa koncentracijama  $^{222}\text{Rn}$  ispod  $100 \text{ Bq/m}^3$ , u intervalima  $100\text{-}200 \text{ Bq/m}^3$  i  $200\text{-}400 \text{ Bq/m}^3$ , kao i iznad  $400 \text{ Bq/m}^3$  u celom periodu ispitivanja, u prostorijama razvrstanim po nameni objekata. U približno 82 % stambenih objekata, koncentracija  $^{222}\text{Rn}$  je bila ispod  $100 \text{ Bq/m}^3$ , dok je u približno 5 % prelazila  $400 \text{ Bq/m}^3$ . Slična situacija je i u školskim ustanovama, dok je u predškolskim ustanovama situacija nešto lošija, pa je ispod  $100 \text{ Bq/m}^3$   $^{222}\text{Rn}$  detektovano u 62,2 % prostorija, a u 7,2 % su detektovane vrednosti iznad  $400 \text{ Bq/m}^3$ .



**Grafik 1. Raspodela koncentracije  $^{222}\text{Rn}$  u stambenim objektima**



**Grafik 2. Raspodela koncentracije  $^{222}\text{Rn}$  u školskim objektima**



**Grafik 3. Raspodela koncentracije <sup>222</sup>Rn u predškolskim objektima**

Ukoliko se pogleda raspodela po opštinama (Tabela 2), primećuje se da je u četiri opštine koncentracija <sup>222</sup>Rn prelazila vrednost od 400 Bq/m<sup>3</sup> u više od 10 % prostorija. U drugim ispitanim opštinama koje nisu prikazane u Tabeli 2 (Savski venac, Stari grad, Vračar, Zvezdara, Surčin, Obrenovac i Lazarevac), nije detektovana nijedna prostorija sa koncentracijom <sup>222</sup>Rn iznad 400 Bq/m<sup>3</sup>.

**Tabela 2. Raspodela prostorija sa izmerenim koncentracijama <sup>222</sup>Rn iznad 400 Bq/m<sup>3</sup> po opštinama.**

Opština	Maksimalna izmerena vrednost <sup>222</sup> Rn ( $Bq/m^3$ )	Broj objekata sa <sup>222</sup> Rn > 400 $Bq/m^3$	Procenat objekata sa <sup>222</sup> Rn > 400 $Bq/m^3$
Barajevo	3550	1	16,67 %
Palilula	1910	5	14,29 %
Zemun	860	4	13,79 %
Grocka	3440	5	13,16 %
Rakovica	970	3	8,57 %
Voždovac	1140	3	5,26 %
Čukarica	850	3	4,55 %
Novi Beograd	610	3	3,03 %

#### 4. Zaključak

Od 547 ispitanih prostorija, tokom perioda 2016-2020, u ukupno 249 objekata sa 15 beogradskih opština, prosečna koncentracija je iznosila 105 Bq/m<sup>3</sup>. Izmerena koncentracija <sup>222</sup>Rn je bila ispod 100 Bq/m<sup>3</sup> u 76,60 % prostorija, dok je u intervalima 100-200 Bq/m<sup>3</sup> i 200-400 Bq/m<sup>3</sup> izmerena u 12,43 %, odnosno 6,03 % ispitanih prostorija. Izmerene koncentracije <sup>222</sup>Rn premašile su vrednost od 400 Bq/m<sup>3</sup> u 4,94 % prostorija.

Od ukupno 27 prostorija u kojima su detektovane koncentracije iznad  $400 \text{ Bq/m}^3$ , 5 se nalazilo u stambenim objektima, 14 u školama i 8 u predškolskim ustanovama. Takođe, razvrstano po opštinama, 1 prostorija se nalazila na teritoriji opštine Barajevo, po tri na opštinama Rakovica, Voždovac, Čukarica i Novi Beograd, 4 u Zemunu i po pet na opštinama Palilula i Grocka.

U objektima u kojima je detektovana povišena koncentracija radona potrebno je vršiti učestalija merenja u cilju ispitivanja uzroka povišene koncentracije radona i eventualne izrade plana njihove sanacije.

## 5. Zahvalnica

Istraživanje je finansirano od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije na osnovu Aneks ugovora, čiji je evidencioni broj: 451-03-9/2021-14/200017. i Sekretarijata za zaštitu životne sredine grada Beograda.

## 6. Literatura

- [1] Kvalitet životne sredine u Beogradu u 2016. godini, Urednik: Spec. Nataša Petrušić, Izdavač: Grad Beograd, Gradska uprava, Sekretarijat za zaštitu životne sredine, ISBN 978-86-912029-4-1, Beograd, 2017, 72-75
- [2] Kvalitet životne sredine u Beogradu u 2017. godini, Urednik: Spec. Nataša Petrušić, Izdavač: Grad Beograd, Gradska uprava, Sekretarijat za zaštitu životne sredine, ISBN 978-86-912029-5-8, Beograd, 2018, 64
- [3] Kvalitet životne sredine u Beogradu u 2018. godini, Urednici: Spec. Nataša Petrušić, Dr Slaviša Mladenović, Dr Dragan Pajić, Dr Ivana Ristanović–Ponjavić, Izdavač: Grad Beograd, Gradska uprava, Sekretarijat za zaštitu životne sredine, ISBN 978-86-912029-6-5, Beograd, 2019, 81-83
- [4] Pravilnik o granicama izlaganja jonizujućim zračenjima i merenjima radi procene nivoa izlaganja jonizujućim zračenjima, Sl. glasnik br. 50/18, 2018
- [5] D. J. Grey, S. T. Windham. *EERF Standard Operating Procedures for Radon-222 Measurement Using Charcoal Canisters*, EPA 520/5-87-005, 1987
- [6] Pantelić G., Krneta Nikolić J., Rajačić M., Živanović M. and Todorović D., Radon in dwellings in Belgrade, *Proceedings in 11<sup>th</sup> Symposium of the Croation Radiation Protection Association, with internatioanal participation*, April 5-7 2017, Croatia, Osijek, 2017, ISBN: 1849-5060, 362-366
- [7] Pantelić G., Rajačić M., Krneta Nikolić J., Vukanac I., Miloš Živanović, Igor Čeliković, Todorović D., Janković M., Nataša S., Radenković M., Sezonske varijacije koncentracije radona, *Zbornik radova XXX Simpozijum Društva za zaštitu od zračenja Srbije i Crne Gore*, 02-04 Oktobar 2019, Divčibare, Srbija, ISBN: 978-86-7306-154-2, 215-219

SYSTEMATIC INVESTIGATION OF RADON CONCENTRATION ON THE  
TERRITORY OF BELGRADE

**Milica RAJAČIĆ, Dragana TODORVIĆ, Jelena KRNETA NIKOLIĆ,  
Gordana PANTELIĆ, Ivana VUKANAC, Marija JANKOVIĆ and Nataša SARAP**  
*University of Belgrade, Institute of Nuclear Sciences "Vinča", National Institute of the  
Republic of Serbia, Radiation and Environmental Protection Department, 11000  
Belgrade, Serbia, [milica100@vinca.rs](mailto:milica100@vinca.rs), [beba@vinca.rs](mailto:beba@vinca.rs), [jnikolic@vinca.rs](mailto:jnikolic@vinca.rs),  
[pantelic@vinca.rs](mailto:pantelic@vinca.rs), [yukanac@vinca.rs](mailto:yukanac@vinca.rs), [marijam@vinca.rs](mailto:marijam@vinca.rs), [natasas@vinca.rs](mailto:natasas@vinca.rs)*

ABSTRACT

The program of the level of radioactivity in the environment monitoring on the territory of Belgrade envisages measuring the concentration of radon in residential buildings, schools and kindergartens. The Department of Radiation and Environmental Protection of the Institute of Nuclear Sciences "Vinca" conducted examination in 547 rooms (99 in residential buildings, 341 in schools and 107 in kindergartens) in the period 2016-2020. The average concentration of  $^{222}\text{Rn}$  is  $105 \text{ Bq/m}^3$ , and the concentration below  $100 \text{ Bq/m}^3$  was measured in 76.60 % of the rooms. The value of  $400 \text{ Bq/m}^3$  was exceeded in 4.94 % of the rooms. Out of 15 Belgrade municipalities covered by this research, a concentration above  $400 \text{ Bq/m}^3$  was detected in 8 municipalities. The maximum measured value in residential buildings was  $3550 \text{ Bq/m}^3$ , while in educational institutions the highest detected concentration was  $1910 \text{ Bq/m}^3$ .

## ANALIZA VISOKE KONCENTRACIJE RADONA U JEDNOJ KUĆI U RUDARSKOM PODRUČJU KOMPLEKSA „TREPČA“

Ljiljana GULAN<sup>1</sup>, Sofija FORKAPIĆ<sup>2</sup>, Dušica SPASIĆ<sup>1</sup>,  
Jelena ŽIVKOVIĆ RADOVANOVIĆ<sup>1</sup>, Biljana VUČKOVIĆ<sup>1</sup>,  
Jan HANSMAN<sup>2</sup> i Robert LAKATOŠ<sup>3</sup>

- 1) Univerzitet u Prištini sa privremenim sedištem u Kosovskoj Mitrovici, Prirodno-matematički fakultet, Lole Ribara 29, 38220 Kosovska Mitrovica, Srbija, [ljiljana.gulan@pr.ac.rs](mailto:ljiljana.gulan@pr.ac.rs), [dusica.spasic@pr.ac.rs](mailto:dusica.spasic@pr.ac.rs), [jelena.zivkovic.radovanovic@pr.ac.rs](mailto:jelena.zivkovic.radovanovic@pr.ac.rs), [biljana.vuckovic@pr.ac.rs](mailto:biljana.vuckovic@pr.ac.rs)
- 2) Univerzitet u Novom Sadu, Prirodno-matematički fakultet, Trg Dositeja Obradovića 4, 21000 Novi Sad, Srbija, [sofija@df.uns.ac.rs](mailto:sofija@df.uns.ac.rs), [jan.hansman@df.uns.ac.rs](mailto:jan.hansman@df.uns.ac.rs)
- 3) Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Srbija, [laki@uns.ac.rs](mailto:laki@uns.ac.rs)

### SADRŽAJ

Visoke koncentracije radona zabeležene su u jednoj kući u naselju Rudare u blizini rudarskog kompleksa “Trepča”. Ugljeni kanisteri izlagani po 48 sati u julu, novembru i decembru 2019 pokazali su vrednosti koncentracije radona:  $16273 \pm 162$ ,  $962 \pm 17$ ,  $144 \pm 7$  Bq/m<sup>3</sup>, respektivno. Istovremeno sa ugljenim kanisterima koncentracija radona merena je aktivnom metodom (RAD7 uređajem) u novembru (u ciklusu 11x1h), i vrednosti su opadale od  $2764 \pm 212$  do  $1449 \pm 104$  Bq/m<sup>3</sup>. Specifične aktivnosti radionuklida <sup>226</sup>Ra, <sup>232</sup>Th, <sup>40</sup>K, <sup>238</sup>U i <sup>235</sup>U u zemljištu u blizini kuće iznosile su:  $65,3 \pm 1,5$ ,  $116,0 \pm 2,2$ ,  $890 \pm 40$ ,  $113 \pm 5$ ,  $9,0 \pm 0,4$  Bq/kg, respektivno, i veće su od istih u kamenu koji je korišćen za izgradnju kuće. Vrednost jačine gama doze u blizini unutrašnjih zidova kretala se od 0,33-0,35 μSv/h. Ovi rezultati su korišćeni za procenu geogenog potencijala radona na osnovu određenog granulometrijskog sastava zemljišta. Područje kompleksa “Trepča” u geomorfološkom smislu čine uglavnom stene magmatskog porekla, u geotektonskom i seizmičkom smislu ga odlikuje duboki rased i klasifikovano je kao umereno trusno područje. Stoga, dalje istraživanje treba usmeriti na veći broj objekata u rudarskom području i identifikaciju regiona sa visokim koncentracijama radona koje prevazilaze nacionalni referentni nivo za radon od 300 Bq/m<sup>3</sup>.

### 1. Uvod

Prisustvo urana i radijuma u stenama ispod objekata je važna odrednica kada je u pitanju radonski potencijal. Kako permeabilnost tla kontroliše brzinu kojom se radon transportuje sa velikih dubina na površinu, bilo koja šupljina koja postoji pod zemljom ima potencijal da akumulira povišene nivoe radona. Objekti izgrađeni na površini zemlje imaju potencijal da uvlače zemni gas, koji može sadržati visoke koncentracije radona. Ovaj fenomen je obično rezultat pritiska u objektima izazvanim tzv. “efektom dimnjaka” (podizanje toplog vazduha) i uglavnom predstavlja problem u hladnoj i umerenoj klimi. Da li će se zemni gas sa visokim koncentracijama radona akumulirati u zgradama zavisi od konstrukcije i načina korišćenja objekata.

Povišeni nivoi radona se mogu pripisati lokalnoj geologiji, ali mogu biti i rezultat rudarske aktivnosti i visoke propustljivosti koja je veštački indukovana [1]. U oblastima rudarske aktivnosti generišu se značajne promene u stenskoj masi. Takođe, važan

element koji utiče na migraciju radona je lokalna tektonika. Migracija radona izazvana je vađenjem rude i površinskim sleganjem, kao i nastalim tektonskim diskontinuitetima duž zona raseda izazvanim miniranjem i podrhtavanjem tla [2]. Ovi procesi dovode do visokih nivoa radona u zemnom gasu i često su rezultat povećane propustljivosti u zonama sleganja. Procesii izazvani rudarstvom donose značajnu fragmentaciju u slojevima stena, što može dovesti do povećanja aktivnih puteva migracije radona u stenskim masama i do ekshalacije radona u atmosferu ili objekte.

Iako udeo objekata sa nivoima radona koji prevazilaze referentne nivoe nizak u mnogim oblastima, u pojedinim oblastima ukupan broj kuća koje su “pogođene” može biti visok ako se uzme u obzir gustina stanovništva. Rudarska područja su obično gusto naseljena i stanovništvo je potencijalno izloženo povišenim vrednostima radona i njegovih potomaka. Monitoring radona u takvim naseljima treba izvesti u što većem broju objekata i zbog činjenice da više faktora istovremeno omogućavaju migraciju radona. Pored toga, odlagališta iz rudnika i skladištenje otpadnog materijala nakon prerade se uglavnom obavlja na površini u blizini naselja, a monitoring sadržaja prirodnih radioaktivnih materijala (NORM) i tehnološki izmenjene prirodne radioaktivnosti (TENORM) se retko sprovodi.

Cilj ovog rada je da se ukaže na potrebu monitoringa radona u blizini rudarskog kompleksa “Trepča”, zbog visoke vrednosti radona izmerene u jednoj kući u naselju Rudare, i da se daljim merenjima izvrši identifikacija područja koja su sklona radonu.

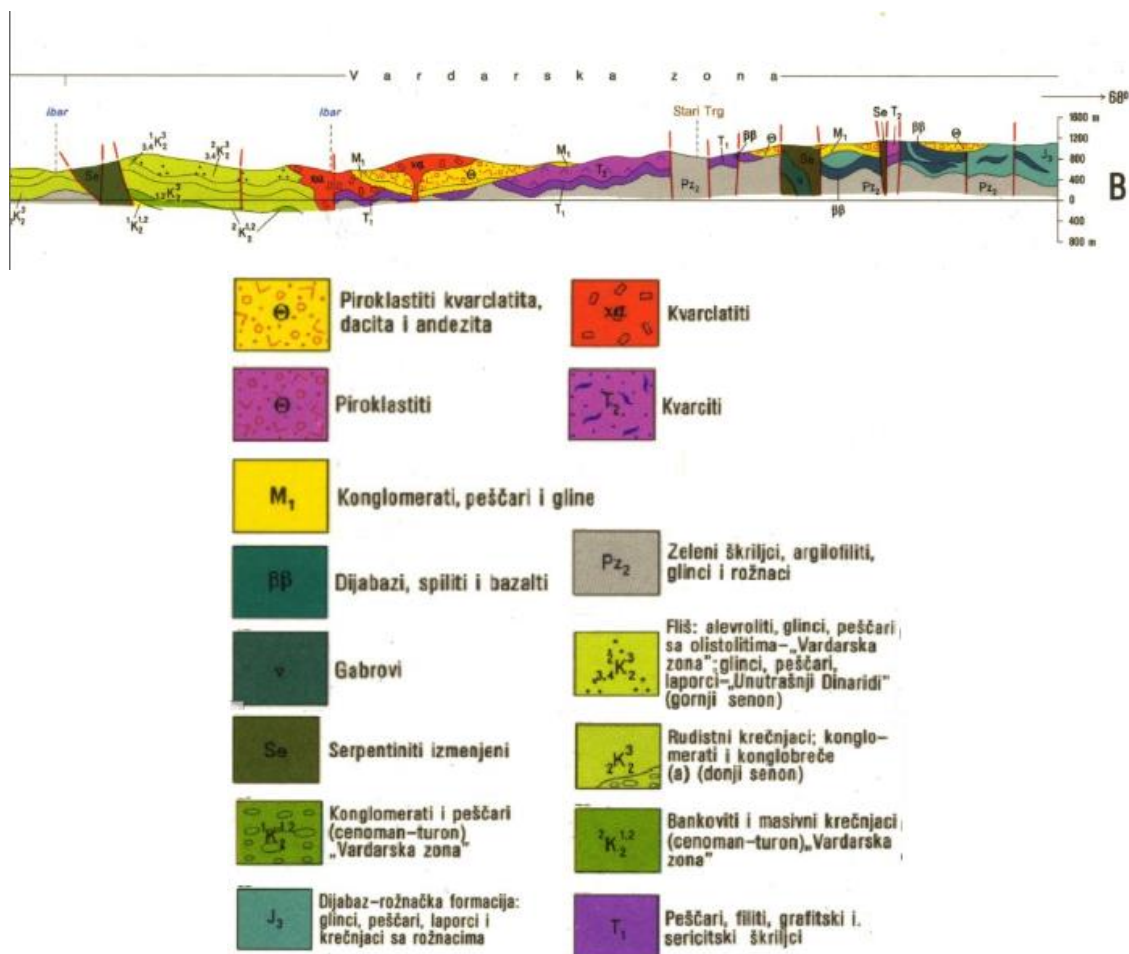
## **2. Ispitivano područje, materijal i metode**

### **2.1 Geologija područja**

Kosovskomitrovički region pripada zoni tercijarnog magmatizma. Geološke strukture formirane su od ordovicijuma-silura do kvartara. Najzastupljenije stene severoistočno od Kosovske Mitrovice su paleozojski kristalasti škriljci, jurske ultrabazične stene (serpentiniti i peridotiti), veće mase dijabaza. Vulkanske stene, daciti, andeziti, latiti i kvarclatiti praćeni velikim masama piroklastita produkt su intenzivne vulkanske aktivnosti; izlivi su pratili intruziju granitnih stena i velike rasede duž doline Ibra, jugozapadno od Kopaonika, na Rogozni i oko Trepče [3]. Za proboje ovih stena vezana su bogata rudna ležišta olova, cinka i drugih metala i nemetala. Rudnik “Trepča” počeo je sa radom 1930. godine, sa prekidom u 1999. godini. Iako je bilo najvažnije rudarsko područje Evrope, danas veći deo kompleksa nije operativan. U neposrednoj je blizini i rudnik Stari trg u kojem se vrše miniranja po informacijama dobijenim od meštana na terenu.

### **2.2 Metode merenja**

Za merenje koncentracije radona u kući korišćena je pasivna metoda adsorpcije na aktivnom uglju. Ugljeni kanisteri su bili izlagani u dnevnoj sobi prizemne kuće u naselju Rudare u trajanju od 48 h u julu, novembru i decembru 2019. Relativno visok intenzitet gama linija radonovih potomaka  $^{214}\text{Pb}$  i  $^{214}\text{Bi}$  omogućava indirektno određivanje koncentracije radona u zatvorenom prostoru najmanje tri sata nakon prestanka izlaganja, kako bi se omogućila sekularna ravnoteža na aktivnom uglju. Gama-spektrometrijska merenja su izvršena na HPGe detektoru visoke rezolucije i NaI(Tl) scintilacionom spektrometru.



Slika 1. Geološki profil sa vertikalnim presekom stena naselja Rudare i okoline [3].

Pored pasivnih merenja u novembru 2019. uporedo su vršena i direktna merenja koncentracije radona u vazduhu zatvorene prostorije pomoću aktivnog monitora radona RAD7 (proizvođača DURRIDGE) sa polusfernom aktivnom komorom zapremine 0,75 litara. Alfa-spektrometrijska metoda pogodna je za razdvajanje radonovih i toronovih potomaka zbog različitih energija emitovanih alfa čestica, kao i za odvajanje "starog" od "novog" radona. Dotok svežeg vazduha obezbeđen je automatskom pumpom sa stalnim protokom i vazduh u početku prolazi kroz odvlaživač, a na samom ulazu u detektor nalazi se filter koji uklanja potomke radona i torona. Merenja radona RAD7 uređajem izvršena su u ciklusima od po 1 h u periodu od 11 h.

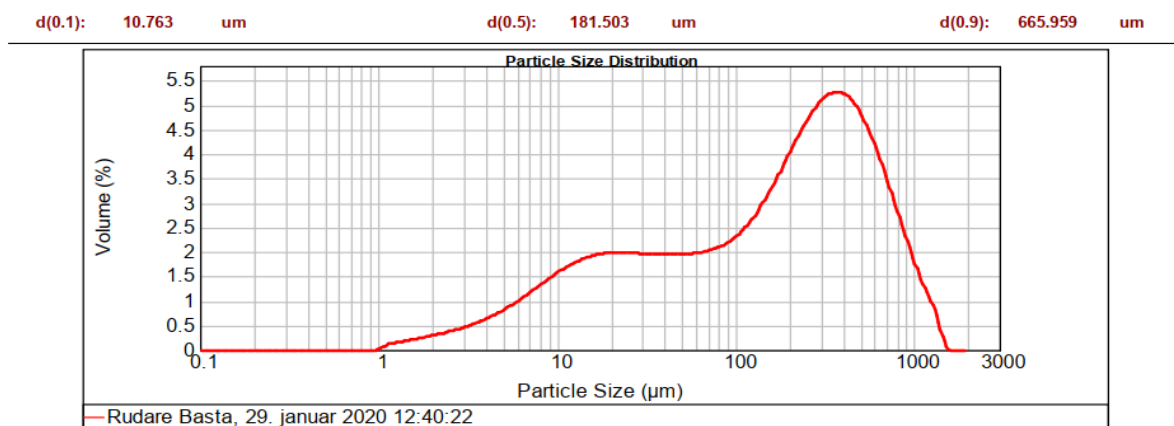
Da bi se procenio radonski potencijal izmerena je koncentracija radona u zemljištu u neposrednoj blizini kuće aktivnim monitorom RAD7 sa čeličnom sondom pobodenom u zemljište do dubine od 80 cm. Sa date lokacije uzeti su uzorci zemljišta, kao i kamena koji je verovatno korišćen u izgradnji kuće za gamaspektrometrijsku analizu sadržaja radionuklida. Ovi uzorci su sušeni do konstantne mase, usitnjeni homogeno pakovani u plastične cilindrične posude koje su hermetički zatvarane i takve ostavljene 40 dana da bi se uspostavila sekularna radioaktivna ravnoteža između  $^{222}\text{Rn}$  i  $^{226}\text{Ra}$ . Gama spektrometrijska merenja izvršena su HPGe detektorom tipa ORTEC GMX, rezolucije 1,9 keV i nominalne efikasnosti 32 %. Pasivna zaštita oko detektora je napravljena od olova debljine 12 cm. Gama spektri su prikupljeni i analizirani pomoću Canberra Genie 2000 softvera. Sve merne nesigurnosti su date na nivou poverenja od 95 %. Za procenu

koncentracije aktivnosti  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$  i  $^{235}\text{U}$  korišćeni su najintenzivniji gama prelazi. Za određivanje koncentracije aktivnosti urana  $^{238}\text{U}$  korišćene su linije neposrednog potomka  $^{234}\text{Th}$ . Analiza granulometrijskog sastava zemljišta izvršena je metodom laserske difrakcije na uređaju Malvern Mastersizer 2000 za analizu veličine čestica u opsegu od  $0.02\ \mu\text{m}$  do  $2000\ \mu\text{m}$ . Za klasifikaciju veličine zrna korišćene su sledeće frakcije: krupnozrni pesak ( $500\text{--}2000\ \mu\text{m}$ ), srednji pesak ( $250\text{--}500\ \mu\text{m}$ ), fini pesak ( $62.5\text{--}250\ \mu\text{m}$ ), silt ( $3.9\text{--}62.5\ \mu\text{m}$ ) i glina ( $<3.9\ \mu\text{m}$ ).

### 3. Rezultati i diskusija

Izmerene vrednosti koncentracije aktivnosti radona ugljenim kanisterima su iznosile:  $16273\pm 162\ \text{Bq/m}^3$ ,  $962\pm 17\ \text{Bq/m}^3$ ,  $144\pm 7\ \text{Bq/m}^3$  u julu, novembru i decembru 2019, respektivno. Aktivna merenja koncentracije radona uređajem RAD7 (u ciklusima po 1 h u toku noći) pokazala su trend opadanja koncentracije od  $2764\pm 212\ \text{Bq/m}^3$  do  $1449\pm 104\ \text{Bq/m}^3$ . Merenja pokazuju značajne varijacije koncentracije radona koje nisu u skladu sa sezonskim varijacijama.

Specifične aktivnosti radionuklida u dva uzorka zemljišta uzeta u blizini kuće su iznad uobičajenih vrednosti za područje Kosova i Metohije ( $33\ \text{Bq/kg}$  za  $^{226}\text{Ra}$ ,  $35\ \text{Bq/kg}$  za  $^{232}\text{Th}$  i  $620\ \text{Bq/kg}$  za  $^{40}\text{K}$ ) [4], a takođe i više od vrednosti izmerenih u uzetim uzorcima kamena od kojeg su izrađeni zidovi ispitane kuće (Tabela 1). Ono što je takođe uočeno je pomeranje raspodele veličine zrna zemljišta ka krupnijoj frakciji na osnovu čega se može proceniti veća permeabilnost zemljišta i veći geogeni potencijal. Međutim u zemljištu nisu izmerene povišene koncentracije radona ( $7,5\pm 1,3\ \text{kBq/m}^3$  što se smatra niskom vrednošću  $< 10\ \text{kBq/m}^3$ ), i po metodi procene geogenog radonskog potencijala na osnovu udela niskozrne frakcije ( $< 65\ \mu\text{m}$ ) – u ovom slučaju  $32,37\ \%$  i izmerene koncentracije radona u zemnom gasu [5] indeks radonskog rizika je mali.



Slika 2. Raspodela veličine čestica u uzorku zemljišta iz bašte pored kuće – selo Rudare.

Vrednost jačine gama doze u blizini unutrašnjih zidova prostorije kretala se  $0,33 - 0,35\ \mu\text{Sv/h}$ .

Na osnovu dobijenih rezultata može se zaključiti da su koncentracije radona znatno veće od nacionalnog referentnog nivoa, a vrednosti aktivnosti radionuklida u zemljištu 2 puta veće od svetskog proseka ( $33\ \text{Bq/kg}$  za  $^{238}\text{U}$ ,  $32\ \text{Bq/kg}$  za  $^{226}\text{Ra}$ ,  $45\ \text{Bq/kg}$  za  $^{232}\text{Th}$  i  $412\ \text{Bq/kg}$  za  $^{40}\text{K}$ ) [6]. To može ukazivati na područje sklono radonu.



**Tabela 1. Specifične aktivnosti radionuklida  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$  i  $^{235}\text{U}$  u uzorcima zemljišta i kamenu.**

Radionuklid/uzorak	$^{226}\text{Ra}$	$^{232}\text{Th}$	$^{40}\text{K}$	$^{238}\text{U}$	$^{235}\text{U}$
	(Bq/kg)				
<b>Zemljište 1</b>	65,3±1,5	116,0±2,2	890±40	113±5	9,0±0,4
<b>Zemljište 2</b>	50,3±1,0	79,4±2,8	736±10	106±6	6,0±0,3
<b>Kamen</b>	40,9±1,0	75,6±1,7	642±28	73±4	5,9±0,3

Pored toga, rudarske aktivnosti mogu izazvati fluktuacije koncentracije radona, i visoke vrednosti u obližnjim kućama usled naglog dotoka radona kroz pukotine. S druge strane, visoka vrednost radona u letnjem periodu može se objasniti naglim izlaženjem radona iz zemljišta, usled geodinamičkih procesa u zemljinoj kori i na površini. Naime, 26.11.2019, dogodio se jak zemljotres u Albaniji magnitude  $M_L=6,4$  (200 km od Kosovske Mitrovice), oko 13 dana nakon izvršenih merenja radona. Postojanje zone dubokog raseda i seizmotektonske zone u okolini Kosovske Mitrovice dozvoljava transport radona kroz pukotine zbog gradijenta pritiska usled predseizmičkog naprezanja. Pojave zemljotresa kojima su prethodile visoke koncentracije radona, i zatim nagli pad pred potres zabeležene su u drugim studijama označavajući radon za pekursor zemljotresa [7-9].

#### 4. Zaključak

Visoke koncentracije radona koje prevazilaze nacionalni referentni nivo za radon od  $300 \text{ Bq/m}^3$  izmerene su u jednoj kući u blizini rudarskog kompleksa "Trepča". Prema neobjavljenom malom broju podataka, postoje i drugi objekti u kojima je stanovništvo potencijalno izloženo povišenim vrednostima radona. Na osnovu predstavljenih rezultata postoji potreba monitoringa radona u većem broju objekata, jer vrednosti koncentracije radona i aktivnosti radionuklida u zemljištu ukazuju da pored lokalne geologije, postoji niz drugih faktora koji determinišu nivo radona u objektima. Pored toga, zbog gradijenta pritiska usled predseizmičkog naprezanja zabeležene visoke koncentracije radona u danima koji su prethodili pojavi zemljotresa u regionu, pokazale su da radon može biti koristan prediktor u geotektonskim istraživanjima.

#### 5. Zahvalnica

Rad je podržan od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije Ugovorima br. 451-03-9/2021-14/200123 i br. 451-03-9/2021-14/200125.

#### 6. Literatura

- [1] M. Wysocka. Radon problems in mining and post-mining areas in the Upper Silesia region, Poland. *Nukleonika* 61(3), 2016, 307-313.
- [2] R. Hejmanowski, W. T. Witkowski. Suitability assessment of artificial neural network to approximate surface subsidence due to rock mass drainage. *J. Sustain. Mineral.* 14(2), 2015, 101–107.
- [3] Geološki Atlas Srbije. Ministarstvo za zaštitu prirodnih bogatstava i životne sredine Republike Srbije. Berek, Beograd, 2002.
- [4] Gulan Ljiljana, Merenje radionuklida u tlu i radona u zatvorenim prostorijama na Kosovu i Metohiji, *Doktorska disertacija*, (2014), Kragujevac 2014.

- [5] I. Barnet, P. Pacherova, M.N., 2008. Radon in geological environment—Czech experience Czech Geological Survey Special Papers, No. 19. Prague.
- [6] 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.
- [7] A. Gregorič, B. Zmažek, S. Dzeroski, D. Torkar, J. Vaupotič. Radon as an Earthquake Precursor - Methods for Detecting Anomalies, Earthquake Research and Analysis - Statistical Studies, Observations and Planning, Chapter 9. 2012.
- [8] Y. Hwa Oh, G.A. Kim. Radon-thoron isotope pair as a reliable earthquake precursor. *Sci Rep* 5, 2015,13084.
- [9] J.W. Kim, H.Y. Joo, R. Kim, J.H. Moon. Investigation of the relationship between earthquakes and indoor radon concentrations at a building in Gyeongju, Korea. *Nuclear Engineering and Technology*, 50 (3), 2018, 512-518.

---

**ANALYSIS OF HIGH RADON CONCENTRATION IN ONE HOUSE IN THE MINING AREA OF THE "TREPČA" COMPLEX**

**Ljiljana GULAN<sup>1</sup>, Sofija FORKAPIĆ<sup>2</sup>, Dušica SPASIĆ<sup>1</sup>,  
Jelena ŽIVKOVIĆ RADOVANOVIĆ<sup>1</sup>, Biljana VUČKOVIĆ<sup>1</sup>,  
Jan HANSMAN<sup>2</sup> and Robert LAKATOŠ<sup>3</sup>**

1) *Univerzitet u Prištini sa privremenim sedištem u Kosovskoj Mitrovici, Prirodno-matematički fakultet, Lole Ribara 29, 38220 Kosovska Mitrovica, Srbija,*

*[ljiljana.gulan@pr.ac.rs](mailto:ljiljana.gulan@pr.ac.rs), [dusica.spasic@pr.ac.rs](mailto:dusica.spasic@pr.ac.rs),  
[jelena.zivkovic.radovanovic@pr.ac.rs](mailto:jelena.zivkovic.radovanovic@pr.ac.rs), [biljana.vuckovic@pr.ac.rs](mailto:biljana.vuckovic@pr.ac.rs)*

2) *Univerzitet u Novom Sadu, Prirodno-matematički fakultet, Trg Dositeja*

*Obradovića 4, 21000 Novi Sad, Srbija, [sofija@df.uns.ac.rs](mailto:sofija@df.uns.ac.rs),  
[jan.hansman@df.uns.ac.rs](mailto:jan.hansman@df.uns.ac.rs)*

3) *Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Trg Dositeja Obradovića 6,  
21000 Novi Sad, Srbija, [laki@uns.ac.rs](mailto:laki@uns.ac.rs)*

**ABSTRACT**

High radon concentrations were recorded in one house of the settlement Rudare near the ore complex "Trepča". Charcoal canisters exposed for 48 hours in July, November and December 2019 showed values of radon concentration:  $16273 \pm 162$ ,  $962 \pm 17$ ,  $144 \pm 7$  Bq/m<sup>3</sup>, respectively. Simultaneously with the charcoal canisters, the radon concentration was measured by the active method (RAD7 device) in November (in the 11x1h cycle), and the values decreased from  $2764 \pm 212$  to  $1449 \pm 104$  Bq/m<sup>3</sup>. The specific activities of the radionuclides <sup>226</sup>Ra, <sup>232</sup>Th, <sup>40</sup>K, <sup>238</sup>U and <sup>235</sup>U in the soil near the house were:  $65.3 \pm 1.5$ ,  $116.0 \pm 2.2$ ,  $890 \pm 40$ ,  $113 \pm 5$ ,  $9.0 \pm 0$ ,  $4$  Bq/kg, respectively, and are greater than those in the stone used for build the house. The value of gamma dose rates near the inner walls ranged from 0.33-0.35 μSv/h. These results were used to estimate the geogenic potential of radon based on a certain granulometric composition of the soil. The area of the "Trepča" complex in the geomorphological terms consists mainly of rocks of igneous origin, in the geotectonic and seismic terms it is characterized by a deep fault and is classified as a moderate seismic area. Therefore, further investigation should focus on a larger number of facilities in the mining area and the identification of regions with high radon concentrations that exceed the national reference level for radon of 300 Bq/m<sup>3</sup>.

## MERENJE EMANACIJE $^{222}\text{Rn}$ IZ PEPELA NASTALOG SAGOREVANJEM LIGNITA

**Predrag KUZMANOVIĆ<sup>1,2</sup>, Sofija FORKAPIĆ<sup>1</sup>, Jovana KNEŽEVIĆ<sup>1</sup>,  
Dušan MRĐA<sup>1</sup> i Jan HANSMAN<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), [sofija@df.uns.ac.rs](mailto:sofija@df.uns.ac.rs), [jovana.knezevic@df.uns.ac.rs](mailto:jovana.knezevic@df.uns.ac.rs), [mrddjad@df.uns.ac.rs](mailto:mrddjad@df.uns.ac.rs), [jan.hansman@df.uns.ac.rs](mailto:jan.hansman@df.uns.ac.rs)  
2) Akademija strukovnih studija Šabac, Odsek za medicinske i poslovno-tehnološke studije, Laboratorija za fiziku, Šabac, Srbija, [predrag.kuzmanovic@vmpts.edu.rs](mailto:predrag.kuzmanovic@vmpts.edu.rs)

### SADRŽAJ

*Pepeo je otpad koji nastaje pri sagorevanju lignita u termoelektranama, kao i individualnim ložištima. U svom sastavu može sadržati povećanu koncentraciju pojedinačnih radionuklida što mu može ograničavati recikliranje u građevinskoj industriji. Cilj ovog rada je određivanje sadržaja radionuklida:  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  i  $^{40}\text{K}$ , kao i koeficijenta emanacije radona iz uzorka pepela nastalog sagorevanjem uglja "sušena Kolubara" iz rudnika uglja "Vreoci" u individualnom ložištu. Metodom gama spektrometrije određene su koncentracije aktivnosti  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  i  $^{40}\text{K}$ , dok je emanacija  $^{222}\text{Rn}$  iz uzorka pepela merena u posebno konstruisanim komorama zapremina 1,5 l i 4,25 l aktivnim uređajem RAD7. Ispitivan je uticaj zapremina mernih komora na dobijene vrednosti koeficijenta emanacije radona.*

### 1. Uvod

U Srbiji se velika količina električne energije dobija iz rezervi uglja (lignita). Tom prilikom se od sagorevanja lignita nagomilavaju ogromne količine pepela, koji u sebi može sadržati povećan sadržaj pojedinih radioaktivnih elemenata. Njegovim odlaganjem na deponijama se u znatnoj meri može kontaminirati životna sredina.

Jedan od rudnika lignita u Srbiji je rudnik „Vreoci“ odakle se snabdevaju pojedine termoelektrane u Srbiji, koje na svojim deponijama akumuliraju ogromne količine pepela. Procenjuje se da u svetu nastane oko 750 miliona tona otpadnog pepela [1], dok se u Srbiji godišnje sagori oko 32 miliona tona lignita i proizvede preko šest miliona tona pepela, a vrlo se mala količina iskoristi u građevinarstvu i cementnoj industriji [2,3].

Korišćenje pepela nastalog sagorevanjem uglja u proizvodnji cementa, cigle, betona, nasipa, izgradnje puteva, sanacije rudnika, vađenja dragocenih metala, proizvodnje keramike i staklokeramike i dr. u svetu je poslednjih godina dobilo značajnu pažnju jer se njegovim recikliranjem postiže velika ekonomska i ekološka korist [1].

Prosečne vrednosti koncentracija aktivnosti  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  i  $^{40}\text{K}$  za građevinske materijale u svetu iznose  $50 \text{ Bq kg}^{-1}$ ,  $50 \text{ Bq kg}^{-1}$  i  $500 \text{ Bq kg}^{-1}$ , respektivno [4]. Pepeo obično sadrži povećan sadržaj  $^{226}\text{Ra}$  u odnosu na prosečnu vrednost u građevinskim materijalima [1,3], što umnogome može ograničiti njegovu upotrebu u građevinskoj industriji, imajući u vidu da se ljudi potencijalno mogu izložiti višim dozama zračenja koje potiču od gama zračenja i radona ( $^{222}\text{Rn}$ ).

Ranija istraživanja ukazuju da se radioaktivnost pepela proizvedenog u termoelektranama u Srbiji konstantno prati i meri od 1990. godine [3,5] i uglavnom se zasnivaju na određivanju koncentracija aktivnosti radioaktivnih elemenata. Nijedno od do sada sprovedenih istraživanja u Srbiji se ne bavi ispitivanjem emanacije radona iz

pepela, što je od izuzetne važnosti zbog upotrebe ovog materijala u građevinskoj industriji, te ovo svojstvo materijala ne sme biti zanemareno.

Cilj ovog rada je ispitivanje sadržaja radioaktivnih elemenata ( $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  i  $^{40}\text{K}$ ) u otpadnom pepelu od sagorevanja lignita nastalog u jednom individualnom ložištu u Srbiji, merenje emanacije radona iz uzorka aktivnom metodom u dve različite merne komore i određivanje vrednosti koeficijenta emanacije radona.

## 2. Materijal i metode

U ovom radu analiziran je uzorak pepela iz jednog individualnog ložišta uglja koji je poreklom iz rudnika „Vreoci“ u Srbiji. Uzorak je sušen 8h na 105 °C, nakon čega je prebačen u cilindričnu plastičnu posudu dimenzija 6,7 cm u prečniku i 6,2 cm visine i zapečaćen teflon trakom, kako bi se sprečila emanacija  $^{222}\text{Rn}$  iz posude. Ovako pripremljen uzorak je meren metodom gamaspektrometrije kako bi se odredile koncentracije aktivnosti  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  i  $^{40}\text{K}$ . Merenje je sprovedeno nakon mesec dana od zatvaranja posude sa uzorkom. Uzorak je analiziran IAEA TRS 295 metodom [6]. Vreme merenja uzorka iznosilo je oko 72000 s.

Koncentracija aktivnosti  $^{226}\text{Ra}$  određene su na osnovu gama linija njegovih potomaka, iz gama linije  $^{214}\text{Bi}$  na 609,3 keV i gama linije  $^{214}\text{Pb}$  na 351,9 keV, dok su za određivanje koncentracije aktivnosti  $^{232}\text{Th}$  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 [7,8].

Koncentracije aktivnosti radionuklida u uzorku su izmerene korišćenjem HPGe ORTEC GMX gama spektrometra, rezolucije 1,9 keV, relativne efikasnosti 32 %. Kalibracija detektora je izvršena u cilindričnoj geometriji uz upotrebu referentnog radioaktivnog materijala homogeno distribuiranog u silikonskoj smoli zapremine  $V=250\text{ cm}^3$ . Zaštita oko gama detektora je sačinjena od olova debljine 12 cm. Gama spektri su prikupljeni i analizirani korišćenjem Canberra Genie 2000 softvera [8]. Pomoću programa ANGLE izvršena je korekcija na efekat samoapsorpcije, koji nastaje usled matrica različitih gustina [9].

Koeficijent emanacije radona iz datog građevinskog materijala se može odrediti iz relacije (1) [10]:

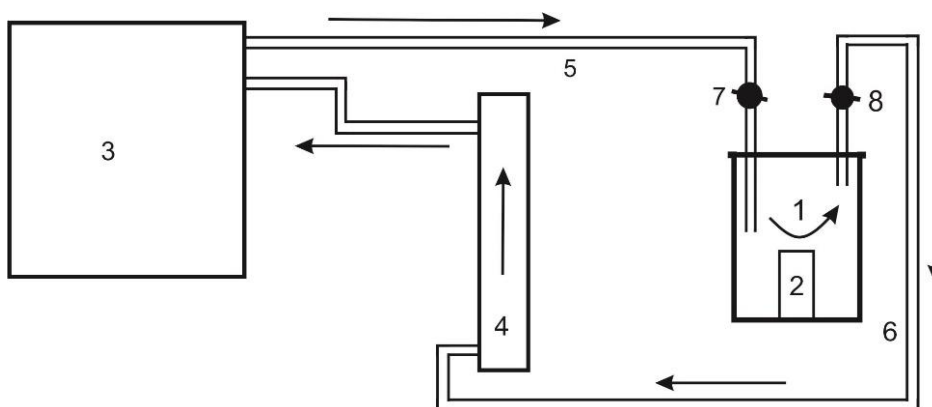
$$\varepsilon = \frac{C_{\text{eq}} \cdot V_{\text{eff}}}{C_{\text{Ra}} \cdot m} \quad (1)$$

gde je  $C_{\text{eq}}$  ravnotežna koncentracija aktivnosti radona u  $\text{Bq m}^{-3}$  nakon postignute radioaktivne ravnoteže;  $V_{\text{eff}}$  je efektivna zapremina vazduha u sistemu (koja računajući aktivnu zapreminu RAD7 uređaja i sve ostale sastavne delove mernog sistema iznosi 5,39 l za mernu komoru od 4,25 l i 2,65 l za mernu komoru od 1,5 l);  $C_{\text{Ra}}$  je koncentracija aktivnosti  $^{226}\text{Ra}$  u  $\text{Bq kg}^{-1}$  izmerena gama spektrometrijom (Tabela 1) i  $m$  je masa uzorka izražena u kg [10].

Vrednosti koeficijenta emanacije obično su u rasponu od 1 % do 30 % i zavise od više parametara kao što su vrsta građevinskog materijala, gustina, poroznost, veličina čestica, kao i od spoljašnjih uslova: temperature, atmosferskog pritiska, relativne vlažnosti i drugih fizičkih faktora [11].

Pre početka merenja, uzorak pepela je sušen 8h na temperaturi od 105 °C , a zatim upakovan u cilindričnu geometriju dimenzija 5 cm u prečniku i visine 10 cm pomoću mikro fiber filter papira, kao i u istraživanju [11]. Masa uzorka pepela je iznosila 73,4 g.

Određivanje koeficijenta emanacije radona ( $\varepsilon$ ) iz uzorka pepela izvršeno je aktivnim uređajem RAD7 pomoću aparature prikazane šematski na Slici 1 [12]. Uzorak pepela je smešten u posebnu komoru od debelog stakla sa metalnim zatvaračem i dve staklene slavine koje služe za puštanje radonskog gasa u merni sistem. Merenja su izvršena za dve zapremine merne komore: 2,5 l i 4,25 l kako bi se uporedili dobijeni rezultati. Sistem za merenje je zatvorenog tipa gde vazduh sa radonom zajedno kruži kroz sistem brzinom  $0,7 \text{ l min}^{-1}$  uz pomoć pumpe koja je sastavni deo uređaja RAD7. Kao apsorber vlage iz sistema korišćen je kalcijum sulfatom ( $\text{CaSO}_4$ ) (element 4 na Slici 1). Merenje akumulacije radona u sistemu iz uzorka pepela je vršeno 142 h u ciklusima po 1 h.



**Slika 1. Postavka korišćena za određivanje koeficijenta emanacije radona iz uzorka pepela. (1) staklena merne komora; (2) uzorak pepela; (3) aktivni uređaj RAD7; (4) apsorber vlage iz sistema; (5) i (6) plastične cevi nepropusne za radon; (7) i (8) slavine za puštanje radona iz komore u merni sistem [12].**

### 3. Rezultati i diskusija

Izmerene vrednosti koncentracija aktivnosti  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  i  $^{40}\text{K}$  u analiziranom uzorku pepela prikazane su u Tabeli 1. U poređenju sa prosečnim vrednostima za građevinske materijale u svetu date u ref. [4] izmerene vrednosti  $^{226}\text{Ra}$  i  $^{232}\text{Th}$  su 3,7 i 2,5 puta veće, dok je izmerena vrednost koncentracije aktivnosti  $^{40}\text{K}$  dva puta niža od prosečne vrednosti od  $500 \text{ Bq kg}^{-1}$ .

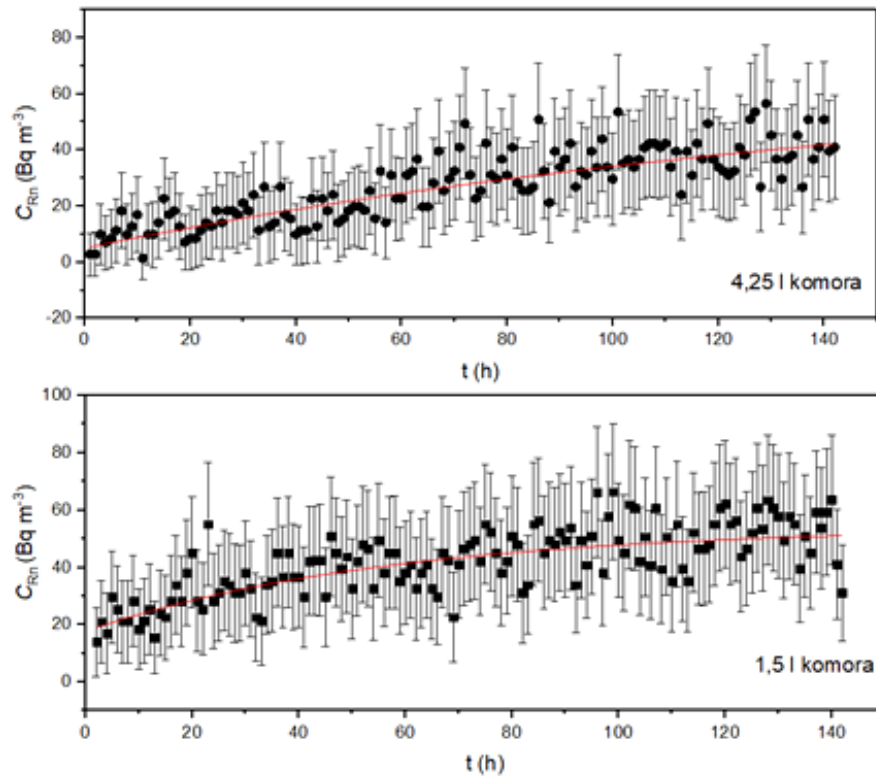
**Tabela 1. Izmerene vrednosti koncentracija aktivnosti radionuklida u uzorku pepela.**

Koncentracija aktivnosti ( $\text{Bq kg}^{-1}$ )		
$^{226}\text{Ra}$	$^{232}\text{Th}$	$^{40}\text{K}$
$183 \pm 4$	$124 \pm 4$	$242 \pm 11$

Izmerene vrednosti koncentracija aktivnosti  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  i  $^{40}\text{K}$  uporedive su sa ranije izmerenim vrednostima u pepelu poreklom iz termoelektrane “Nikola Tesla B” iz Obrenovca [3], kao i pepelom iz drugih zemalja u svetu [7,13].

Izmerene vrednosti akumuliranih koncentracija aktivnosti radona iz uzorka pepela u dve različite merne komore tokom 142h merenja aktivnim uređajem RAD 7 prikazane su na Slici 2. Fitovanjem dobijenih eksperimentalnih tačaka određene su ravnotežne

koncentracije aktivnosti radona ( $C_{eq}$ ) i na osnovu izmerene vrednosti koncentracije aktivnosti  $^{226}\text{Ra}$  od  $183 \pm 4 \text{ Bq kg}^{-1}$  određene su vrednosti koeficijenta emanacije radona (relacija (1)). Dobijene vrednosti koeficijenta emanacije za mernu komoru od 4,25 l i 1,5 l iznose  $0,96 \pm 0,16 \%$  i  $2,62 \pm 0,32 \%$ . Obe dobijene vrednosti su oko tipičnih vrednosti za građevinske materijale [11].



**Slika 2. Vrednosti koncentracija aktivnosti radona iz uzorka pepela u dve merne komore zapremine 1,5 l i 4,25 l izmerene aktivnim uređajem RAD7 tokom 142 h u ciklusima po 1h.**

Neusaglašenost između dobijenih vrednosti koeficijenta emanacije za dve različite merne komore je direktna posledica izraženih efekata curenja i povratne difuzije u obe merne komore, što se može videti iz vrednosti efektivnih konstanti raspada radona ( $\lambda_{\text{eff}(1,5)} = 14,9 \times 10^{-3} \text{ h}^{-1}$  i  $\lambda_{\text{eff}(4,25)} = 5,92 \times 10^{-3} \text{ h}^{-1}$ ). Prema ranijim istraživanjima autora [14,15], zaključeno je da ako je zapremina uzorka manja od 10 % ukupne efektivne zapremine mernog sistema, efekat povratne difuzije radona se može zanemariti. Ovo bi se moglo primeniti isključivo za uzorke sa višim sadržajem  $^{226}\text{Ra}$  gde je statistika odbroja takva da se postiže izuzetno jaka korelacija fitovane krive sa eksperimentalnim tačkama. Sa Slike 2 se može videti da je i statistika samih odbroja bila prilično razuređena oko fitovane krive akumulacije radona sa velikim mernim nesigurnostima, što potvrđuju i koeficijenti korelacije fitovane funkcije koji su u oba slučaja  $R^2 < 0,8$ . Loša statistika odbroja je direktna posledica strukture materijala i može se dovesti u vezu sa niskim vrednostima koeficijenta emanacije radona koji su dobijeni za obe merne komore. Niski koeficijenti emanacije u oba slučaja ukazuju da radon nema dovoljnu sposobnost da emanira iz pora materijala na površinu, odnosno okolni prostor, što je izuzetno važan podatak za potencijalnu primenu ovakvog materijala u građevinskoj industriji.

### 4. Zaključak

Rad je prikazao merenja sadržaja radionuklida u jednom uzorku pepela nastalog sagorevanjem lignita u Srbiji, koji bi se potencijalno mogao koristiti u građevinskoj industriji. Izmerene vrednosti  $^{226}\text{Ra}$  i  $^{232}\text{Th}$  su nekoliko puta više od prosečnih vrednosti za građevinske materijale u svetu [4]. Imajući u vidu da je koncentracija aktivnosti  $^{226}\text{Ra}$  u uzorku oko 4 puta veća od proseka za građevinske materijale, sprovedena su merenja emanacije radona iz uzorka. Merenja su vršena u dve merne komore, različitih zapremina. Dobijene vrednosti koeficijenta emanacije su niske, manje od 3 % i izrazito zavise od vrednosti zapremine merne komore. Uočene su varijacije koeficijenta emanacije radona koje su direktna posledica efekata curenja i povratne difuzije, ali i strukture i hemijskog sastava samog pepela koji su uticali na statistiku odbroja. Može se zaključiti da je pored minimiziranja efekata curenja i povratne difuzije u mernim sistemima potrebno obezbediti i zadovoljavajuću statistiku odbroja uz prihvatljive merne nesigurnosti, te se može reći da je izbor mernog sistema od izuzetne važnosti za pouzdanost dobijenih rezultata.

Imajući u vidu dobijene rezultate, kao i to da se pepeo obično koristi kao dodatak drugim sirovinama u proizvodnji građevinskih materijala, može se reći da na osnovu dobijene male vrednosti koeficijenta emanacije pepeo ne predstavlja naročitu opasnost i pretnju od prekomerne izloženosti radonu iz potencijalnog građevinskog materijala.

### 5. Zahvalnica

Istraživanja je finansiralo Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije (Ev. br. 451-03-9/2021-14/ 200125).

### 6. Literatura

- [1] J. Temuujin, E. Surenjav, C. Ruescher, & J.A.N. Vahlbruch . Processing fly ash with a radioactivity (Critical Review). *Chemosphere*. 216, 2019. 449-462.
- [2] N. Karličić M. Stanojević, D. Radić, M. Bajić. Svojstva pepela koji nastaje sagorevanjem lignita u domaćim TE značajna za primenu u industriji građevinskog materijala, *Procesna tehnika*, 1, 2014. 34-38, ISSN 2217-2319.
- [3] D. Kisić, S. Miletić, V. Radonjić, S. Radanović, J. Filipović, I. Gržetić. Prirodna radioaktivnost uglja i letećeg pepela u termoelektrani „Nikola Tesla B“, *Hemijska industrija*, 2013, 67(5), 2013. 729-738,
- [4] UNSCEAR, 1993. Sources, Effects and risks of ionizing radiation (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, United Nations New York. 1993.
- [5] D. Životić, I. Gržetić, H. Lorenz, V. Simić, U and Th in Some Brown Coals of Serbia and Montenegro and Their Environmental Impact. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 15, 2008. 155–161.
- [6] IAEA. International Atomic Energy Agency. Measurement of Radionuclides in Food and the Environment, Technical Reports Series No. 295., Vienna, Austria, 1989.
- [7] M. Gupta, A.K. Mahur, R. Varshney, R.G. Sonkawade, K.D. Verma, R. Prasad. Measurement of natural radioactivity and radon exhalation rate in fly ash samples from a thermal power plant and estimation of radiation doses. *Radiat. Meas.*, 50, 2013. 160–165.
- [8] P. Kuzmanović, N. Todorović, J. Nikolov, J. Hansman A. Vraničar, J. Knežević, B.



- Miljević. Assessment of radiation risk and radon exhalation rate for granite used in the construction industry. *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, 321(2), 2019. 565-577.
- [9] L. Moens, J. D. Donder, L. Xi-lei, F.D. Corte, A. D. Wispelaere, A. Simonits, J. Hoste. Calculation of the absolute peak efficiency of gamma-ray detectors for different counting geometries. *Nucl. Instr. Methods.* 187, 1981, 451–472.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] P. Kuzmanović, N. Todorović, D. Mrđa, S. Forkapić, L. Filipović Petrović, B. Miljević, J. Hansman, J. Knežević. The possibility of the phosphogypsum use in the production of brick: radiological and structural characterization. *J. Hazard Mater.* 413, 2021. 125343. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125343>
- [13] C. Papastefanou. Escaping radioactivity from coal-fired power plants (CPPs) due to coal burning and the associated hazards: a review. *J. Environ. Radioactiv.*, 101(3), 2010. 191–200.
- [14] C. Samuelsson. The Closed-Can Exhalation Method for Measuring Radon, *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.* 95(2), 1990. 167–169.
- [15] P. Tuccimei, M. Moroni, D. Norcia. Simultaneous determination of  $^{222}\text{Rn}$  and  $^{220}\text{Rn}$  exhalation rates from building materials used in Central Italy with accumulation chambers and a continuous solid state alpha detector: Influence of particle size, humidity and precursors concentration. *Appl. Radiat. Isot.*, 64(2), 2006. 254–263.

MEASUREMENTS OF  $^{222}\text{Rn}$  EMANATION FROM FLY ASH PRODUCED BY LIGNITE COMBUSTION

**Predrag KUZMANOVIĆ<sup>1,2</sup>, Sofija FORKAPIĆ<sup>1</sup>, Jovana KNEŽEVIĆ<sup>1</sup>,  
Dušan MRĐA<sup>1</sup> and Jan HANSMAN<sup>1</sup>**

*1) University of Novi Sad, Faculty of Science, Department of Physics, Novi Sad, Serbia,  
[predrag.kuzmanovic@df.uns.ac.rs](mailto:predrag.kuzmanovic@df.uns.ac.rs), [sofija@df.uns.ac.rs](mailto:sofija@df.uns.ac.rs), [jovana.knezevic@df.uns.ac.rs](mailto:jovana.knezevic@df.uns.ac.rs),  
[mrdjad@df.uns.ac.rs](mailto:mrdjad@df.uns.ac.rs), [jan.hansman@df.uns.ac.rs](mailto:jan.hansman@df.uns.ac.rs)*

*2) Academy of applied studies in Šabac, Department of medical and  
business-technological studies, Laboratory for Physics, Šabac, Serbia,  
[predrag.kuzmanovic@vmpts.edu.rs](mailto:predrag.kuzmanovic@vmpts.edu.rs)*

ABSTRACT

Fly ash is a waste generated during the combustion of lignite in thermal power plants and in individual combustion plants. It may contain an increased concentration of individual radionuclides, which may limit its recycling in the construction industry. The aim of this paper is to determine the content of radionuclides:  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ , and  $^{40}\text{K}$ , as well as the coefficient of radon emanation from an ash sample produced by burning coal "dried Kolubara" from the coal mine "Vreoci" in one individual furnace. The activity concentrations of  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ , and  $^{40}\text{K}$  were determined by gamma spectrometry, while the emanation of  $^{222}\text{Rn}$  from the ash sample was measured in specially designed chambers with a volume of 1.5 l and 4.25 l with the active device RAD7. The influence of the measuring chamber volume on the obtained values of radon emanation coefficient was also investigated.

## НАЦИОНАЛНИ АКЦИОНИ ПЛАН ЗА РАДОН У РЕГУЛАТИВНОМ ОКВИРУ РЕПУБЛИКЕ СРБИЈЕ

Маја ЕРЕМИЋ САВКОВИЋ<sup>1</sup> и Владимир УДОВИЧИЋ<sup>2</sup>

- 1) Директорат за радијациону и нуклеарну сигурност и безбедност Србије, Београд, Србија, [eremic.savkovic@srbatom.gov.rs](mailto:eremic.savkovic@srbatom.gov.rs)
- 2) Институт за физику у Београду, Институт од националног значаја за Републику Србију, Београд, Србија, [udovicic@ipb.ac.rs](mailto:udovicic@ipb.ac.rs)

### САДРЖАЈ

Доношењем Закона о радијационој и нуклеарној сигурности и безбедности 2019. године, а у складу са захтевима Директиве Савета Европске уније 2013/59/Euroatom од 5. децембра 2013. којом се утврђују основни сигурносни стандарди за заштиту од опасности које потичу од излагања јонизујућем зрачењу, стекли су се услови да се проблематици радона приђе на један систематски и свеобухватан начин. Ради обезбеђења услова за спровођење политике у области радијационе сигурности у Републици Србији, законом је предвиђено доношење Стратегије управљања ситуацијама постојећег излагања у којој ће акциони план за радон бити њен саставни део. Израда акционог плана за радон такође била је једна од активности националног пројекта под називом SRB/9/006 - *Upgrading National Capabilities and Infrastructure for a Systematic Approach to Control Public Exposure to Radon*“ који је Директорат за радијациону и нуклеарну сигурност и безбедност Србије реализовао кроз техничку сарадњу са Међународном агенцијом за атомску енергију. У овом раду биће представљени елементи нацрта овог акционог плана који се односе на контролу и смањење концентрације радона у Републици Србији првенствено у објектима за потребе овог пројекта.

### 1. Увод

#### 1.1. Основ за доношење акционог плана

Директорат за радијациону и нуклеарну сигурност и безбедност Србије (у даљем тексту: Директорат) је кроз техничку сарадњу са Међународном агенцијом за атомску енергију (у даљем тексту: МААЕ), у периоду 2018.-2019. година реализовао национални пројекат под називом „Унапређење националних капацитета и инфраструктуре у систематском приступу контроли изложености радону“ (*Upgrading National Capabilities and Infrastructure for the Systematic Approach to the Control of Public Exposure to Radon*“). Највећи број планираних активности у оквиру овог пројекта односио се на спровођење мерења концентрације радона у јавним објектима, првенствено школама и предшколским установама у Републици Србији. Једна од пројектних активности била је и израда акционог плана за контролу радона у затвореном простору у становима, јавним објектима и радним местима у циљу успостављања система заштите становништва и радника од штетног дејства овог радиоактивног гаса.

Доношењем Закона о радијационој и нуклеарној сигурности и безбедности 2019. године, дата је основа за доношење стратешких докумената који дугорочно одређују и усмеравају правце деловања у области радијационе и нуклеарне сигурности и безбедности у складу са међународним стандардима и принципима у овој области као и преузетим међународним обавезама. Садржај стратегија

прописан је чланом 6. закона и садржи: 1) жељено стање чијем достизању доприноси постизање општих и посебних циљева стратегије; 2) анализу и оцену постојећег стања; 3) опште и посебне циљеве и јасне временске оквире за њихово остваривање; 4) мере за постизање општих и посебних циљева; 5) кључне показатеље учинка; 6) институционални оквир, план за праћење спровођења и институције одговорне за праћење спровођења стратегије; 7) акционе планове за спровођење стратегија. Стратегија се доноси за период од седам година. Саставни део стратегије је акциони план за њихово спровођење. Акциони план садржи мере за постизање општих и посебних циљева које дефинише стратегија. Законом о радијационој и нуклеарној сигурности и безбедности предвиђена је израда четири стратешка документа у области радијационе и нуклеарне сигурности и безбедности. У оквиру Стратегије управљања ситуацијама постојећег излагања, једна од препознатих ситуација постојећег излагања односи се на радон у затвореном простору, становима и радним местима.

Израда нацрта акционог плана за радон заснована је на свим елементима прописаним како домаћим законодавним оквиром тако и међународним стандардима и принципима у области која регулише проблеме везане за радон. Израда нацрта суштински је била заснована на анализи и сазнањима везаним за спроведена мерења концентрације радона у нашој земљи у предходном периоду и постојећим капацитетима укљученим у систем смањења штетног утицаја овог радиоактивног гаса на становништво и раднике, а у складу са захтевима стандарда у овој области.

### **1.2. Анализа и евалуација резултата изложености радону у Републици Србији**

Концентрација радона у становима и јавним објектима (школама и предшколским установама) мери се у оквиру систематског испитивања радиоактивности у животној средини на територији наше земље, а у складу са Правилником о утврђивању програма систематског испитивања радиоактивности у животној средини (Сл. гл. РС 100/10 од 28.12. 2010) од 2010. године. Мерења концентрације радона врше се једном годишње у 45 станова и 24 јавних објеката (школа и прешколских установа) на 7 локација у Републици Србији (Београд, Нови Сад, Суботица, Ниш, Зајечар, Ужице и Врање). Резултати ових мерења део су годишњег извештаја о спроведеном систематском испитивању радиоактивности у животној средини на територији наше земље и доступни су на сајту Директората <http://www.srbatom.gov.rs/srbatommm/monitoring-radioaktivnosti/>.

У периоду 2015.-2016. година кроз национални пројекат (SRB/9/003) у оквиру техничке сарадње са МААЕ, спроведена су мерења концентрације радона у око 5000 кућа и станова на територији наше земље. Мерења су спроведена у сврху мапирања односно формирања радонске мапе и потенцијалног проналажање области са повишеним концентрацијама радона. Анализом измерених концентрација радона, а у складу са постојећим регулаторним оквиром [2], 97 % измерених вредности било је испод  $400 \text{ Bq/m}^3$  што предствља интервентни ниво за хронично излагање радону у становима за постојеће објекте. Просечна вредност концентрације радона на основу ових мерења износи  $105 \text{ Bq/m}^3$ . Измерена концентрација радона преко  $400 \text{ Bq/m}^3$  је у 3 % измерених вредности, док је у 14 објеката односно 0.3 % измерених вредности концентрација радона у затвореном простору била изнад  $1000 \text{ Bq/m}^3$  [4].

У периоду 2018-2019. година кроз национални пројекат SRB/9/006 - Upgrading National Capabilities and Infrastructure for a Systematic Approach to Control Public

Exposure to Radon“ Директората и МААЕ, спроведена су мерења концентрације радона у јавним објектима, школама и предшколским установама. Раподела измерених концентрација радона анализирана је у складу са важећом регулативом [2] и износила је:

- 96 % измерених вредности било је испод  $400 \text{ Bq/m}^3$
- 3,8 % измерених вредности прелазила је вредност од  $400 \text{ Bq/m}^3$
- 0,2 % измерених вредности прелазила је вредност  $1000 \text{ Bq/m}^3$ .

Директорат је током 2016. и 2017. године спровео две јавне набавке које су се односиле на мерење концентрације радона у води за пиће. Мерења су вршена на 40 локација у 24 града на територији Републике Србије. Узорковање је вршено са јавних чесми. У табели 1 представљени су резултати мерења и процена ефективне дозе за становништво.

**Табела 1. Мерење концентрације радона у води за пиће на територији Републике Србије.**

Локација	Концентрација радона (Bq/l)	Просечна ефективна доза (ингестија) mSv/year
Београд 4	$25,8 \pm 2,6$	$0,19 \pm 0,02$
Враће 2	$21 \pm 4$	$0,15 \pm 0,03$
Зајечар	$25,2 \pm 2,2$	$0,18 \pm 0,02$
Јагодина	$15,2 \pm 2,7$	$0,11 \pm 0,02$
Крушевац 1	$70 \pm 7$	$0,51 \pm 0,05$
Крушевац 2	$15,4 \pm 1,9$	$0,11 \pm 0,02$
Лесковац 2	$11 \pm 5$	$0,08 \pm 0,02$
Ниш 2	$12,0 \pm 2,2$	$0,09 \pm 0,02$
Нови Сад 1	$22,2 \pm 1,8$	$0,16 \pm 0,02$
Нови Сад 2	$27,0 \pm 1,0$	$0,20 \pm 0,01$
Нишка Бања 1	$622 \pm 12$	$4,54 \pm 0,09$

На основу приказаних мерења у табели 1. може се закључити да на свим локацијама осим локације Нишка Бања, радон не представља опасност по становништво са аспекта заштите од јонизујућег зрачења. Према Правилнику 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 36/18 од 10.05.2018) параметарска вредност за радон у води износи  $100 \text{ Bq/l}$ . Конзумирањем воде на локацији Нишка Бања просечна одрасла особа могла би да прими дозу од  $4,5 \text{ mSv}$  што прелази препоруку о годишњем излагању становништва од  $1 \text{ mSv}$ .

У оквиру процене излагања радника у индустријским објектима у којима се ради са НОРМ материјалима, између осталог, вршена су и мерења концентрације радона у Институту за лечење и рехабилитацију „Нишка Бања“, установи која располаже са шест објеката. Подручје на коме је изграђен комплекс је стеновито. У његовом саставу доминира бигар-седиментна шупљикава стена. Ова стена садржи Ra-226 у високим концентрацијама, стога је радон присутан у овом подручју, како у земљишту тако и у води. Мерења су вршена два пута. Прва

мерења обављена су са канистрима са активним угљем, поновљена мерења вршена су са пасивним детекторима за мерење радона CR-39. Резултати мерења концентрације радона на појединим радним местима указују да би раднике на појединим радним местима у институту требало пратити у складу са захтевима који се односе на изложене раднике [2].

### **2. Акциони план за радон**

Нацрт акционог плана за радон садржи неколико тематских целина. Свака дефинише циљеве као и активности које прате реализацију истих. То су: управљање акционим планом, израда и имплементација комуникацијског плана, јачање регулаторног оквира, успостављање националног програма мерења радона, изградња система за смањење радијационог ризика од излагања становништва и радника радону и истраживање и развој. Сви ти циљеви и активности треба да допринесу основном стратешком дугорочном циљу, а то је: смањење ефективне дозе, односно мере радиолошке оптерећености становништва Републике Србије која је последица удисања радона, уношења истог ингестијом преко воде за пиће која је оптерећена радоном, применом одговарајућих превентивних и ремедијационих мера. У наставку рада биће детаљније описана свака тематска целина.

#### **2.1. Управљање Акционим планом за радон**

Као у случају било ког акционог плана, потребно је реализовати низ активности које захтевају одговорност и координацију различитих тела, државних и јавних, те других учесника које се утврђују овим акционим планом. У том смислу, према процени и потребама извршења појединих активности, носиоци и учесници могу укључити и друге чиниоце у сврху реализације активности дефинисаних овим акционим планом. Процена степена имплементације акционог плана прати се кроз мониторинг, евалуацију и извештавање о његовом спровођењу. У циљу неопходне координације радом одговорних и заинтересованих институција и надлежних државних органа, органа управе, јединица локалне самоуправе и невладиних организација, акционим планом планирано је формирање радне групе, коју ће чинити представници наведених институција. У циљу ефикаснијег рада, предвиђено је да Директорат има улогу координатора у раду радне групе. Радна група свој рад вршиће у складу са пословником о раду, којим би се дефинисале следеће надлежности:

- а) координација у раду на имплементацији акционог плана;
- б) вршење редовног мониторинга и евалуације реализованих планираних активности и мера;
- ц) извештавање Директората о напретку у реализацији акционог плана;
- е) на крају периода за који је донесен акциони план давање препоруке за даље активности на плану заштите од радона;
- ф) остале релевантне активности.

#### **2.2. Израда и имплементација комуникацијског плана**

С обзиром на недовољну видљивост проблематике радона у медијима и јавности, посебну пажњу треба посветити подизању свести код становништва о штетном утицају радона на здравље људи. Неки од елемената комуникацијског плана су: успостављање централне веб странице, као и друштвених мрежа које садрже информације о радону, водиче за мерење радона за становништво и послодавце као и спискове овлашћених правних лица одговорних за мерење и санацију

објеката са повишеним концентрацијама радона, обележавање Европског дана радона, организација радионица са представницима заинтересованих страна.

### **2.3. Јачање регулаторног оквира**

Сваки од дефинисаних елемената акционог плана, садржи елементе чија имплементација зависи од регулаторног оквира. Акционим планом планира се доношење референтног нивоа концентрације радона у затвореним боравишним и радним срединама као и дефинисање критеријума за утврђивање радонских приоритетних области, спецификација радних места која захтевају мерења концентрације радона ради процене нивоа изложености јонизујућем зрачењу у складу са законом, препорука које се односе на ремедијацију, као и превенцију а у складу са правилима изградње („Building codes“).

### **2.4. Успостављање националног програма мерења радона**

У периоду реализације акционог плана, нацртом се планира и развој националног програм мерења концентрације радона у Републици Србији. Програм би подразумевао:

- Припрему протокола и методологије за мерење концентрације радона у боравишном простору кућама и становима и на радним местима препознатим да су простори у којима може доћи до излагања радника радону;
- Припрема протокола и методологије за мерење радона у земљишту и дефинисање радон потенцијалних области;
- Припрема протокола за мерење радона у води која се користи за људску потрошњу и
- Успостављање националне радон базе.

Важан сегмент ових програма обухватио би и успостављање система контроле квалитета мерења, а све са сврхом верификације свих резултата мерења који би били садржани у националној радон бази. Национална радон база, како нацрт планира била би у надлежности Директората.

### **2.5. Изградња система за смањење радијационог ризика од излагања становништва и радника радону**

Значајан део акционог плана представља развој и примена корективних и превентивних мера као техничких решења која служе за смањење концентрације радона у затвореном простору. За успешну реализацију овог циља неопходно је у акциони план пре свега укључити надлежно министарство, експерте и остала професионална удружења у области грађевине. Акциони план предвиђа организацију обука за професионалце у грађевинском сектору као и израду упутстава и водича за примену техничких решења која служе за смањење концентрације радона у затвореном простору. У даљем развоју овог програма, неопходно је успоставити систем контроле квалитета обављених послова кроз процес овлашћења и давања лиценци фирмама које би радиле на овом програму санације. Важан сегмент представља и успостављање механизма за субвенционисање санације постојећих зграда и стамбених објеката, као и финансијских средстава за санацију школа, вртића и јавних зграда са повишеним нивоом радона. С обзиром на мултидисциплинарност ове области потребно је развијати сарадњу и ове активности повезати са националним програмима о енергетској ефикасности, побољшању квалитета ваздуха, заштити од изложености дуванском диму.

### 2.6. Истраживање и развој

Циљаним истраживањима потребно је повећавати домаћа специфична знања и вештине. За постизање овог циља потребно је развити мерне технике које би омогућиле да се кратким мерењем радона, у трајању до месец дана, а узимајући у обзир сезонске варијације и друге факторе које утичу на ниво радона, довољно поуздано процени средња годишња концентрација радона у затвореном простору. У циљу боље процене ризика од радона неопходно је проучавати варијације концентрација радона од године до године, зависно од климатских промена (метеоролошких параметара), у различитим типовима зграда и у различитим климатским подручјима у Србији. Осим тога потребно је:

- утврдити повезаност геолошке подлоге, порозности површинског слоја терена са измереним концентрацијама радона;
- утврдити утицај грађевинског материјала (мерењем есхалације радона из грађевинских материјала који се најчешће користе у грађевинској индустрији у Србији) на ниво радона у згради;
- анализирати методе за брзу дијагностику повишених нивоа радона у затвореним просторима и спровести процедуре неопходне за контролу квалитета добијених резултата;
- испитати расподелу концентрације активности радона унутар зграда по спратности, посебно у условима постојања централног вентилационог система и карактеристике зграда које се могу повезати са високим нивоом радона у њима.

### 3. Закључак

Нацрт акционог плана за радон, настао као део пројектне активности Директората са МААЕ, представља добру основу за даљи рад на важном стратешком документу Стратегији управљања ситуацијама постојећег излагања у којој ће акциони план за радон бити њен саставни део. Осим испланираних активности, важан део акционог плана чине временски оквири за реализацију планираних активности, као и јасно дефинисане институције, заинтересоване стране укључене у спровођење свих елемената акционог плана.

Нацрт акционог плана за радон у складу је са захтевима европског законодавства и стандардима МААЕ и представља низ корака ка унапређењу система контроле радона, процене његовог штетног утицаја на здравље становништва, процене могуће изложености радника, мерама за његово смањење и елементима превенције његовог утицаја у новоизграђеним објектима. Спровођењем акционог плана у целини циљ је да се успостави систем у Републици Србији који би повезао све сегменте утицаја овог радиоактивног гаса на раднике и становништво у целини са аспекта заштите од јонизујућег зрачења.

### 4. Литература

- [1] Правилник о границама излагања јонизујућим зрачењима и мерењима ради процене нивоа излагања јонизујућим зрачењима („Службени гласник РС“ бр. 86/11 и 50/18).
- [2] Извештај о процени излагања радника у индустријским објектима у којима се ради са НОРМ материјалима у следећа три објекта-институције: Рудник мрког угља „СОКО“, Нишка бања и Железара Смедерево
- [3] Игор Челиковић, Весна Арсић, Софија Форкапић, Владимир Удовичић, Драгослав Никезић. Преглед истраживања радона у претходних 29



Симпозијума Друштва за заштиту од зрачења Србије и Црне Горе. *Зборник радова XXX Симпозијум ДЗЗСЦГ*, Дивчибаре 2- 4. октобар 2019, 177-191.

- [4] Maja Eremić Savković, Vladimir Udovičić, Dimitrije Maletić, Gordana Pantelić, Predrag Ujić, Igor Čeliković, Sofija Forkapić, Vladimir Marković, Vesna Arsić, Jovana Ilić, Branko Markoski. Results of the first national indoor radon survey performed in Serbia. *J. Radiol. Prot.* 40, 2020, N22.

**NATIONAL RADON ACTION PLAN IN THE REGULATORY FRAMEWORK  
OF THE REPUBLIC OF SERBIA**

**Maja EREMIĆ SAVKOVIĆ<sup>1</sup> and Vladimir UDOVIĆIĆ<sup>2</sup>**

1) *Serbian Radiation and Nuclear Safety and Security Directorate, Belgrade, Serbia,*

[eremic.savkovic@srbatom.gov.rs](mailto:eremic.savkovic@srbatom.gov.rs)

2) *Institute of Physics Belgrade, University of Belgrade, Belgrade, Serbia,*

[udovicic@ipb.ac.rs](mailto:udovicic@ipb.ac.rs)

**ABSTRACT**

The adoption of the new Law on Radiation and Nuclear Safety and Security in 2019, which is harmonized with the European Union Council Directive 2013/59/ Euratom of 5 December 2013, which prescribes safety standards for protection against the harmful effects of ionizing radiation exposure, necessary and sufficient conditions to approach the radon issues in a systematic and comprehensive way. In order to provide conditions for the implementation of the policy in the field of radiation safety and security in the Republic of Serbia, the adoption of the Strategy for managing the situations of the existing exposure is envisaged, in which the National Action Plan for Radon will be an integral part. Within the national project of the Directorate at the International Atomic Energy Agency SRB/9/006 - Upgrading National Capabilities and Infrastructure for a Systematic Approach to Control Public Exposure to Radon, a draft national strategy and action plan for control and reduction of radon concentration in facilities was prepared for the purposes of this project. This paper will present this draft in more detail.

---

**TRACERADON - МЕТРОЛОГИЈА РАДОНА У ОБЛАСТИ ИЗУЧАВАЊА  
КЛИМАТСКИХ ПРОМЕНА И У ЗАШТИТИ ОД ЗРАЧЕЊА У ЖИВОТНОЈ  
СРЕДИНИ**

**Гордана ПАНТЕЛИЋ, Игор ЧЕЛИКОВИЋ, Ивана ВУКАНАЦ,  
Јелена КРНЕТА НИКОЛИЋ и Милош ЖИВАНОВИЋ**

*Институт за нуклеарне науке „Винча“, Институт од националног значаја за  
Републику Србију, Универзитет у Београду, Београд, Србија,  
[pantelic@vin.bg.ac.rs](mailto:pantelic@vin.bg.ac.rs), [icelikovic@vin.bg.ac.rs](mailto:icelikovic@vin.bg.ac.rs), [vukanac@vin.bg.ac.rs](mailto:vukanac@vin.bg.ac.rs),  
[jnikolic@vin.bg.ac.rs](mailto:jnikolic@vin.bg.ac.rs), [milosz@vin.bg.ac.rs](mailto:milosz@vin.bg.ac.rs)*

**САДРЖАЈ**

*Пројекат TraceRADON у оквиру програма EMPIR је фокусиран на метрологију радона у области изучавања климатских промена и у заштити од зрачења у животној средини. Циљеви пројекта TraceRADON су: повећање тачности мерења у заштити од зрачења и оних која се користе за моделовање код климатских промена, следљивост до СИ јединица за ексхалације радона из земљишта, његову концентрацију у атмосфери и валидацију модела за његову дисперзију; развој следљивих метода за мерење ниских концентрација радона у спољашњој средини у опсегу од  $1 \text{ Bq/m}^3$  до  $100 \text{ Bq/m}^3$  са мерном несигурношћу реда 10 % ( $k=1$ ) које се користе у мониторингу климатских промена и у заштити од зрачења; развој следљивих мерења флукса радона на терену, на основу развоја референтног система за ексхалацију радона „exhalation bed“ и стандард трансфера; хармонизација постојећих инструмената/метода за мерење флукса радона користећи интеркомпарацију; валидација постојећих модела и прикупљених података флукса радона, користећи следљива мерења флукса радона и концентрације радона подржане дозиметријским и спектрометријским подацима из мрежа за рану најаву нуклеарне опасности у Европи. У овом раду ће бити дат преглед циљева и досадашњих резултата пројекта.*

**1. Увод**

Пројекат TraceRADON у оквиру програма EMPIR (European Metrology Programme for Innovation and Research - Европски метролошки програм за иновације и истраживање) окупља осамнаест европских партнера из националних метролошких института и истраживачких института, укључујући Институт за нуклеарне науке "Винча" [1]. Пројекат је фокусиран на метрологију радона при посматрању климатских промена и у заштити од зрачења у животној средини и допринеће стварању координисане метролошке инфраструктуре за мерење концентрације радона у Европи.

Специфични циљеви пројекта су:

- развијање нове следљиве методе мерења ниских концентрација радона на отвореном (outdoor) које се користе у мониторингу климатских промена и мрежама заштите од зрачења;
- развијање следљивих мерења флукса радона на терену, на основу развоја референтног система за ексхалацију радона и хармонизација постојећих инструмената/метода за мерење флукса радона користећи интеркомпарацију, развијање првог стандардизованог протокола за примену радон трасер метода (RTM- radon Tracer Method) како би се омогућило праћење ефекта стаклене

- баште на мониторинг станицама за праћења климатских промена и коришћење података о флуксу радона за идентификацију области са повишеним концентрацијама радона (RPA - Radon Priority Areas);
- валидација постојећих модела и прикупљање података флукса радона користећи следљива мерења концентрације радона и радонског флукса подржана дозиметријским и спектрометријским подацима из мрежа за рану најаву нуклеарне опасности у Европи и побољшати мапе флукса радона које ће се користити за примену радон трасер метода (RTM), за моделе атмосферске дисперзије и у заштити од зрачења;
  - обезбедити динамичке мапе радона и флукса радона за истраживање климатских промена и заштиту од зрачења у складу са ЕУРОАТОМ директивом европског савета [2], укључујучи њихово коришћење за идентификацију области са повишеним концентрацијама радона (RPA) и повећаним гама зрачењем изазваног спирањем потомака радона из атмосфере услед падавина;
  - оптимизација преузимања технологије и мерне инфраструктуре развијене у пројекту од стране националних метролошких лабораторија и лабораторија за еталонирање, организација за развој стандарда (IEC, ISO) и корисника који прате климатске промене и ефекте стаклене баште, као и од корисника у европским мрежама за рану најаву нуклеарне опасности.
- Ови циљеви ће бити остварени кроз четири радна пакета.

## 2. Радни пакети

### 2.1. Концентрација радона на отвореном (outdoor)

Циљ првог радног пакета је развој нових следљивих метода за мерења ниских концентрација радона на отвореном (outdoor) у опсегу од  $1 \text{ Bq/m}^3$  до  $100 \text{ Bq/m}^3$ , са мерном несигурношћу реда 10 % ( $k=1$ ) које ће се користити у мониторингу климатских промена и мрежама заштите од зрачења. Ове методе ће укључити два нова следљива еманациона извора  $^{222}\text{Rn}$  концентрације испод  $100 \text{ Bq/m}^3$ , инструмент за следљиви трансфер калибрације са новим изворима и одговарајућу процедуру за калибрацију која ће омогућити следљивост мерења концентрације атмосферског радона на терену.

Овај пакет ће проширити мерне могућности остварене у пројекту МетроРАДОН [3], где су развијене нове процедуре за следљиву калибрацију инструмената за мерење радона ( $^{222}\text{Rn}$ ) у опсегу концентрација радона од  $100 \text{ Bq/m}^3$  до  $300 \text{ Bq/m}^3$ , са мерном несигурношћу  $\leq 5 \%$  ( $k=1$ ).

### 2.2 Мерење флукса радона

Циљ другог радног пакета је побољшање тачности мерења флукса радона за идентификацију области са повишеним концентрацијама радона (RPA) и праћење ефекта стаклене баште на мониторинг станицама за праћења климатских промена применом радон трасер метода (RTM).

### 2.3 Модели флукса радона

Циљ трећег радног пакета је валидовње постојећих модела дистрибуције радонског флукса и прикупљених података користећи следљива мерења концентрације радона и радонског флукса подржана дозиметријским и спектрометријским подацима из мрежа за рану најаву нуклеарне опасности у Европи, као и побољшање мапе флукса радона која ће се користити за примену радон трасер метода (RTM), за моделе атмосферске дисперзије и у заштити од зрачења.

## 2.4 Мапе радона и радонског флукса

Циљ четвртог радног пакета је обезбеђивање динамичке мапе концентрације радона на отвореном и флукса радона за истраживање климатских промена и заштиту од зрачења. Динамичке мапе концентрације радона на отвореном и мапе радонског флукса ће бити обезбеђене путем Веб портала за праћење радиоактивности у животној средини [4].

## 3. Досадашњи резултати пројекта

Постигнути резултати пројекта се могу пратити на интернет страници <http://traceradon-empir.eu/>. Најновији резултати се објављују у “Newsletter”, а први број је изашао у фебруару 2021. године [5].

Прву научну радионицу о метрологији радона која се користи при посматрању климатских промена и у заштити од зрачења у животној средини организовао је ПТБ (Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Немачка) 20.10.2020. године и могла се пратити онлајн. Све презентације са овог скупа се могу наћи на интернет страници пројекта [6].

У склопу радионице, је дат преглед литературе [7] у којој се радонски флукс, геогени радонски потенцијал и радон у спољашњој средини користе за процену концентрације радона у затвореним просторијама, идентификацију радонских приоритетних области и формирање динамичког радонског хазард индекса. До тог тренутка је прегледано и анализирано 40ак референци, док је тренутно у фази писање прегледног рада са преко 100 референци везаних за радонски флукс и радон у спољашњој средини. У раду ће бити сумирани параметри који утичу на ексхалацију радона из земљишта, односно радонски флукс, понашање радона у спољашњој средини и њихов утицај на концентрацију радона у затвореним срединама.

## 4. Закључак

TraceRADON пројекат ће умногоме допринети успостављању координисане метролошке инфраструктуре у области мерења радона у Европи. Резултати који се очекују су следећи:

- развој нове следљиве методе за мерења ниских концентрација радона на отвореном;
- побољшање тачности мерења флукса радона за идентификацију области са повишеним концентрацијама радона (RPA) и праћење ефекта стаклене баште;
- побољшање мапе флукса радона које ће се користити за примену радон трасер метода (RTM), за моделе атмосферске дисперзије и у заштити од зрачења;
- стварање динамичке мапе концентрације радона на отвореном и флукса радона за истраживање климатских промена и заштиту од зрачења.

У циљу упознавања научне заједнице, регулаторних тела и других заинтересованих страна са радом на пројекту TraceRADON, актуелни резултати пројекта и статус започетих и планираних активности објављују се на сваких шест месеци и доступни су на интернет страници <http://traceradon-empir.eu/>.

### 5. Захвалница

Овај рад је финансијски подржан од старне European Metrology Programme for Innovation and Research (EMPIR), JRP-Contract 19ENV01 TraceRADON ([www.euramet.org](http://www.euramet.org)) и од стране Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије.

### 6. Литература

- [1] <http://traceradon-empir.eu/>
- [2] DIRECTIVES Council Directive 2013/59/EURATOM, Official Journal of the European Union, L 13/1, 17.01.2014, <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2014:013:0001:0073:EN:PDF>
- [3] Гордана ПАНТЕЛИЋ, Милош ЖИВАНОВИЋ, Игор ЧЕЛИКОВИЋ, Јелена КРНЕТА НИКОЛИЋ и Ивана ВУКАНАЦ. METRORADON- ПРОЈЕКАТ ЗА УНАПРЕЂЕЊЕ МЕРЕЊА РАДОНА У ЕВРОПИ, Зборник радова XXX симпозијума Друштва за заштиту од зрачења Србије и Црне Горе, 668 страна. Уредници: Михајло Јовић и Гордана Пантелић, 2-4. октобар 2019. Дивчибаре; ДЗЗСЦГ; 192-199, ISBN 978-86-7306-154-2  
[https://drive.google.com/file/d/1Qxn\\_r3DZRakQM06rzw4b3Ln1xMj18Z3H/view](https://drive.google.com/file/d/1Qxn_r3DZRakQM06rzw4b3Ln1xMj18Z3H/view)
- [4] Radioactive Environmental Monitoring web portal, REMon, Joint Research Centre of the European Commission and the ICOS Carbon portal  
<https://remon.jrc.ec.europa.eu>
- [5] [http://traceradon-empir.eu/wp-content/uploads/2021/01/traceRadon\\_Newsletter\\_2021-1.pdf](http://traceradon-empir.eu/wp-content/uploads/2021/01/traceRadon_Newsletter_2021-1.pdf)
- [6] [http://traceradon-empir.eu/?page\\_id=1192](http://traceradon-empir.eu/?page_id=1192)
- [7] Gordana Pantelić, Ivana Vukanac, Jelena Krneta Nikolić, Maciej Norenberg, Zuzanna Baranowska, Igor Čeliković, Miloš Živanović. Literature survey on the use of radon flux data for estimating indoor and outdoor radon activity concentrations, Scientific Workshop 20 October 2020 EMPIR 19ENV01 traceRadon,  
[http://traceradon-empir.eu/wp-content/uploads/2020/11/WP4\\_Presentation\\_Literature-survey.pdf](http://traceradon-empir.eu/wp-content/uploads/2020/11/WP4_Presentation_Literature-survey.pdf)

---

**TRACERADON- RADON METROLOGY FOR USE IN CLIMATE CHANGE  
OBSERVATION AND RADIATION PROTECTION AT THE  
ENVIRONMENTAL LEVEL**

**Gordana PANTELIĆ, Igor ČELIKOVIĆ, Ivana VUKANAC,  
Jelena KRNETA NIKOLIĆ and Miloš ŽIVANOVIĆ**

*Institute of Nuclear Sciences „Vinča“, Institute of national importance for the Republic  
of Serbia, University of Belgrade, Belgrade, Serbia, [pantelic@vin.bg.ac.rs](mailto:pantelic@vin.bg.ac.rs),  
[icelikovic@vin.bg.ac.rs](mailto:icelikovic@vin.bg.ac.rs), [yukanac@vin.bg.ac.rs](mailto:yukanac@vin.bg.ac.rs), [jnikolic@vin.bg.ac.rs](mailto:jnikolic@vin.bg.ac.rs),  
[milosz@vin.bg.ac.rs](mailto:milosz@vin.bg.ac.rs)*

**ABSTRACT**

TraceRADON, a three year project based in the EMPIR program, is focused on radon metrology for use in climate change observation and radiation protection at the environmental level. The aims of project TraceRADON are: to increase the accuracy of both radiation protection measurements and those used for GHG modeling, traceability to SI units for radon release rates from soil, its concentration in the atmosphere and validated models for its dispersal; to develop traceable methods for the measurement of outdoor low-level radon activity concentrations in the range of 1 Bq/m<sup>3</sup> to 100 Bq/m<sup>3</sup> with uncertainties of 10 % (k=1) to be used in climate and radiation protection networks; to develop the capability for traceable radon flux measurements in the field, based on the development of a radon exhalation reference system “exhalation bed” and a transfer standard; to use this capability to harmonize existing radon flux instruments/methods using intercomparisons and to validate current radon flux models and inventories using traceable measurements of radon flux and radon activity concentration supported by dosimetric and spectrometric data from the radiological early warning networks in Europe. This paper presents the overview of these objectives and the results achieved in the present time.

**МЕТОДЕ ДЕТЕКЦИЈЕ И  
МЕРНА ИНСТРУМЕНТАЦИЈА**



## ISPITIVANJE AKTIVNOSTI RADIONUKLIDA U OTPADNOM MATERIJALU – BUDŽET MERNE NESIGURNOSTI

Ivana VUKANAC, Milica RAJAČIĆ, Velibor ANDRIĆ,  
Jelena KRNETA NIKOLIĆ, Dragana TODOROVIĆ,  
Gordana PANTELIĆ i Marija JANKOVIĆ

*Institut za nuklearne nauke „Vinča“, Institut od nacionalnog značaja za Republiku  
Srbiju, Univerzitet u Beogradu, Beograd, Srbija, [vukanac@vinca.rs](mailto:vukanac@vinca.rs),  
[milica100@vinca.rs](mailto:milica100@vinca.rs), [velan@vinca.rs](mailto:velan@vinca.rs), [jnikolic@vinca.rs](mailto:jnikolic@vinca.rs), [beba@vinca.rs](mailto:beba@vinca.rs),  
[pantelic@vinca.rs](mailto:pantelic@vinca.rs), [marijam@vinca.rs](mailto:marijam@vinca.rs)*

### SADRŽAJ

*Prema važećoj zakonskoj regulativi u Republici Srbiji kontrola radiološke ispravnosti otpadnih materijala vrši se na graničnim prelazima, kao i kada postoji namera odlaganja u životnu sredinu. Sadržaj radionuklida u otpadnim materijalima u najvećem broju slučajeva određuje se gamaspektrometrijskim ispitivanjem. Ova merenja podrazumevaju adekvatnu pripremu uzorka u cilju postizanja željene geometrije merenja za koju je izvršena kalibracija efikasnosti gama spektrometra.*

*U postupku pripreme uzorka otpadnog materijala često nije moguće postići zadovoljavajuću homogenost. Takođe, matriks merenog materijala u većini slučajeva ne odgovara matriksu standarda pomoću kojeg je izvršena kalibracija spektrometra. Iz ovih razloga je potrebno izvršiti određene korekcije rezultata merenja (transfer efikasnosti, na pr.), kao i proširenje budžeta merne nesigurnosti.*

*U radu je detaljno prikazan postupak procene doprinosa nehomogenosti uzorka mernoj nesigurnosti, kao i doprinosa koji u budžet merne nesigurnosti unosi transfer efikasnosti i primena korekcionih faktora za koincidentno sumiranje.*

### 1. Uvod

Radioaktivnost otpadnih materijala važna je sa stanovišta zaštite životne sredine i očuvanja zdravlja ljudi i životinja. Otpadni materijali se mogu reciklirati u smislu korišćenja sekundarnih sirovina u proizvodnji različitih vrsta materijala u industrijama kao što su na primer građevinska industrija, metalurgija i sl. Posebnu pažnju zavređuju otpadni materijali čija je radioaktivnost povišena u tehnološkom procesu kao što je pepeo nastao sagorevanjem uglja u termoelektranama, crveni mulj nastao u postupku proizvodnje aluminijuma iz rude boksita i dr. Ovakvi materijali pri odlaganju, ili ako se upotrebe kao sekundarna sirovina, mogu uvećati „radiološko opterećenje“ životne sredine i uticati na ukupnu izloženost stanovništva jonizujućem zračenju.

Radiološka karakterizacija otpadnih materijala je važna sa stanovišta obezbeđivanja zaštite pojedinaca, stanovništva i životne sredine od štetnog uticaja jonizujućeg zračenja i regulisana je Zakonom o radijacionoj i nuklearnoj sigurnosti i bezbednosti [1] i pratećom legislativom [2, 3]. Pravilnikom o granicama radioaktivne kontaminacije, radne i životne sredine i načinu sprovođenja dekontaminacije [2] definisani su uslovi pod kojima se materijal može odlagati u životnu sredinu, odnosno definisane su granice radioaktivne kontaminacije za prirodne radionuklide (10 Bq/g za  $^{40}\text{K}$  i 1 Bq/g ostali prirodni radionuklidi) i uslovi koji moraju biti zadovoljeni u slučaju da ispitivani materijal sadrži i proizvedene radionuklide. Pravilnikom o kontroli radioaktivnosti robe prilikom uvoza, izvoza i tranzita [3] definisana je obaveza i način kontrole robe u prekograničnom prometu. U Prilozima ovog pravilnika propisane su vrste robe za koje

je kontrola radioaktivnosti obavezna. Za otpadne materijale navedene u Prilogu 3 ovog pravilnika obavezna je dozimetrijska kontrola, a za robu za koju se utvrdi povećana radioaktivnost usled prisustva radioaktivnog izvora ili kontaminacije postupa se prema nalogu Inspekcije za radijacionu i nuklearnu sigurnost i bezbednost Republike Srbije.

Pri određivanju sadržaja radionuklida u otpadnom materijalu, u laboratorijama za ispitivanje radioaktivnosti koriste se standardni postupci merenja. Međutim, zbog specifičnih fizičkih karakteristika otpadnih materijala u nekim slučajevima je primena definisanih postupaka otežana – ne može se postići zadovoljavajuća homogenost pripremljenog uzorka, odgovarajuća geometrija merenja, primena adekvatne kalibracione krive za detektor i sl.

Cilj ovog istraživanja je bio da se na osnovu analize dobijenih rezultata, u tu svrhu osmišljenog seta merenja, proceni uticaj nehomogenosti i vremena merenja ovakve vrste uzoraka na rezultate merenja i da se detaljno analizira doprinos nehomogenosti i izvršenih korekcija rezultata mernoj nesigurnosti rezultata ispitivanja.

### 2. Materijal i metode

Uzorak otpadnog lima dostavljen je u prethodnom periodu u laboratoriju na ispitivanje jer je dozimetrijskom kontrolom ustanovljena povišena doza. Kako, u skladu sa pravilnikom [3], nije potvrđeno odsustvo radioaktivnog izvora ili kontaminacije izvršeno je ispitivanje sadržaja radionuklida. Gamaspektrometrijsko ispitivanje uradjeno je prema međunarodnim preporukama [4]. Uzorak je pripremljen mehaničkim usitnjavanjem – sečenjem na sitne komadiće, upakovan u odgovarajuću geometriju merenja i meren na HPGe gama spektrometru. Prilikom prvog rutinskog merenja korišćena je kriva efikasnosti dobijena pomoću matriksa najslabije gustine gustini pakovanja merenog otpadnog materijala. Ispitivanje je pokazalo prisustvo proizvedenog radionuklida  $^{60}\text{Co}$ .

Za potrebe ovog istraživanja, otpadni lim upakovan je u tri različite geometrije – cilindrične PVC kutije od 120 ml i 250 ml i Marineli posudu od 450 ml, kao što je prikazano na Slici 1. Sva tri pripremljena uzorka merena su na tri poluprovodnička HPGe spektrometra (Canberra) – D1, D2 i D3, relativnih efikasnosti 20 %, 18 % i 50 %, respektivno, i rezolucije 1.8 keV na energiji  $^{60}\text{Co}$  1332 keV.



Slika 1. Geometrije merenja otpadnog lima.

Svi uzorci mereni su dva puta sa različitim vremenima merenja - 9000 s i 60000 s. Dodatno, izvršena su i po dva merenja na svakom detektoru uzoraka u PVC cilindričnim kutijama sa poklopcem ka detektoru. Spektri su snimani i analizirani u softveru GENIE-2K, Canberra. Snimljeni spektri su korigovani na fon.

Za proračun specifične aktivnosti za geometrije cilindričnih kutija korišćena je kriva efikasnosti dobijena pomoću referentnog materijala u matriksu mermera, pripremljenog u Laboratoriji korišćenjem sertifikovanog radioaktivnog rastvora mešavine radionuklida Češkog Metrološkog Instituta [5]. Za merenja u Marineli geometriji korišćena je kriva efikasnosti eksperimentalno dobijena pomoću sertifikovanog radioaktivnog standarda u matriksu smole Češkog Metrološkog Instituta [6]. Kalibracione krive odabrane su kao najslabije merenom uzorku po gustini pakovanja.

Kako je mereni uzorak različit od standarda kojim je izvršena kalibracija efikasnosti, pomoću programa EFFTRAN [7] i MEFFTRAN [8] urađen je transfer efikasnosti sa materijala standarda (mermer za cilindrične PVC kutije, odnosno smola za Marineli geometriju) na materijal merenog uzorka – Al lim. Takođe, pomoću ovih programa izračunati su korekcionni faktori za koincidentno sumiranje za detektovani radionuklid –  $^{60}\text{Co}$ . Izračunate vrednosti specifičnih aktivnosti  $^{60}\text{Co}$  su zatim korigovane dobijenim korekcionnim faktorima.

Merna nesigurnost svakog pojedinačnog merenja obuhvatala je statističku mernu nesigurnost, nesigurnost odredjivanja krive efikasnosti, nesigurnost transfera efikasnosti i nesigurnost odredjivanja korekcionnih faktora za koincidentno sumiranje. Nesigurnost merenja mase je zanemarena. Kombinovana merna nesigurnost računata je u skladu sa opštim pravilom propagacije nesigurnosti.

Rezultat merenja na jednom detektoru izračunat je kao srednja vrednost svakog pojedinačnog merenja. Standardna devijacija srednje vrednosti pojedinačnih rezultata na jednom detektoru može se shvatiti kao mera rasturanja rezultata usled nehomogenosti i različitih uslova merenja. U skladu sa tim, budžet merne nesigurnosti treba proširiti ovim doprinosom.

### 3. Rezultati i diskusija

Merenja čiji su rezultati prikazani u ovom radu vršena su u maju i junu 2021. godine. Rezultati pojedinačnih merenja za detektore D1, D2 i D3 dati su u Tabelama 1-3. Prvi deo oznake spektra predstavlja laboratorijska oznaka uzorka, a druge tri cifre označavaju: 1(2) – poklopac gore (poklopac uz detektor); 6(9) – vreme merenja 60000 s (9000 s); 1(2,3) – broj detektora.

Iz tabela se može videti da izračunata aktivnost  $^{60}\text{Co}$  ne odstupa značajno za sva merenja u geometrijama PVC cilindrične kutije od 250 ml i Marineli geometrije, za svaki od detektora. Vrednosti dobijene za geometriju merenja cilindrične PVC kutije od 120 ml su, za sva tri detektora, niže i to značajnije za slučaj merenja kutije dnom uz detektor. Činjenica da je isti trend variranja rezultata merenja zabeležen na sva tri detektora govori u prilog nehomogenosti početne količine uzorka („balka“) upakovane u tri različite geometrije merenja, kao i nehomogenosti unutar samog uzorka u geometriji PVC cilindrične kutije od 120 g. Takođe, može se zaključiti da je stepen nehomogenosti obrnuto proporcionalan količini uzorka u geometriji, što je očekivano. Za različita vremena merenja, nisu primećene statistički značajne razlike između rezultata ispitivanja.

Merna nesigurnost aktivnosti  $^{60}\text{Co}$  (u Tabelama 1-3 označena sa MN  $^{60}\text{Co}$ ) data je za faktor  $k=1$  i obuhvatala je: statističku mernu nesigurnost, koja se kretala u opsegu od

1 % do 4 % za sva merenja, nesigurnost odredjivanja efikasnosti i transfera efikasnosti koja je bila 3 % i 3.1 %, respektivno, dok je procenjena nesigurnost odredjivanja korekcionih faktora za koincidentno sumiranje, bila 3 %.

**Tabela 1. Rezultati merenja otpadnog Al lima na HPGe spektrometru relativne efikasnosti 20 % (D1).**

Oznaka spektra	masa [kg]	t [s]	Geometrija	A <sup>60</sup> Co [Bq/kg]	MN <sup>60</sup> Co [%]	MN <sup>60</sup> Co [Bq/kg]
679 161	0,280	60000	250 ml	81,7	6,8	5,6
679 191		9000		86,3	7,8	6,7
679 261		60000		79,9	6,8	5,5
679 291		9000		79,3	7,9	6,3
680 161	0,149	60000	120 ml	70,2	6,4	4,5
680 191		9000		76,5	8,0	6,1
680 261		60000		78,8	6,3	5,0
680 291		9000		77,2	8,0	6,2
681 161	0,466	60000	Mar	79,9	6,2	5,0
681 191		9000		78,7	6,7	5,3
<b>Srednja vrednost</b>				<b>78,8</b>	<b>7,1</b>	<b>5,6</b>

**Tabela 2. Rezultati merenja otpadnog Al lima na HPGe spektrometru relativne efikasnosti 18 % (D2).**

Oznaka spektra	masa [kg]	t [s]	Geometrija	A <sup>60</sup> Co [Bq/kg]	MN <sup>60</sup> Co [%]	MN <sup>60</sup> Co [Bq/kg]
679 162	0,280	60000	250 ml	88,7	6,9	6,1
679 192		9000		89,3	8,4	7,5
679 262		60000		89,6	6,9	6,2
679 292		9000		86,2	8,5	7,3
680 162	0,149	60000	120 ml	69,5	7,2	5,0
680 192		9000		76,7	9,0	6,9
680 262		60000		83,5	7,1	5,9
680 292		9000		82,4	9,2	7,6
681 162	0,466	60000	Mar	86,1	6,9	5,9
681 192		9000		89,5	7,5	6,7
<b>Srednja vrednost</b>				<b>84,1</b>	<b>7,8</b>	<b>6,5</b>

Za svaki od detektora izračunata je srednja vrednost svih rezultata i standardna devijacija koja je, kao doprinos rasturanja rezultata usled nehomogenosti i različitih uslova merenja, uvrštena u ukupan budžet merne nesigurnosti. Dobijene vrednosti su

date u Tabeli 4, zajedno sa ukupnom mernom nesigurnošću (MN<sub>tot</sub>) za sva tri detektora. Iz Tabele 4. može se videti da su doprinosi mernoj nesigurnosti od samog postupka merenja poredivi sa doprinosom koji mernoj nesigurnosti daje standardna devijacija seta rezultata merenja. Najveći doprinos standardnoj devijaciji se može pripisati nehomogenosti uzorka, s obzirom na to da razlike u rezultatima za istu geometriju ali različito vreme merenja, nisu značajne.

**Tabela 3. Rezultati merenja otpadnog Al lima na HPGe spektrometru relativne efikasnosti 50 % (D3).**

Oznaka spektra	masa [kg]	t [s]	Geometrija	A <sup>60</sup> Co [Bq/kg]	MN <sup>60</sup> Co [%]	MN <sup>60</sup> Co [Bq/kg]
679 163	0,280	60000	250 ml	84,5	7,4	6,2
679 193		9000		84,1	7,8	6,6
679 263		60000		84,0	7,4	6,2
679 293		9000		82,9	7,8	6,5
680 163	0,149	60000	120 ml	73,9	7,4	5,5
680 193		9000		73,1	8,2	6,0
680 263		60000		80,7	7,4	6,0
680 293		9000		79,8	8,1	6,5
<b>Srednja vrednost</b>				<b>80,4</b>	<b>7,7</b>	<b>6,2</b>

**Tabela 4. Rezultati merenja otpadnog Al lima na tri HPGe spektrometra.**

Detektor	Asr <sup>60</sup> Co [Bq/kg]	MN <sup>60</sup> Co [%]	St. dev. [%]	MN <sub>tot</sub> [%]
<b>D1</b>	78,8	7,1	5,1	8,8
<b>D2</b>	84,1	7,8	7,8	11,0
<b>D3</b>	80,4	7,7	5,7	9,6

#### 4. Zaključak

Radiološka karakterizacija otpadnog materijala važna je sa stanovišta zaštite životne sredine. Zbog specifičnih fizičkih karakteristika otpadnih materijala pri njihovom ispitivanju treba posebno voditi računa o homogenosti pripremljenog uzorka, adekvatnoj kalibraciji detektorskog sistema i uslovima merenja.

U sprovedenom istraživanju, prikazanom u ovom radu, procenjen je uticaj nehomogenosti i vremena merenja uzoraka otpadnog materijala na rezultate merenja. Na osnovu dobijenih rezultata aktivnosti u pojedinačnim merenjima može se zaključiti da budžet merne nesigurnosti treba proširiti za doprinose nehomogenosti i izvršenih korekcija rezultata.

#### 5. Zahvalnica

Rad je finansijski podržan od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije (Aneks ugovora, evidencioni broj: 451-03-9/2021-14/ 200017).

### 6. Literatura

- [1] Zakon o radijacionoj i nuklearnoj sigurnosti i bezbednosti. Sl. glasnik RS br. 95/2018 i 10/2019, 2019.
- [2] Pravilnik o granicama radioaktivne kontaminacije, radne i životne sredine i načinu sprovođenja dekontaminacije. Sl. glasnik br. 38/2011, 2011.
- [3] Pravilnik o kontroli radioaktivnosti robe prilikom uvoza, izvoza i tranzita. Sl. glasnik RS br. 86/19, 2019.
- [4] IAEA, 1989. Measurement of Radionuclides in Food and Environment, A Guidebook. Technical Reports Series No. 295, Vienna.
- [5] CMI, 2017. Radioactive Standard Solutions, ER X, Cert. no. 1035-SE-40844-17 Czech Metrology Institute Prague.
- [6] CMI, 2017a. Radioactive Standard, CBSS 2, Cert. no. 1035-SE-40845-17. Czech Metrology Institute, Prague.
- [7] T. Vidmar. EFFTRAN—a Monte Carlo efficiency transfer code for gamma-ray spectrometry, *Nucl. Instrument. Method. Phys. Res. A* 50 (3), 2005, 603–608.
- [8] MEFFTRAN, <http://www.ffmpeg.com/MEFFTRAN.zip>.

### TESTING OF RADIONUCLIDE ACTIVITY IN WASTE MATERIAL - MEASUREMENT UNCERTAINTY BUDGET

**Ivana VUKANAC, Milica RAJAČIĆ, Velibor ANDRIĆ,  
Jelena KRNETA NIKOLIĆ, Dragana TODORVIĆ,  
Gordana PANTELIĆ and Marija JANKOVIĆ**

*Institute of Nuclear Sciences „Vinča“, Institute of national importance for the Republic  
of Serbia, University of Belgrade, Belgrade, Serbia, [vukanac@vinca.rs](mailto:vukanac@vinca.rs),  
[milica100@vinca.rs](mailto:milica100@vinca.rs), [velan@vinca.rs](mailto:velan@vinca.rs), [jnikolic@vinca.rs](mailto:jnikolic@vinca.rs), [beba@vinca.rs](mailto:beba@vinca.rs),  
[pantelic@vinca.rs](mailto:pantelic@vinca.rs), [marijam@vinca.rs](mailto:marijam@vinca.rs)*

#### ABSTRACT

According to the current legislation in the Republic of Serbia, the radiological control of waste materials is performed at border crossings, as well as when there is an intention to dispose these materials in the environment. The gamma ray spectrometry is commonly used for determination of radionuclide content in waste materials. These measurements imply adequate sample preparation in order to achieve the desired measurement geometry for which the efficiency of the gamma spectrometer has been calibrated.

Satisfactory homogeneity is often not possible to achieve in the sample preparation process. Also, the matrix of the measured material in most cases does not correspond to the matrix of the standard used for efficiency calibration of the spectrometer. For these reasons, it is necessary to make certain corrections to the measurement results (efficiency transfer, for example), as well as to expand the measurement uncertainty budget.

The paper presents in detail the procedure for assessing the contribution of inhomogeneity of the sample to the measurement uncertainty, as well as the contribution that the efficiency transfer and coincidence summing corrections introduce to the measurement uncertainty budget.

VREMENSKA ZAVISNOST GUSTINE TRAGOVA NA TRAG  
DETEKTORIMA U DIFUZIONOJ KOMORI

Nenad STEVANOVIĆ<sup>1</sup>, Vladimir MARKOVIĆ<sup>1</sup>, Marko MILOŠEVIĆ<sup>1</sup>,  
Jelena STAJIĆ<sup>2</sup> i Biljana MILENKOVIĆ<sup>2</sup>

1) Univerzitet u Kragujevcu, Prirodno-matematički fakultet, Kragujevac, Srbija,  
[nenad.stevanovic@pmf.kg.ac.rs](mailto:nenad.stevanovic@pmf.kg.ac.rs), [vladimir.markovic@pmf.kg.ac.rs](mailto:vladimir.markovic@pmf.kg.ac.rs),

[marko.milosevic@pmf.kg.ac.rs](mailto:marko.milosevic@pmf.kg.ac.rs)

2) Univerzitet u Kragujevcu, Institut za informacione tehnologije, Kragujevac, Srbija,  
[stajicjelena11052012@gmail.com](mailto:stajicjelena11052012@gmail.com), [bmilenkovic@kg.ac.rs](mailto:bmilenkovic@kg.ac.rs)

SADRŽAJ

*Difuziona komora sa čvrstim trag detektorom se najčešće koristi za merenje aktivnosne koncentracije radona i njegovih potomaka. U literaturi se pretpostavlja da je koncentracija radona na ulazu u komoru konstantna tokom vremena izlaganja. U ovom radu je razmatrano da je koncentracija radona promenljiva i modelovana je na osnovu realnih merenja. Difuzija radona i njegovih potomaka je razmatrana difuzionom jednačinom u cilindričnim koordinatama, koja je rešavana numerički, metodom konačnih razlika. Time se dobijaju raspodele koncentracije radona i potomaka u komori. Na osnovu verovatnoće detekcije alfa čestica, određena je gustina tragova na trag detektoru. Pokazano je da promena gustine tragova prati promenu koncentracije radona.*

**1. Uvod**

Merenje radona se najčešće obavlja pomoću čvrstih trag detektora zatvorenih u posudi, prekrivenu filter papirom ili nekom drugom propusnom membranom - difuzionom komorom. Da bi se odredila koncentracija radona i potomaka potrebno je poznavati kalibracioni koeficijent, što predstavlja odnos gustine tragova alfa čestica na trag detektoru, aktivnosne koncentracije radona ispred komore i vremena izlaganja. Više radova je posvećeno određivanju kalibracionog koeficijenta [1-8]. Smatrano je da je koncentracija radona i potomaka homogena u difuzionoj komori i da je koncentracija radona konstantna ispred komore. Međutim, difuziona komora zauzima mali deo prostorije u kojoj se vrši merenje koncentracije, koncentracija varira tokom vremena i ne može se smatrati konstantnom. [9-11].

Da bi se istražile raspodele radona i njegovih potomaka u komori kao funkcija koncentracije radona u prostoriji, koja varira s vremenom, potrebno je rešiti jednačinu difuzije zavisnu od vremena [12, 13]. Nađeno je da su raspodele radona i potomaka nehomogene. U ovom radu, smo otišli korak dalje, i na osnovu dobijenih raspodela i verovatnoće da će se pri datoj raspodeli radona i potomaka formirati trag, dobijena je gustina tragova na detektoru kao funkcija od vremena merenja. Pokazano je da promena koncentracije radona utiče na promenu gustine tragova.

**2. Rešavanje difuzione jednačine za difuzionu komoru**

U ovom delu je razmatrana cilindrična komora radijusa  $R$  i visine  $H$ . Pretpostavljeno je da gas  $^{222}\text{Rn}$  difunduje u komoru u pravcu  $z$  ose. Posle raspada radona, formirani potomci difunduju kroz komoru, raspadaju se i deponuju na njene zidove. Difuzija  $^{222}\text{Rn}$  i njegovih potomaka kroz komoru karakteriše se koeficijentom difuzije,  $D=0.054 \text{ cm}^2/\text{s}$ .



Koncentracija  $^{222}\text{Rn}$  i njegovih potomaka u komori za aksijalno simetričan slučaj, može biti opisana difuzionom jednačinom u cilindričnim koordinatama

$$\frac{\partial C_n(r, z, t)}{\partial t} = D \cdot \left( \frac{\partial^2 C_n(r, z, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial C_n(r, z, t)}{\partial r} + \frac{\partial^2 C_n(r, z, t)}{\partial z^2} \right) - \lambda_n \cdot C_n(r, z, t) + \lambda_{n-1} \cdot C_{n-1}(r, z, t) \quad (1)$$

gde su  $\lambda_n$  ( $n=0,1,2,3$ ) konstante raspada  $^{222}\text{Rn}$  i njegovih potomaka  $^{218}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Pb}$  i  $^{214}\text{Bi}$ , respektivno, a  $C_n$  njihove brojne koncentracije. Poslednji izraz na desnoj strani jednačine,  $\lambda_{n-1} \cdot C_{n-1}(r, z, t)$ , opisuje formiranje potomka od njegovog prethodnika. Za izračunavanje koncentracije  $^{222}\text{Rn}$  ( $n=0$ ) poslednji član je jednak nuli. Izraz  $\lambda_n \cdot C_n(r, z, t)$  opisuje raspad  $^{222}\text{Rn}$  i njegovih potomaka. Smatra se da je komora bila prazna pre izlaganja gasu  $^{222}\text{Rn}$  i to može biti napisano kao

$$C_0(r, z, t = 0) = 0, \quad 0 \leq r \leq R; \quad 0 \leq z \leq H. \quad (2)$$

Ako koncentracija  $^{222}\text{Rn}$ , oko komore može biti opisana kao funkcija  $C_0(t)$ , tada je  $^{222}\text{Rn}$  koncentracija na ulasku u komoru

$$C_0(r, z = 0, t) = C_0(t), \quad 0 \leq r \leq R; \quad t > 0 \quad (3)$$

Diferencijalna jednačina (1), nakon diskretizacije metodom konačnih razlika (FDM) [14] dobija formu

$$\frac{C_{ijk+1}^n - C_{ijk}^n}{\Delta t} = D \cdot \left( \frac{C_{i+1jk}^n - 2C_{ijk}^n + C_{i-1jk}^n}{\Delta r^2} + \frac{C_{i+1jk}^n - C_{i-1jk}^n}{i \cdot \Delta r^2} + \frac{C_{ij+1k}^n - 2C_{ijk}^n + C_{ij-1k}^n}{\Delta z^2} \right) - \lambda_n \cdot C_{ijk}^n + \lambda_{n-1} \cdot C_{ijk}^{n-1} \quad (4)$$

gde se indeksi  $i, j$  i  $k$  odnose na diskretne dužine koraka  $\Delta r$ ,  $\Delta z$  i  $\Delta t$  za koordinate  $r$ ,  $z$  i vreme  $t$ , respektivno.

Primenjujući granične uslove [13] prethodna jednačina je isprogramirana za radon i njegove potomke u fortranu, tako da se za svaki vremenski segment računa koncentracija radona u svim tačkama komore. Na osnovu tih podataka dobija se u tom segmentu vremena koncentracija  $^{218}\text{Po}$  u svim tačkama komore i tako dalje za sve ostale potomke. Iterativnom metodom postupak se ponavlja za naredne vremenske segmente.

### 3. Rezultati

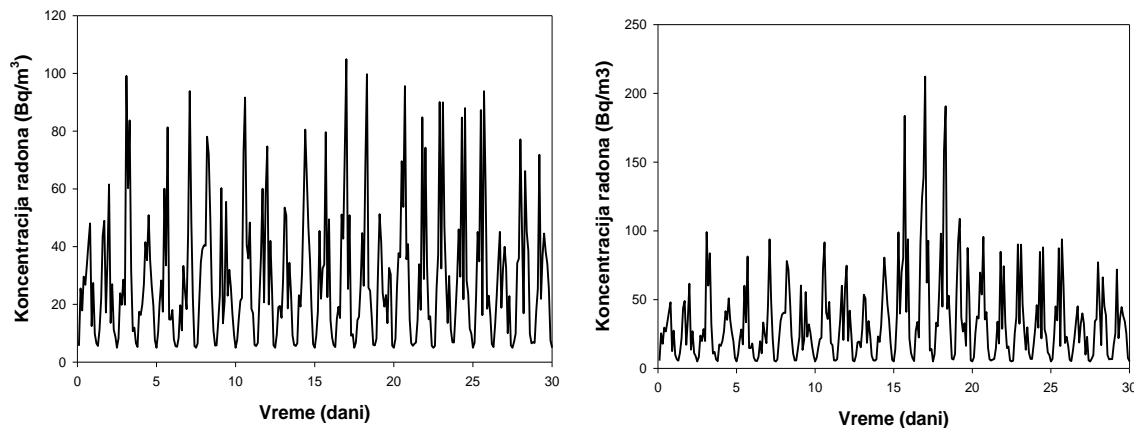
Koncentracija radona zavisna od vremena, dobijena merenjem [9], je modelovana funkcijom [13]

$$A_0 = 5 + (10 + a \cdot u_1) \left( \sin \left( \frac{2\pi}{T} t \right) \right)^2, \quad (5)$$

gde je  $a = 40 + 80u_2$ ,  $u_1, u_2$  su slučajni brojevi u interval od 0 do 1.

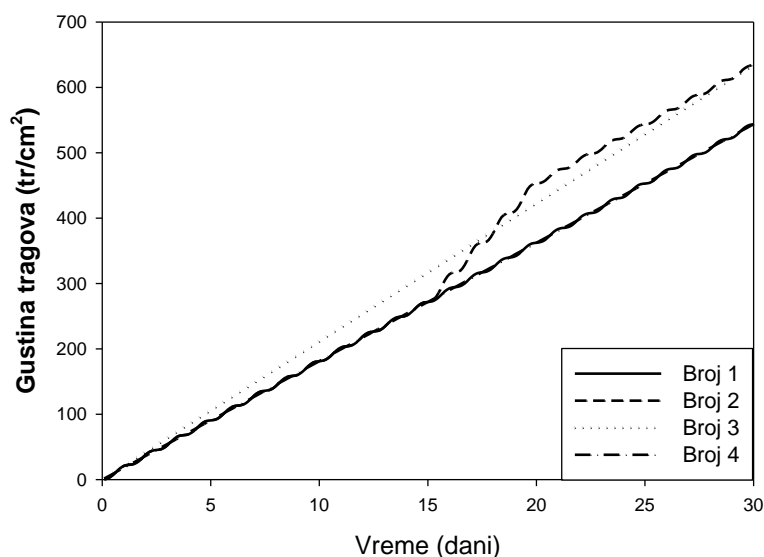
Modelovana koncentracija radona je predstavljena na Slici 1a. Iz [9] se može videti da je period varijacije radona od maksimuma do minimalne vrednosti nešto više od jednog dana, odnosno oko 30h. Vreme između dva maksimuma je oko  $T=60\text{h}$ . Merenje

koncentracije radona u [9] je izvršeno svakih 10 minuta. Može se videti da koncentracija radona jako varira tokom vremena sa promenom maksimalne vrednosti i do pet puta.



**Slika 1. Modelovanje aktivnosne koncentracije radona ispred komore na osnovu relacije (5): a)  $a=40+80u_2$ ; b)  $a=160+80u_2$ .**

Na osnovu brojne koncentracije radona i njegovih potomaka u svakoj tački komore, izračunate prema modelu opisanom u prethodnom poglavlju, a prema koncentraciji radona date relacijom (5), određene su aktivnosne koncentracije slobodne i nataložene frakcije. Na osnovu verovatnoće da će jedinična koncentracija radona i potomaka slobodne ili nataložene frakcije dati jedan trag na detektoru [12] izračunata je gustina tragova i prikazana njena promena tokom vremena (slika 2). Sa slike se vidi da gustina tragova na detektoru stalno raste u vremenu i da se menja.



**Slika 2. Gustina tragova na detektoru kao funkcija vremena izlaganja za različite koncentracije radona: Broj 1-relacija (5); Broj 2- relaciji (5) gde je  $a=160+80u_2$  za  $15 < t < 20$  dan; Broj 3-  $A_0=35 \text{ Bq/m}^3$ ; Broj 4-  $A_0=35 \text{ Bq/m}^3$ .**

Za vreme izlaganja od 30 dana, koliko je i prikazano na grafiku, prema predstavljenoj koncentraciji radona, gustina tragova na detektoru iznosi  $550 \text{ tr/cm}^2$ . Kada se izvrši usrednjavanje funkcije (5) po vremenu, dobija se srednja aktivnosna koncentracija radona  $A_0 = 30 \text{ Bq/m}^3$ . Pri toj koncentraciji radona, gustina tragova u vremenu je prikazana linijom Broj 4. Ona prati varijacije gustine tragova tokom vremena i na kraju se za isto vreme izlaganja dobija ista gustina tragova.

U ovom radu simulirana je nagla promena aktivnosne koncentracije radona, što je opisano relacijom (5), pri čemu je aktivnost znatno povećana u periodu od  $15 < t < 20$  dana, dok u ostalom periodu koncentracija je ostala kao u prethodnom slučaju (videti sliku 1b). Ako se za takvoj promeni aktivnosne koncentracije radona predstavi gustina tragova na detektoru, dobija se grafik na Slici 2, označen sa Broj 2. Na grafiku se vidi da se javlja nagli porast gustine tragova u periodu  $15 < t < 20$  dana i da je u tom delu nagib krive veći onoliko puta koliko je koncentracija radona povećana. Kada se odredi srednja koncentracija radona za posmatrani period, dobija se  $A_0 = 35 \text{ Bq/m}^3$ , a promena gustine tragova u vremenu pri toj aktivnosnoj koncentraciji radona je prikazana na Slici 2, grafik Broj 3. Može se zaključiti da je srednja vrednost aktivnosne koncentracije radona ekvivalent vremenskoj promenljivoj koncentraciji.

#### 4. Zaključak

U ovom radu je pokazano da je gustina tragova na detektoru, koja se formira nakon određenog vremena izlaganja, mera srednje aktivnosne koncentracije radona u tom vremenu, bez obzira kakve su bile promene koncentracije. Pri nagloj promeni koncentracije radona javlja se promena gustine tragova u tom vremenskom periodu, ali ukupan broj tragova oslikava samo srednju aktivnosnu koncentraciju radona, pa se nagle promene teško mogu otkriti jednim merenjem, koristeći jedan detektor. Da bi se eventualno otkrile promene koncentracije radona, neophodno je koristiti više detektora i merenje gustine tragova vršiti sukcesivno, praveći razliku gustine tragova na sukcesivno ispitivanim detektorima, u datom vremenskom periodu. Takva analiza će dati samo srednje vrednosti aktivnosne koncentracije radona u ispitivanim vremenskim periodima.

#### 5. Zahvalnica

Ovaj rad je podržan od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja (broj ugovora: 451-03-9/2021-14/200122 i 451-03-9/2021-14/200378).

#### 6. Literatura

- [1] D. Nikezic, N. Stevanovic, Room model with three modal distribution of attached radon progeny, *Health Physics* 87,2004, 405-409.
- [2] D. Nikezic, N. Stevanovic, Room model with three modal distributions of attached  $^{220}\text{Rn}$  progeny. Dose conversion factor for  $^{220}\text{Rn}$  progeny. *Rad. Prot. Dosim.* 123, 2007, 95-102.
- [3] N. Stevanovic, V.M. Markovic, V. Urosevic, D. Nikezic, Determination of parameters of the Jacobi room model using the Brownian motion model, *Health Phys.* 96, 2009, 48-54.
- [4] N. Stevanovic, V.M. Markovic, D. Nikezic, Relationship between deposition and attachment rates in Jacobi room model, *J. Env. Rad.* 101,2010, 349–352.
- [5] D. Nikezic, K.N. Yu, Formation and Growth of Tracks in Nuclear Track Materials. *Materials Science and Engineering R.* 46, 2004, 51-123.

- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] D. Pressyanov. Radon progeny distribution in cylindrical diffusion chambers. *Nucl. Instrum. and Meth. Phys. Res. A* 596, 2008, 446-450.
- [9] A. Clouvas, S. Xanthos, M. Antonopoulos-Domis, Long term measurements of radon equilibrium factor in Greek dwellings, *Rad. Prot. Dosim.* 103, 2003, 269–272.
- [10] J. Planinic, B. Vukovic, V. Radolic. Radon time variations and deterministic chaos, *J.Env. Rad.* 75, 2004, 35–45.
- [11] 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.
- [12] N. Stevanovic, V.M. Markovic, D. Nikezic. Time dependence of  $^{222}\text{Rn}$  and  $^{220}\text{Rn}$  and their progenies' distributions in a diffusion chamber. *Nucl Instrum. Methods Phys. Res. A* 872, 2017, 93-99.
- [13] V.M. Markovic, A.G. Markovic, N. Stevanovic, D. Nikezic. Rn progeny diffusion, deposition and track distribution in diffusion chamber with permeable membrane. *Rad. Meas.* 124, 2019 146-157.
- [14] M.N.O. Sadiku, Numerical techniques in Electromagnetic, Boca Raton, Fla.: CRC Press, USA, 1992.

**TRACK DENSITY ON TRACK DETEKTOR IN DIFFUSION CHAMBER AS  
A FUNCTION OF TIME**

**Nenad STEVANOVIĆ<sup>1</sup>, Vladimir MARKOVIĆ<sup>1</sup>, Marko MILOŠEVIĆ<sup>1</sup>,  
Jelena STAJIĆ<sup>2</sup> and Biljana MILENKOVIĆ<sup>2</sup>**

*1) University of Kragujevac, Faculty of Science, Kragujevac, Serbia,  
[nenad.stevanovic@pmf.kg.ac.rs](mailto:nenad.stevanovic@pmf.kg.ac.rs), [vladimir.markovic@pmf.kg.ac.rs](mailto:vladimir.markovic@pmf.kg.ac.rs),  
[marko.milosevic@pmf.kg.ac.rs](mailto:marko.milosevic@pmf.kg.ac.rs)*

*2) Univesrity of Kragujevac, Institute for information technology, Kragujevac,  
Serbia, [stajicjelena11052012@gmail.com](mailto:stajicjelena11052012@gmail.com), [bmilenkovic@kg.ac.rs](mailto:bmilenkovic@kg.ac.rs)*

**ABSTRACT**

Diffusion chamber with solid state nuclear track detector is the most used for measurement of activity concentration of radon and its progeny. The major assumption is that radon concentration is constant over time. In this paper it was assumed that radon concentration is chagned over time and it was modeled according to real measurements. Diffusion of radon and its progeny was treated by diffusion equation in cilindrical coordinates and it was solved by finite difference method. The solutions of equations are distributions of radon and its progeny in the chamber and track density of alpha particles on the detector. Track density as a function of exposure time was obtained in this paper.

## SIMULACIJA PRODUKCIJE NEUTRONA MIONIMA IZ KOSMIČKOG ZRAČENJA U OLOVNOJ ZAŠTITI GERMANIJUMSKOG DETEKTORA

**Dejan JOKOVIĆ, Dimitrije MALETIĆ, Vladimir UDOVIČIĆ,  
Radomir BANJANAC, Aleksandar DRAGIĆ, Mihailo SAVIĆ,  
Nikola VESELINOVIĆ i David KNEŽEVIĆ**

*Institut za fiziku u Beogradu, Univerzitet u Beogradu, Beograd, Srbija,  
[yokovic@ipb.ac.rs](mailto:yokovic@ipb.ac.rs), [maletic@ipb.ac.rs](mailto:maletic@ipb.ac.rs), [udovicic@ipb.ac.rs](mailto:udovicic@ipb.ac.rs), [banjanac@ipb.ac.rs](mailto:banjanac@ipb.ac.rs),  
[dragic@ipb.ac.rs](mailto:dragic@ipb.ac.rs), [msavic@ipb.ac.rs](mailto:msavic@ipb.ac.rs), [veselinovic@ipb.ac.rs](mailto:veselinovic@ipb.ac.rs), [davidk@ipb.ac.rs](mailto:davidk@ipb.ac.rs)*

### SADRŽAJ

*Zbog svojih osobina, olovo se uobičajeno koristi kao materijal za zaštitu germanijumskih detektora. Mioni iz kosmičkog zračenja u interakcijama sa olovom proizvode sekundarno zračenje, koje doprinosi ukupnom fonu detektora. Značajan deo ove komponente fona čine neutroni proizvedeni u interakcijama miona u olovnoj zaštiti. Neutroni mogu biti poseban problem u eksperimentima u dubokim podzemnim laboratorijama. U podzemnoj laboratoriji u Institutu za fiziku u Beogradu, germanijumski detektor, koji se nalazi u olovnoj zaštiti, može raditi u koincidenciji sa mionskim detektorom. U ovom režimu rada mogu se proučavati različiti efekti u germanijumskom detektoru izazvani mionima, posebno efekti koji potiču od neutrona proizvedenih mionima. Ovde su predstavljeni rezultati Geant4 simulacija produkcije neutrona u olovu mionima iz kosmičkog zračenja. Rezultat ovih simulacija je procena prinosa neutrona – broja proizvedenih neutrona u olovu po jedinici dužine puta – u interakcijama miona. Pored toga, određena je raspodela multipliciteta neutrona, kao broja proizvedenih neutrona u jednoj interakciji.*

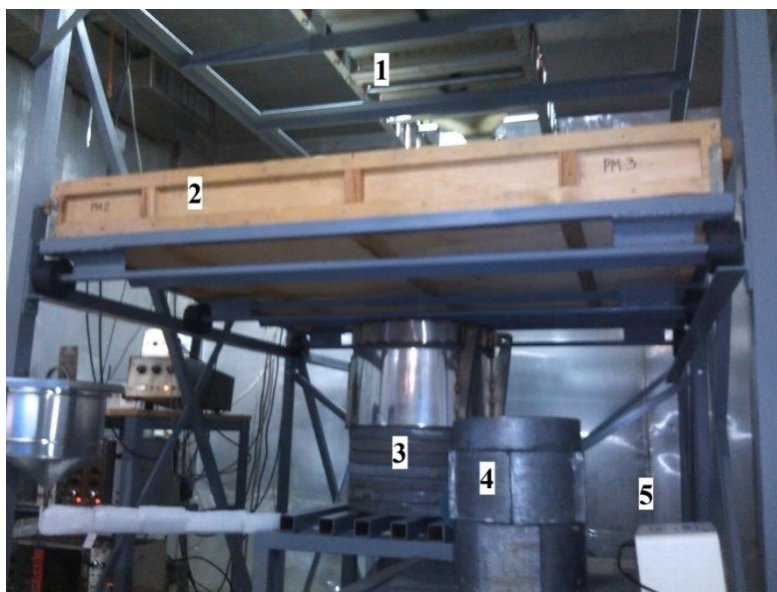
### 1. Uvod

U eksperimentima u kojima se traže retki događaji glavni problem je redukcija fonskog zračenja. Zato se ovi eksperimenti vrše u podzemnim laboratorijama, gde je fon u odnosu na površinu Zemlje znatno niži. Međutim, mioni iz kosmičkog zračenja su veoma prodorne čestice, prisutne i u dubokim podzemnim laboratorijama, i zato čine važan izvor fonskog zračenja u ovakvim osetljivim eksperimentima. Poseban problem je mionima indukovano sekundarno zračenje u detektorima i njihovoj okolini (detektorskoj zaštiti, zidovima, itd). Značajan doprinos fonu potiče od neutrona proizvedenih u interakcijama miona sa materijalom u okolini detektora [1].

U Niskofonskoj laboratoriji Instituta za fiziku u Beogradu intenzitet kosmičkog zračenja kontinuirano se meri od 2002. godine [2,3]. Geografski položaj laboratorije je takav da se kosmičko zračenje koje se detektuje u osnovi sastoji od mionske tvrde komponente, uz izvestan procenat meke elektromagnetne komponente. Laboratorija se sastoji od nadzemnog i plitko ukopanog podzemnog dela na dubini od 12 m ispod površine. Zemljište (les) iznad podzemne laboratorije ima gustinu približno  $2,0 \text{ g/cm}^3$  – efektivni apsorpcioni sloj iznosi približno  $25 \text{ hg/cm}^3$  ( $25 \text{ m.w.e.}$ ). Na toj dubini prisutna je praktično samo mionska komponenta kosmičkog zračenja. Zbog svojih niskofonskih karakteristika, laboratorija je osposobljena za izučavanja različitih pojava generisanih kosmičkim zračenjem, pre svega događaja indukovanih mionima iz kosmičkog zračenja u germanijumskim detektorima, kao i u pasivnoj zaštiti detektora.

U podzemnoj laboratoriji nalazi se HPGe detektor deklarisan aktivne zapremine  $149 \text{ cm}^3$  i relativne efikasnosti 35 %. Podzemna pozicija detektora, zajedno sa olovnom

zaštitom debljine 12 cm, daje značajno smanjenje fonskog zračenja. Pored pasivne zaštite, za aktivnu veto zaštitu germanijumskog detektora mogu se koristiti postojeći scintilacioni detektori kosmičkog zračenja. Plastični scintilacioni detektor nalazi se neposredno iznad olovne zaštite; dimenzije detektora su 100 cm × 100 cm × 5 cm. Oba detektora – HPGe i scintilacioni – vezani su za analogno-digitalni konvertor, koji omogućava snimanje i čuvanje svih detektovanih događaja. Svi događaji analiziraju se *off-line*. Uz odgovarajuće selekzione kriterijume mogu se izdvojiti svi koincidentni i/ili antikoincidentni događaji u scintilacionom i HPGe detektoru [4,5].



**Slika 1. Ekperimentalna konfiguracija u podzemnoj laboratoriji: scintilacioni detektori (1,2) i germanijumski detektor u olovnoj zaštiti (3).**

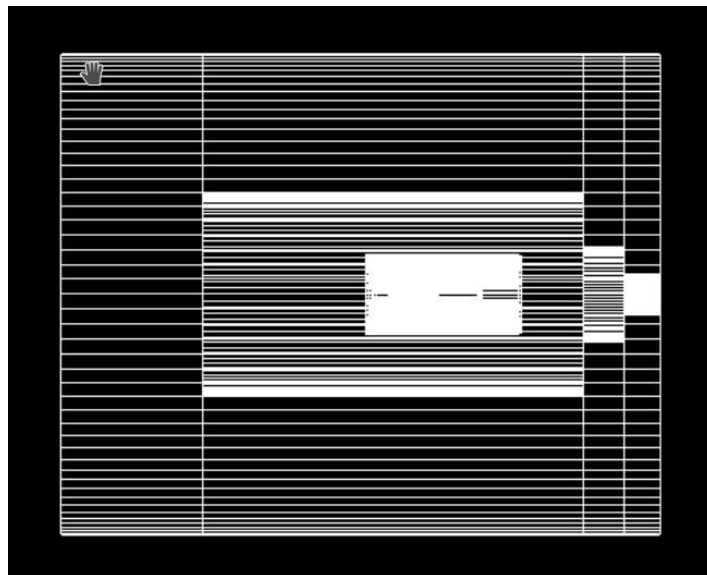
Prvi rezultati merenja produkcije neutrona mionima iz kosmičkog zračenja u olovnoj zaštiti HPGe detektora objavljeni su 2013. godine. Podaci su snimani tokom više od 400 dana merenja, u koincidentnom režimu rada scintilator-HPGe detektor. Analizom ovih podataka dobijen je rezultat za fluks neutrona proizvedenih mionima, na dubini naše podzemne laboratorije [6]. Merenja su kontinuirano nastavljena, sa većom statistikom snimljenih događaja; analiza ovih podataka je u toku. Pored eksperimentalnih merenja, uporedo su urađene Monte Carlo simulacije produkcije neutrona u olovnoj zaštiti, bazirane na Geant4 *framework*-u. Ovde su predstavljeni prvi rezultati simulacija: procena prinosa neutrona (broj neutrona po jedinici dužine) u interakcijama miona, kao i raspodela multipliciteta proizvedenih neutrona.

### 2. Metod

Geant4 je softverski paket za Monte Carlo simulacije transporta i interakcija čestica sa materijom [7]. On sadrži kompletan alat za modelovanje geometrije detektora, fizičkih procesa, primarnih i sekundarnih događaja, kao i odziva detektora. Na osnovi Geant4 platforme razvijena je posebna aplikacija za simulacije odziva germanijumskog i scintilacionih detektora u laboratoriji. Aplikacija je fleksibilna i omogućuje simulacije pojedinačnih i koincidentnih režima rada detektora. Prethodno je korišćena u različitim

slučajevima koji su zahtevali precizne simulacije scintilacionih i germanijumskih detektora [2,4,8,9].

Olovna zaštita je geometrije šupljeg cilindra, unutar kojeg se nalazi germanijumski detektor. Visina cilindra je 51 cm, prečnik osnove 41 cm, a debljina olovnog zida je 12 cm. Detektor je konstruisan prema specifikaciji proizvođača. Skica detektora i olovnog cilindra prikazana je na slici 2.



**Slika 2. Skica olovne zaštite germanijumskog detektora.**

Primarni događaji generisani su definisanjem incidentne čestice, njene pozicije, pravca kretanja i energije. Incidentne čestice su pozitivni i negativni mioni; odnos broja pozitivnih i broja negativnih miona je 1,3. Početne pozicije miona na površini olovnog cilindra određene su na sledeći način: prvo se odabere gornja horizontalna strana ili vertikalna strana cilindra, prema verovatnoći da kosmički mion pogodi horizontalnu ili vertikalnu stranu, a zatim se odabere pozicija na datoj površini iz uniformne raspodele. Pravac kretanja miona simpliran je iz raspodele miona po pravcima, u funkciji od zenitnog ugla  $\theta$ , koja je proporcionalna  $\cos^{1.55}\theta$ . Energija miona određena je iz energijske raspodele miona na površini Zemlje, pri čemu se uzimaju oni mioni koji uspeju da prođu kroz 12 m zemljišta. Detaljnija procedura generisanja primarnih događaja i izvođenje raspodele miona po pravcima i energijama može se videti u [4].

Fizički procesi u kojima učestvuju mioni – elektromagnetni i nuklearni – uključeni su u simulaciju kroz predefinisane Geant4 klase QGSP\_BERT\_HP; ova klasa omogućava simulacije interakcija čestica sa velikom preciznošću.

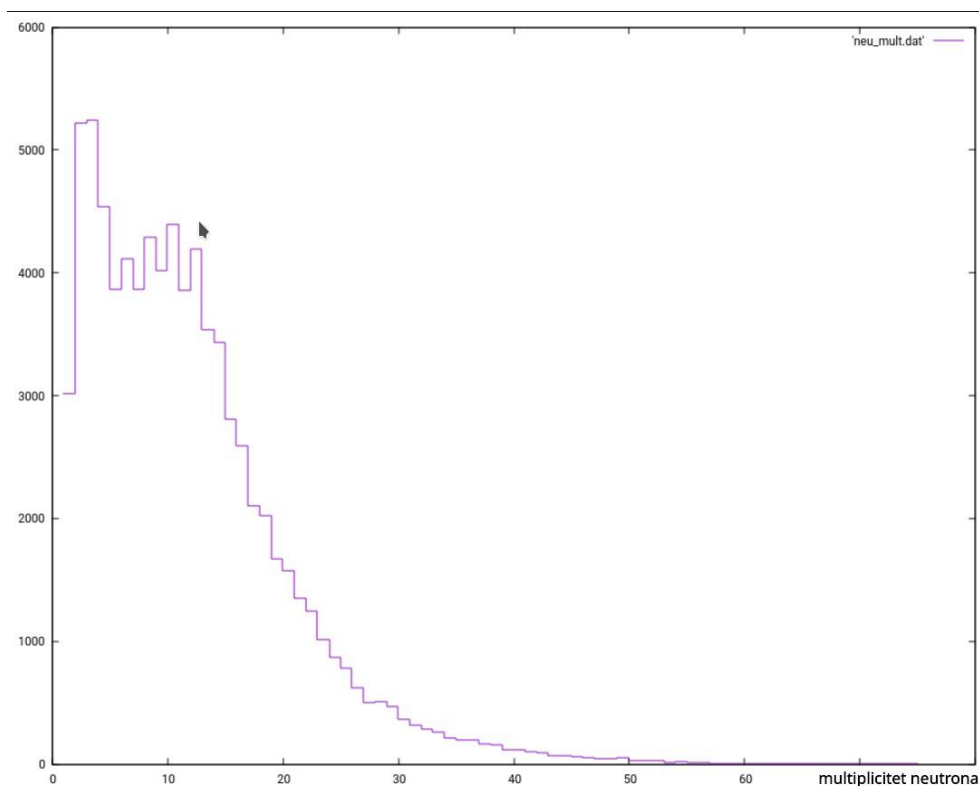
### **3. Rezultati i diskusija**

Prvi cilj simulacije bio je da se odredi broj proizvedenih neutrona u interakcijama miona sa jezgrom olova, po jedinici dužine puta, pri njihovom prolasku kroz olovnu zaštitu germanijumskog detektora. Generisanih primarnih događaja bilo je  $10^8$ ; ovaj broj može biti povezan sa vremenom eksperimentalnih merenja, uzimajući u obzir fluks miona u podzemnoj laboratoriji.

Ukupan broj proizvedenih neutrona bio je 934 000. Odavde je određen prinos neutrona, kao odnos broja neutrona i proizvoda gustine olova i srednje dužine puta miona kroz



olovo. Srednja dužina puta miona je 26,6 cm, a proizvod gustine olova i srednje dužine puta iznosi  $302 \text{ g/cm}^3$ . Dobijena vrednost za prinos neutrona je  $3,1 \times 10^{-5} \text{ neut.}/(\text{gcm}^{-2})$ . Pored prinosa neutrona, određena je raspodela multipliciteta neutrona – broja neutrona proizvedenih u interakciji jednog miona sa olovom. Mion može proizvesti više od jednog neutrona na svom putu kroz olovo, što za rezultat ima više neutronske fonske događaja u detektoru koji potiču od jednog miona. Događaji su vremenski razdvojeni, odnosno detektuju se sa vremenskim razmakom, u zavisnosti od trenutka i mesta produkcije neutrona. Ovi događaji registruju se u detektoru kao signali sa vremenskim kašnjenjem, unutar definisanog vremenskog prozora mionskog događaja. To može poslužiti za selekciju fonskih događaja koji potiču od neutrona indukovanih mionima. Raspodela multipliciteta neutrona prikazana je na slici 3. Najveći broj miona proizvede manje od 10 neutrona u kaskadi, dok srednji multiplicitet neutrona iznosi 11,5. Dobijena raspodela slaže se sa rezultatima ranijih sličnih simulacija [10].



**Slika 3. Raspodela multipliciteta neutrona proizvedenih mionima iz kosmičkog zračenja u olovnoj zaštiti HPGE detektora.**

Rezultati simulacije pokazali su da ovaj metod može biti koristan za procenu produkcije neutrona mionima iz kosmičkog zračenja. On može dati detaljniji uvid u mehanizam produkcije neutrona. Osim toga, rezultati simulacije mogu pomoći u analizi podataka eksperimentalnih merenja, njihovom boljem razumevanju i evaluaciji.

#### 4. Zahvalnica

Ovaj rad finansiran je od Instituta za fiziku u Beogradu kroz projekat Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

**5. Literatura**

- [1] D. Mei, A. Hime. Muon-induced background study for underground laboratories. *Phys. Rev. D* 73, 2006, 053004.
- [2] A. Dragić, D. Joković, R. Banjanac, V. Udovičić, B. Panić, J. Puzović, I. Aničin. Measurement of cosmic ray muon flux in the Belgrade ground level and underground laboratories. *Nucl. Instr. Meth. A* 591, 2008, 470-475.
- [3] M. Savić, A. Dragić, D. Maletić, N. Veselinović, R. Banjanac, D. Joković, V. Udovičić. A novel method for atmospheric correction of cosmic-ray data based on principal component analysis. *Astropart. Phys.* 109, 2019, 1-11.
- [4] D. Joković, A. Dragić, V. Udovičić, R. Banjanac, J. Puzović, I. Aničin. Monte Carlo simulations of the response of a plastic scintillator and an HPGe spectrometer in coincidence. *Appl. Radiat. Isot.* 67, 2009, 719-722.
- [5] A. Dragić, V. Udovičić, R. Banjanac, D. Joković, D. Maletić, N. Veselinović, M. Savić, J. Puzović, I. Aničin. The new set-up in the Belgrade low-level and cosmic-ray laboratory. *Nucl. Techn. Radiat. Prot.* 26, 2011, 181-192.
- [6] A. Dragić, I. Aničin, R. Banjanac, V. Udovičić, D. Joković, D. Maletić, M. Savić, N. Veselinović, J. Puzović. Neutrons produced by muons at 25 mwe. *J. Phys.: Conf. Ser.* 409, 2013 012054.
- [7] S. Agostinelli et al. Geant4 – a simulation toolkit. *Nucl. Instr. Meth. A* 506, 2003, 250-303.
- [8] M. Krmar, J. Hansman, N. Jovančević, N. Lalović, J. Slivka, D. Joković, D. Maletić. A method to estimate a contribution of Ge(n,n') reaction to the low-energy part of gamma spectra of HPGe detectors. *Nucl. Instr. Meth. A* 709, 2013, 8-11.
- [9] J. Nikolić, T. Vidmar, D. Joković, M. Rajačić, D. Todorović. Calculation of HPGe efficiency for environmental samples: comparison of EFFTRAN and GEANT4. *Nucl. Instr. Meth. A* 763, 2014, 347-353.
- [10] L. Reichhart et al. Measurement and simulation of the muon-induced neutron yield in lead. *Astropart. Phys.* 47, 2017, 67-76.

### MONTE CARLO SIMULATION OF THE COSMIC RAY MUON INDUCED NEUTRON PRODUCTION IN THE LEAD SHIELD OF THE GERMANIUM DETECTOR

**Dejan JOKOVIĆ, Dimitrije MALETIĆ, Vladimir UDOVIČIĆ,  
Radomir BANJANAC, Aleksandar DRAGIĆ, Mihailo SAVIĆ,  
Nikola VESELINOVIĆ and David KNEŽEVIĆ**

*Institute of Physics Belgrade, University of Belgrade, Belgrade, Serbia,  
[yokovic@ipb.ac.rs](mailto:yokovic@ipb.ac.rs), [maletic@ipb.ac.rs](mailto:maletic@ipb.ac.rs), [udovicic@ipb.ac.rs](mailto:udovicic@ipb.ac.rs), [banjanac@ipb.ac.rs](mailto:banjanac@ipb.ac.rs),  
[dragic@ipb.ac.rs](mailto:dragic@ipb.ac.rs), [msavic@ipb.ac.rs](mailto:msavic@ipb.ac.rs), [veselinovic@ipb.ac.rs](mailto:veselinovic@ipb.ac.rs), [davidk@ipb.ac.rs](mailto:davidk@ipb.ac.rs)*

#### ABSTRACT

Lead is usually used as a common shielding material for germanium detectors. Cosmic ray muons produce secondary particles in their interactions with lead nuclei, which contribute to overall background radiation detected by germanium detectors. Neutrons produced in muon interactions in lead shield make a significant part of this background component. Cosmic ray induced neutrons are a particular problem in experiments carried out in deep underground laboratories.

In the low-level underground laboratory at Institute of Physics Belgrade, a germanium detector and a muon detector operate in coincidence. This provides studying of different effects in the germanium detector induced by cosmic rays, especially effects originated from the cosmic ray induced neutrons.

Here, the results of Geant4 simulations of the cosmic ray muon induced neutron production in the lead shield of the germanium detector are presented. Estimate of the neutron yield – number of neutrons produced per unit path length – in muon interactions is obtained. The result is  $3.1 \times 10^{-5}$  neutrons/(gcm<sup>-2</sup>). Also, the neutron multiplicity distribution is determined, as a distribution of number of neutrons produced per muon interaction. The average multiplicity is 11.5.

**DUGOVREMENSKA STABILNOST KALIBRACIONIH STANDARDARDA  
RAZLIČITIH MATRIKSA U GAMASPEKTROMETRIJI**

**Mirjana ĐURAŠEVIĆ, Aleksandar KANDIĆ, Ivana VUKANAC,  
Igor ČELIKOVIĆ, Nataša MLADENOVIĆ NIKOLIĆ,  
Tamara MILANOVIĆ i Zorica OBRADOVIĆ**

*Univerzitet u Beogradu, Institut za nuklearne nauke "Vinča", Institut od nacionalnog  
značaja, Beograd, Srbija, [mirad@vin.bg.ac.rs](mailto:mirad@vin.bg.ac.rs), [akandic@vin.bg.ac.rs](mailto:akandic@vin.bg.ac.rs),  
[yukanac@vin.bg.ac.rs](mailto:yukanac@vin.bg.ac.rs), [icelikovic@vin.bg.ac.rs](mailto:icelikovic@vin.bg.ac.rs), [natasa.nikolic@vin.bg.ac.rs](mailto:natasa.nikolic@vin.bg.ac.rs),  
[tmilanovic@vin.bg.ac.rs](mailto:tmilanovic@vin.bg.ac.rs), [zoobradovic71@vin.bg.ac.rs](mailto:zoobradovic71@vin.bg.ac.rs)*

**SADRŽAJ**

*Da bi se postigla tačnost i preciznost dobijenih rezultata pri gamaspektrometrijskom merenju uzoraka iz životne sredine neophodno je obezbediti odgovarajuće kalibracione standarde. Imajući u vidu da i sami standardi vremenom gube na kvalitetu zbog degradacije matriksa, od izuzetne je važnosti praćenje stabilnosti standarda koji se koriste. U ovom radu prikazani su rezultati ispitivanja karakteristika krivih efikasnosti u odnosu na starenje matriksa. Napravljeni su radni kalibracioni standardi sa tri različita matriksa (aktivni ugalj, zemlja i pesak), upakovani u cilindričnu geometriju kutijice od 120 ml i 250 ml i mereni na poluprovodničkom HPGe detektoru. Isti standardi ponovo su mereni nakon četiri godine u kontakt geometriji u odnosu na detektor i izvrnuto sa poklopcem kutijice ka detektoru. Analiza dobijenih rezultata pokazala je odstupanja u vrednostima efikasnosti, što ukazuje na degradaciju svih standarda u smislu narušavanja njihove homogenosti. Takvi standardi se ne mogu smatrati pouzdanim za korišćenje.*

**1. Uvod**

U okviru sistema zaštite životne sredine veliki značaj zauzimaju programi monitoringa i gamaspektrometrijska metoda merenja kao jedna od najzastupljenijih metoda merenja. Određivanje sadržaja radionuklida u uzorcima iz životne sredine gamaspektrometrijskom metodom je zahtevan zadatak, imajući u vidu da se uglavnom radi o niskim koncentracijama. U takvim uslovima još više dolazi do izražaja dobro i precizno određena kriva efisnosti, koja je složena funkcija energije, karakteristika spektrometra, geometrije merenja, zapremine i gustine uzorka. Najbolji slučaj je da matriks merenog uzorka odgovara matriksu standarda. Laboratorije koje se bave ovakvim merenjima trebalo bi da imaju na raspolaganju kalibracione standarde sa matriksima odgovarajućih hemijskih sastava i gustina, pri čemu je obezbeđena sledivost do međunarodnih standarda. Jedna od opcija je kupovina gotovih standarda od laboratorija sertifikovanih za njihovu pripremu. Laboratorije koje se bave gamaspektrometrijom u okviru Instituta za nuklearne nauke "Vinča" opredelile su se za pripremu radnih kalibracionih standarda za one geometrije i matrikse koji se najviše koriste u merenjima.

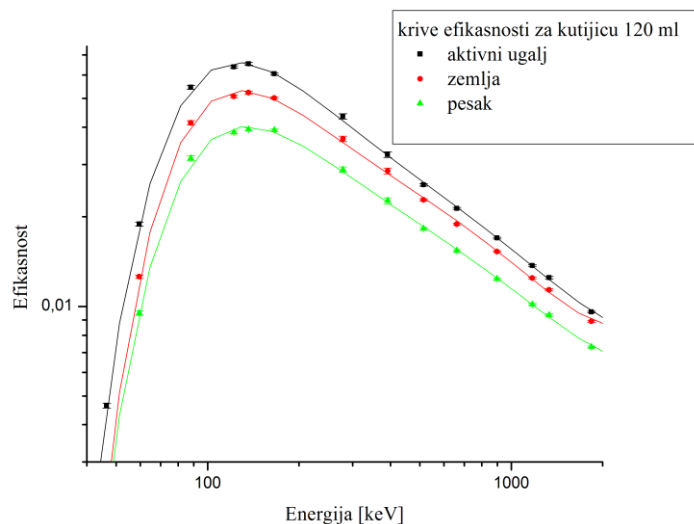
Prvi radni kalibracioni standardi pripremljeni su 2005. godine za matrikse mineralizovane trave, mleka u prahu, zemlje i peska, a stabilnost ovih standard analizirana je posle pet godina. Tada se pokazalo da neki matriksi, kao što je mleko u prahu, pokazuju značajnu degradaciju posle određenog vremenskog perioda [2].

Novi kalibracioni standardi pripremljeni su 2012. godine u skladu sa preporukama Međunarodne agencije za atomsku energiju (International Atomic Energy Agency –

IAEA) , a iskustvo prethodnih analiza uticalo je na izbor matriksa [1, 2]. Dobijene krive efikasnosti korišćene su u rutinskim merenjima, kao i u međunarodnim interkompartivnim merenjima organizovanim od strane Instituta za referentne materijale i merenja (Institute for Reference Materials and Measurements – IRMM) i IAEA. Dobri rezultati postignuti pri ovim interkomparacijama pokazuju da su primenjene metode pripreme radnih kalibracionih standarda i određene krive efikasnosti validne i pouzdane. Nakon četiri godine isti standardi su ponovo mereni, i uočena su određena odstupanja u efikasnosti onih radionuklida koji su mogli da se detektuju. Zbog toga je sprovedena analiza stabilnosti korišćenih standarda, a rezultati te analize su prikazani u ovom radu.

### 2. Priprema kalibracionih standard i merenje standard 2012. godine

Da bi se obuhvatio širok spektar gustina i hemijskih sastava pripremljeni su kalibracioni standardi sa tri vrste matriksa (aktivni ugalj -  $0.45 \text{ g/cm}^3$  , zemlja –  $0.75 \text{ g/cm}^3$  i pesak –  $1.07 \text{ g/cm}^3$ ) u dve geometrije (PVC kutijice od 120 ml i 250 ml). Svi standardi pripremljeni su dodavanjem gravimetrijski određene zapremine razblaženog standardnog sertifikovanog rastvora u određenu količinu aktivnog uglja (metoda po Taskaevoj) [3]. Sertifikovani rastvor sa smešom radionuklida ( $^{241}\text{Am}$ ,  $^{109}\text{Cd}$ ,  $^{139}\text{Ce}$ ,  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{203}\text{Hg}$ ,  $^{113}\text{Sn}$ ,  $^{85}\text{Sr}$  i  $^{88}\text{I}$ ) nabavljen je od Češkog metrološkog instituta (Czech metrology institute - CMI) [4]. Male količine aktivnog uglja sa odgovarajućom količinom sertifikovanog rastvora dodate su u pripremljeni matriks i homogenizovane [5].



**Slika 1. Krive efikasnosti za različite matrikse (aktivni ugalj, zemlja i pesak) za cilindrične uzorke kutijice 120 ml izmerene 2012. godine.**

Svi pripremljeni standardi izmereni su u kontakt geometriji na poluprovodničkom HPGe spektrometru ORTEC GEM-30 (rezolucije: 1.8 keV; relativne efikasnosti: 30 % na 1332.5 keV). Odbroji ispod posmatranih pikova korigovani su na fon (odbroj u blenku), mrtvo vreme i efekat koincidentnog sumiranja. Korekcija na koincidentno sumiranje je izvršena primenom metode Debertin i Schötzig [6]. Nakon analize snimljenih spektara i određivanja efikasnosti na datim energijama, uz korišćenje tabelarnih podataka, dobijene su kalibracione krive ( $\varepsilon = e^{-P(\ln E)}$ ), gde je  $\varepsilon$  efikasnost detekcije,  $E$  energija, a

$P(\ln E)$  polinom petog stepena) [7, 5]. Zavisnost efikasnosti od gustine matriksa (aktivni ugalj, zemlja i pesak) za geometriju cilindrične kutijice od 120 ml prikazana je na slici 1. Krive efikasnosti su pokazale da efikasnost detekcije snažno zavisi od gustine matriksa standarda.

### 3. Merenja standarda u 2016. godini i analiza dobijenih rezultata

Tokom 2016. godine neki od zapreminskih standarda koji su pripremljeni 2012. godine ponovo su mereni na istom detektoru. Merenja su izvršena pod istim mernim uslovima (geometrija merenja, pojačanje i visoki napon) kao i 2012 godine. Sa dobijenih spektara analizirani su sledeći radionuklidi i njihove energije ( $^{241}\text{Am}$  – 59.54 keV;  $^{57}\text{Co}$  – 122.06 keV;  $^{137}\text{Cs}$  – 661.66 keV;  $^{60}\text{Co}$  – 1173.237 keV i 1332.501 keV), dok su drugi kratkoživuži radionuklidi davali manje definisane pikove (sa značajnom statističkom greškom) u spektrima, tako da nisu uzeti u razmatranje. Rezultati su, ipak, ukazali na izvesnu degradaciju standarda, jer su uočene neke neočekivane promene u dobijenim vrednostima efikasnosti. Da bi se ispitale karakteristike standarda (dugovremenska stabilnost), svi posmatrani standardi su izmereni i izvrnuti naopačke (poklopac kutijice do detektora). U Tabeli 1. su prikazane vrednosti efikasnosti za posmatrane energije i standarde iz 2012. godine i 2016. godine u svim geometrijama merenja.

Analiza dobijenih rezultata obuhvata poređenje dobijenih efikasnosti za standarde merene 2016. godine sa efikasnostima istih standarda merenih 2012. godine, i poređenje efikasnosti istih standard merenih normalno i naopačke (Tabela 1). Uočeno je da su vrednosti efikasnosti dobijene u 2016. godini bile uglavnom niže u poređenju sa onima dobijenim u 2012. godini, osim kod standarda peska gde su sve vrednosti više. Više vrednosti efikasnosti ukazuju na to da je došlo do taloženja radioaktivnosti na dno kutijice, dok je kod drugih standarda došlo do grupisanja čestica negde oko sredine kutijice. Najmanje odstupanje je uočeno kod standarda zemlje 120 ml (1.3 %), dok je najveće odstupanje kod standarda pesak 250 ml (12.8 %). Higroskopnost materijala koji se koristi kao matriks standarda je takođe bitna karakteristika koja utiče na dugovremensku stabilnost standard. Svi materijali su manje ili više higroskopi, što dovodi do zgrudvavanja matriksa ili bubrenja čestica, što je slučaj kod peska. Poređenje efikasnosti istih standarda merenih normalno i naopačke ukazuje na narušenu homogenost standarda. Dobijeni rezultati pokazuju da su najmanja odstupanja kod standarda zemlje 120 ml (ne prelaze 5 %).

Ako posmatramo zavisnost efikasnosti od gustine matriksa, teško je utvrditi da li se i koliko ta zavisnost promenila, iz razloga što su 2016. godine analizirane efikasnosti sprovedene za mali broj energija gama zračenja.

### 4. Zaključak

Radni kalibracioni standardi različitih matriksa (aktivni ugalj, zemlja i pesak) i geometrije cilindrične kutijice od 120 ml i 250 ml pripremljeni su i korišćeni 2012. godine, a ponovo izmereni 2016. godine. Analizom dobijenih rezultata zaključeno je da dobijene vrednosti efikasnosti pokazuju određena odstupanja u odnosu na vrednosti kada su radni standardi napravljeni, što dovodi do degradacije krive efikasnosti dobijene korišćenjem takvih standard. Takvi standardi se, nakon određenog vremenskog perioda, ne mogu smatrati pouzdanim, posebno kada se zahtevaju precizna i tačna merenja.

**Tabela 1. Efikasnosti standarda merenih 2012 i 2016 u normalnoj i izvrnutoj poziciji kao i odstupanja u procentima.**

<i>E</i> [keV]	$\epsilon_{norm}$ (2012)	$\epsilon_{norm}$ (2016)	$\epsilon_{izv}$ (2016)	$\Delta_1$ [%]*	$\Delta_2$ [%]**
Standard aktivni ugalj kutijica 120 ml					
59,54	0,018901	0,019474	0,020020	3,0	2,8
122,06	0,063840	0,061240	0,061872	4,1	1,0
661,66	0,021332	0,022158	0,020589	3,9	7,1
1173,23	0,013725	0,012852	0,012149	6,4	5,5
1332,49	0,012489	0,011586	0,010993	7,2	5,1
Standard aktivni ugalj kutijica 250 ml					
59,54	0,012230	0,012409	0,012814	1,5	3,3
122,06	0,042530	0,041726	0,044660	1,9	7,0
661,66	0,015003	0,015388	0,016067	2,8	4,4
1173,23	0,009506	0,009203	0,009622	3,2	4,6
1332,49	0,008606	0,008337	0,008688	3,1	4,2
Standard zemlja kutijica 120 ml					
59,54	0,012592	0,012762	0,012601	1,3	1,3
122,06	0,050778	0,049789	0,050635	1,9	1,7
661,66	0,018877	0,019386	0,018541	2,7	4,4
1173,23	0,012458	0,011567	0,011133	7,1	3,8
1332,49	0,011373	0,010530	0,010094	7,4	4,1
Standard zemlja kutijica 250 ml					
59,54	0,008400	0,008076	0,007635	3,9	5,5
122,06	0,038064	0,035394	0,032516	7,0	8,1
661,66	0,015289	0,014354	0,013635	6,1	5,0
1173,23	0,009765	0,008800	0,008323	9,9	5,4
1332,49	0,008892	0,008000	0,007593	10,0	5,1
Standard pesak kutijica 120 ml					
59,54	0,009512	0,010431	0,009583	9,7	8,1
122,06	0,038422	0,041868	0,040340	9,0	3,6
661,66	0,015394	0,016437	0,016001	6,8	2,7
1173,23	0,010158	0,009845	0,009810	3,1	0,3
1332,49	0,009351	0,008978	0,008925	4,0	0,6
Standard pesak kutijica 250 ml					
59,54	0,006272	0,006744	0,007281	7,5	8,0
122,06	0,027187	0,030679	0,028553	12,8	7,0
661,66	0,011541	0,012351	0,012193	7,0	1,3
1173,23	0,007471	0,007776	0,007600	4,1	2,3
1332,49	0,006824	0,007065	0,006924	3,6	2,0

$$* \Delta_1 = \left| \frac{\epsilon_{norm}(2012) - \epsilon_{norm}(2016)}{\epsilon_{norm}(2012)} \right| \times 100$$

$$** \Delta_2 = \left| \frac{\epsilon_{norm}(2016) - \epsilon_{izv}(2016)}{\epsilon_{norm}(2016)} \right| \times 100$$

### 5. Zahvalnica

Rad je finansijski podržan od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije (Aneks ugovora, evidencioni broj: 451-03-9/2021-14/ 200017).

### 6. Literatura

- [1] *Measurement of Radionuclides in Food and Environment*, A Guidebook. Technical Reports Series No. 295, IAEA, Vienna, 1989.
- [2] A. Kandić, I. Vukanac, M. Đurašević, D. Novković, B. Šešlak, Z. Milošević, On the long-term stability of calibration standards in different matrices, *Applied Radiation and Isotopes* 70, 2012, 1860–1862.
- [3] M. Taskaeva, E. Taskaev, I. Penev, On the preparation of efficiency standards for gamma -ray spectrometers, *Applied Radiation and Isotopes* 47, 1996, 981–990.
- [4] *Radioactive Standard Solutions, ER X, Cert. No. 9031-OL- 426/12*, CMI (Czech Metrological Institute), Prague, 2012.
- [5] I. Vukanac, M. Đurašević, A. Kandić, D. Novković, L. Nadderđ, Z. Milošević, Experimental determination of the HPGe spectrometer efficiency curve. *Applied Radiation and Isotopes* 66, 2008, 792–795.
- [6] K. Debertin, U. Schötzig, *Bedeutung von Summationskorrekturen bei der Gammastrahlen-Spektrometrie mit Germaniumdetektoren*, PTB-Bericht PTBRa-24, Braunschweig, 1990.
- [7] Decay Data Evaluation Project. [http://www.nucleide.org/DDEP\\_WG/DDEPdata.htm](http://www.nucleide.org/DDEP_WG/DDEPdata.htm), 2017.



**ON THE LONG-TERM STABILITY OF THE CALIBRATION STANDARDS IN  
DIFFERENT MATRICES FOR GAMMA-RAY SPECTROMETRY**

**Mirjana ĐURAŠEVIĆ, Aleksandar KANDIĆ, Ivana VUKANAC,  
Igor ČELIKOVIĆ, Nataša MLADENOVIĆ NIKOLIĆ,  
Tamara MILANOVIĆ and Zorica OBRADOVIĆ**

*University of Belgrade, "Vinca" Institute of Nuclear Sciences, National Institute of the  
Republic of Serbia, Belgrade, Serbia, [mirad@vin.bg.ac.rs](mailto:mirad@vin.bg.ac.rs), [akandic@vin.bg.ac.rs](mailto:akandic@vin.bg.ac.rs),  
[yukanac@vin.bg.ac.rs](mailto:yukanac@vin.bg.ac.rs), [icelikovic@vin.bg.ac.rs](mailto:icelikovic@vin.bg.ac.rs), [natasa.nikolic@vin.bg.ac.rs](mailto:natasa.nikolic@vin.bg.ac.rs),  
[tmilanovic@vin.bg.ac.rs](mailto:tmilanovic@vin.bg.ac.rs), [zobradovic71@vin.bg.ac.rs](mailto:zobradovic71@vin.bg.ac.rs)*

**ABSTRACT**

The gammaspectrometric measurement of the environmental samples requires the use of appropriate calibration standards in order to achieve the accuracy and precision of the obtained results. Taking into account that the standards lose their quality over time due to the degradation of the matrix, it is extremely important to keep tracking their stability. Comprehensive reconsideration on efficiency curves with respect to the ageing of calibration standards is presented in this paper. Spiked laboratory standards of different matrices (active coal, soil and sand) were prepared in two measurement geometries, PVC cylindrical 120 ml and 250 ml boxes. The same standards were measured after four years in contact geometry on the detector and upside down (box cover towards the detector). The analysis of the obtained results showed discrepancies in efficiency values and it indicates that the homogeneity of standards is disturbed. Such standards are not reliable for use.

POREĐENJE FUNKCIJA ODGOVORA CR-39 DETEKTORA ZA DETEKCIJU ALFA ZRAČENJA

Jelena STAJIĆ<sup>1</sup>, Biljana MILENKOVIĆ<sup>1</sup>, Nenad STEVANOVIĆ<sup>2</sup>,  
Vladimir M. MARKOVIĆ<sup>2</sup> i Dragoslav NIKEZIĆ<sup>2,3</sup>

1) Univerzitet u Kragujevcu, Institut za Informacione Tehnologije, Kragujevac, Srbija, [stajicjelena11052012@gmail.com](mailto:stajicjelena11052012@gmail.com), [bmilenkovic@kg.ac.rs](mailto:bmilenkovic@kg.ac.rs)

2) Univerzitet u Kragujevcu, Prirodno-matematički fakultet, 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)

3) Državni univerzitet u Novom Pazaru, Novi Pazar, Srbija, [nikezic@kg.ac.rs](mailto:nikezic@kg.ac.rs)

SADRŽAJ

U radu je prikazano poređenje V funkcija koje se u literaturi najčešće koriste pri analizi detekcije alfa zračenja pomoću CR-39 detektora. Ranije razvijen program TRACK.VISION2.1, koji omogućava vizuelizaciju tragova u čvrstim trag detektorima, upotrebljen je za procenu kritičnog ugla detekcije alfa čestica. Varirani su uglovi i upadne energije čestica i predviđana je mogućnost njihove detekcije, na osnovu postavljenog kriterijuma vidljivosti. Rezultati su prikazani za pet odabranih V funkcija i diskutovano je njihovo međusobno slaganje. Dati su parametri fitovanja funkcije kritičnog ugla u zavisnosti od upadne energije za nedavno publikovanu V funkciju. Nova funkcija je ugrađena i u program za proračun kalibracionog koeficijenta CR-39 detektora u radonskoj difuzionoj komori. Izdvojene su V funkcije koje daju najbolje i najlošije slaganje rezultata teorijskih proračuna sa eksperimentalnim zapažanjima. Nova funkcija predviđa niže vrednosti kalibracionog koeficijenta u poređenju sa rezultatima dobijenim na osnovu eksperimentalnog ozračivanja CR-39 detektora u radonskoj difuzionoj komori, pri poznatoj koncentraciji radona.

1. Uvod

Čvrsti trag detektori (eng. *Solid State Nuclear Track Detectors* - SSNTD) nalaze široku primenu u različitim oblastima nauke i tehnologije, a prvenstveno u oblasti monitoringa i zaštite od zračenja. Efikasna primena ovih detektora se zasniva na eksperimentalnom i teorijskom proučavanju razvoja tragova u SSNTD materijalima, kao i na mogućnosti predviđanja geometrije traga nakon nagrizanja pod zadatim uslovima.

Jedan od najvažnijih parametara u teorijskom modelovanju mehanizma formiranja tragova u čvrstim trag detektorima je V funkcija [1] koja je u literaturi poznata i još kao funkcija osetljivosti ili funkcija odgovora detektora. Ova funkcija predstavlja odnos brzine nagrizanja detektora duž traga ( $V_t$ ) i brzine nagrizanja neoštećene površine detektora ( $V_b$ ), a uslov za formiranje vidljivih tragova je da je njena vrednost veća od 1 ( $V = \frac{V_t}{V_b} > 1$ ). Brzine  $V_b$  i  $V_t$  zavise od uslova nagrizanja tj. od temperature,

koncentracije i vrste rastvora, a brzina  $V_t$  zavisi još i od mase, naelektrisanja i energije čestice koja je napravila oštećenja duž svoje putanje u materijalu detektora. Pri određenim uslovima nagrizanja, brzina  $V_b$  se može smatrati konstantnom [2] i određivati merenjem dijametara tragova [3-6] ili relativno jednostavnim metodama poput merenja promene mase detektora (gravimetrijska metoda) ili debljine skinutog sloja [7,8]. Brzina  $V_t$  se značajno menja duž traga, pa je njeno određivanje obično komplikovanije, a najčešće se zasniva na primeni različitih metoda merenja dijametara, dužine ili profila tragova [5,9,10].

U ovom radu je prikazano poređenje nekoliko V funkcija koje su dostupne u literaturi, a koje se najčešće koriste pri teorijskoj analizi razvoja tragova alfa čestica u CR-39 detektorima. Odabrano je pet V funkcija koje su primenjene za teorijsku procenu kritičnog ugla detekcije i kalibracionog koeficijenta detektora postavljenog na dnu radonske difuzione komore, a rezultati su upoređeni sa eksperimentalno dobijenim vrednostima.

### 2. Materijali i metode

Funkcije kritičnih uglova detekcije alfa čestica u CR-39 detektorima su dobijene korišćenjem programa TRACK\_VISION2.1 [11]. Ovaj program predstavlja unapređenu verziju programa TRACK\_VISION kog su Nikezić i Yu razvili još 2008. godine [12]. Program omogućava vizuelizaciju tragova u čvrstim trag detektorima, simulirajući prolaz svetlosti kroz tragove na osnovu zakona geometrijske optike. TRACK\_VISION2.1 za CR-39 detektor nudi mogućnost odabira jedne od pet V funkcija izraženih preko rezidualnog dometa  $R'$  (u  $\mu\text{m}$ ) po sledećem redosledu:

1)  $V_1$  – funkcija koju su dobili Green i saradnici 1982. godine [3,4], merenjem dijametara tragova alfa čestica pomoću optičkog mikroskopa:

$$V_1 = 1 + (11.45e^{-0.339 \cdot R'} + 4e^{-0.044 \cdot R'}) (1 - e^{-0.58 \cdot R'}) \quad (1)$$

2)  $V_2$  – funkcija koju su predložili Brun i saradnici 1999. godine [13]:

$$V_2 = 1 + e^{-0.1 \cdot R' + 1} - e^{-1 \cdot R' + 1.27} + e^{1.27} - e^1 \quad (2)$$

3)  $V_3$  – funkcija koju su 2005. godine dobili Yu i saradnici merenjem visine replika tragova alfa čestica pomoću AFM uređaja [14]:

$$V_3 = 1 + e^{-0.06082 \cdot R' + 1.119} - e^{-0.8055 \cdot R' + 1.119} \quad (3)$$

4)  $V_4$  – najnovija funkcija koju je 2020. godine publikovao Al-Jubbori, a dobijena je merenjem dužine tragova korišćenjem *Optika B-193* mikroskopa [15]:

$$V_4 = 1 + e^{-0.098 \cdot R' + 1.86 - 37.78/R' + 36.98/R'^{0.98}} \quad (4)$$

5)  $V_5$  – funkcija koju je predložio Hermsdorf u radu iz 2009. godine na osnovu analogije između V funkcije i funkcije zaustavne moći [16]:

$$V_5 = 1 + \frac{390}{(R'+2)^{2.35}} \ln(R'+1) (1 - e^{-R'/5}) + \frac{R'}{80} \quad (5)$$

Program Track\_VISION2.1 za zadate energije i upadne uglove čestica daje izgled traga, a dubina i dijometri traga se takođe dobijaju kao izlazni parametri. U cilju određivanja kritičnog ugla detekcije, upadni uglovi alfa čestica su varirani sa korakom od  $1^\circ$ , dok su energije varirane u intervalu od 0.5 do 8 MeV, sa korakom od 0.5 MeV. Tragovi čiji su dijometri i dubine bili veći od  $1 \mu\text{m}$  smatrani su vidljivim, mada se kriterijum vidljivosti može definisati i na druge načine.

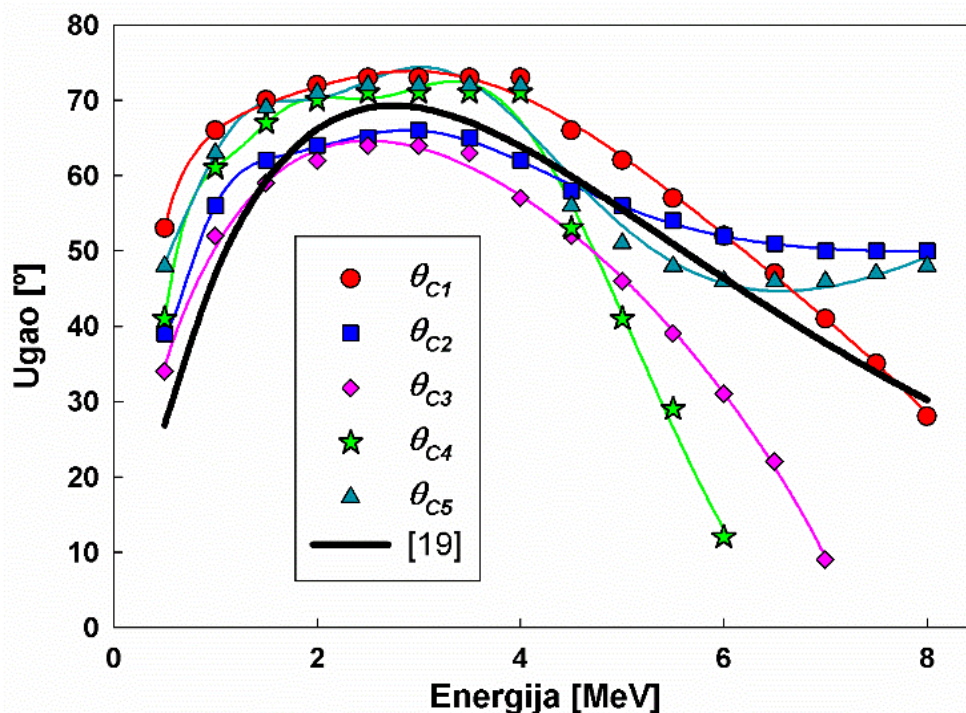
U cilju eksperimentalnog određivanja kalibracionog koeficijenta, konusna difuziona komora donjeg poluprečnika 2.4 cm, gornjeg poluprečnika 3.5 cm i visine 8.2 cm bila je

izložena radonu srednje koncentracije od oko  $3400 \text{ Bq m}^{-3}$  (koncentracija je merena urađajem RAD7). Na podu komore je bio postavljen CR-39 detektor dimenzije  $2 \times 2 \text{ cm}^2$ , a komora je sa gornje strane pokrivena filter-papirom. Nakon izlaganja, detektor je podvrgnut hemijskom nagrivanju u rastvoru NaOH koncentracije 6.25 N, na temperaturi od  $70 \text{ }^\circ\text{C}$ , tokom 5 h. Tragovi su brojani pod mikroskopom, slučajnim odabirom preko 50 vidnih polja na površini detektora. Kalibracioni koeficijent je izračunat na osnovu procenjene gustine tragova, srednje koncentracije radona i vremena izlaganja. Za iste uslove nagrivanja i dimenzije komore i detektora, izvršena je teorijska procena kalibracionog koeficijenta korišćenjem programa *CR39\_Sensitivity* napisanog u *Fortran90* programskom jeziku [17].

### 3. Rezultati i diskusija

#### 3.1 Kritični ugao

Na Slici 1 prikazani su kritični uglovi detekcije  $\theta_C$  u zavisnosti od energije čestica, dobijeni primenom prethodno navedenih  $V$  funkcija. Važno je napomenuti da su prikazani uglovi posmatrani u odnosu na normalu na površinu detektora. Sa slike se može uočiti da je oblik svih pet funkcija sličan pri nižim upadnim energijama čestica, maksimalne vrednosti kritičnog ugla se uočavaju na energijama između 2 i 4 MeV, dok za energije iznad 4 MeV dolazi do značajnijeg odstupanja kako u vrednostima, tako i u obliku funkcija. Funkcija  $\theta_{C4}$ , dobijena na osnovu nove funkcije  $V_4$ , ima relativno visoke vrednosti i prati funkciju  $\theta_{C1}$  do energije od približno 4 MeV, ali nakon toga naglo opada, pa već čestice sa energijama iznad 6 MeV ne zadovoljavaju postavljeni kriterijum vidljivosti čak ni pri ortogonalnom upadu na površinu detektora.



Slika 1. Kritični uglovi detekcije dobijeni korišćenjem TRACK\_VISION2.1 softvera i odgovarajućih  $V$ -funkcija ( $V_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, 5$ ); puna linija predstavlja funkciju koju su eksperimentalno dobili Calamosca i saradnici [19].

Na Slici 1 je prikazano i fitovanje dobijenih vrednosti kritičnih uglova izrazom:

$$\theta_c(E) = \sum_{i=1}^5 a_i \cdot E^{b_i} \cdot e^{-c_i E} \quad (6)$$

Parametri  $a_i$ ,  $b_i$  i  $c_i$  ( $i = 1, 2, \dots, 5$ ) za funkciju  $\theta_{C4}$ , koja odgovara novoj funkciji  $V_4$ , dati su u Tabeli 1, dok se parametri fitovanja za preostale četiri funkcije mogu pronaći u radu [18].

**Tabela 1. Parametri funkcije kritičnog ugla  $\theta_{C4}$  koji odgovara funkciji  $V_4$ .**

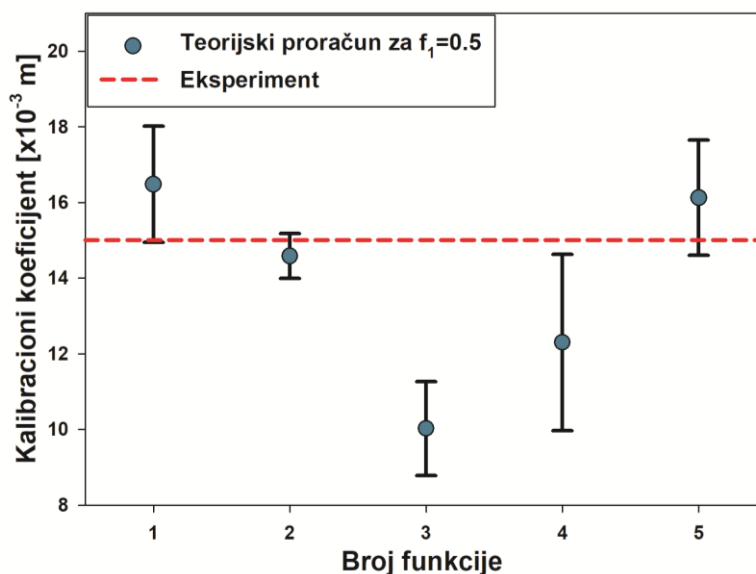
	1	2	3	4	5
<b>a</b>	1088.744	-0.1662	1268.9729	6.6735	-0.5975
<b>b</b>	9.1507	3.5065	2.6523	7.5144	-86.9132
<b>c</b>	4.8754	0.3041	3.1961	2.0088	317.998

Na Slici 1 je punom linijom predstavljena i funkcija kritičnog ugla koju su Calamosca i saradnici dobili fitovanjem eksperimentalnih podataka [19]. Za niže energije ( $< 1$  MeV), eksperimentalno dobijene vrednosti su ispod teorijskih predviđanja, što može biti posledica loše definisanog kriterijuma vidljivosti. Za upadne energije veće od 4 MeV, funkcije  $\theta_{C3}$  i  $\theta_{C4}$  znatno potcenjuju eksperimentalna zapažanja.

### 3.2 Kalibracioni koeficijent

Na Slici 2 su predstavljeni kalibracioni koeficijenti dobijeni iz programa *CR39\_Sensitivity* korišćenjem pet  $V$  funkcija. Za svaku  $V$  funkciju je prikazan opseg vrednosti koji se dobija u zavisnosti od zapreminske frakcije kratkoživećeg radonovog potomka  $^{218}\text{Po}$  (zapreminska frakcija  $f_1$  je frakcija  $^{218}\text{Po}$  koja se raspada u zapremini komore, pre taloženja na površinama). Kružni simboli predstavljaju koeficijente dobijene zadavanjem vrednosti  $f_1=0.5$  za zapreminsku frakciju, dok se donje i gornje granice opsega odnose na frakciju  $f_1=0$  i  $f_1=1$ , respektivno. Isprekidanom crvenom linijom je na istom grafiku prikazana i vrednost kalibracionog koeficijenta procenjena na osnovu eksperimentalnih rezultata.

Na osnovu Slike 2 može se uočiti da eksperimentalno dobijena vrednost kalibracionog koeficijenta ulazi u opseg vrednosti dobijenih teorijskim proračunom za funkcije  $V_1$ ,  $V_2$  i  $V_5$ . S obzirom da je ranije utvrđeno da je zapreminska frakcija  $^{218}\text{Po}$  u radonskoj difuzionoj komori  $< 0.5$ , a neka istraživanja upućuju na to da se  $^{218}\text{Po}$  gotovo potpuno deponuje pre raspada tj.  $f_1 \rightarrow 0$  [18], može se zaključiti da funkcije  $V_1$  i  $V_5$  daju najbolje slaganje teorijskih predviđanja sa realnim zapažanjima. Ovaj zaključak je u saglasnosti sa prethodnim istraživanjima [18]. Nasuprot tome, nova funkcija  $V_4$ , kao i funkcija  $V_3$ , daje rezultate koji su znatno niži od eksperimentalno dobijene vrednosti.



**Slika 2. Rezultati eksperimenta i teorijskog proračuna kalibracionog koeficijenta CR-39 detektora za različite oblike V funkcija.**

#### 4. Zaključak

Pet V funkcija je poređeno na osnovu proračuna kritičnog ugla detekcije i kalibracionog koeficijenta CR-39 detektora u radonskoj difuzionoj komori. Testirana je i nedavno publikovana nova V funkcija ( $V_4$ ). Na osnovu poređenja teorijskog i eksperimentalnog proračuna kalibracionog koeficijenta, funkcije  $V_1$  i  $V_5$  i dalje daju najbolje rezultate. Nova funkcija  $V_4$  teorijski predviđa vrednosti koje su niže od eksperimentalnih.

#### 5. Zahvalnica

Ovaj rad je podržan od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja (broj ugovora: 451-03-9/2021-14/200378 i 451-03-9/2021-14/200122).

#### 6. Literatura

- [1] D. Nikezic, D. Kostic. Simulation of the track growth and determining the track parameters. *Radiat. Meas.* 28, 1997, 185–190.
- [2] M. Fromm, F. Membrey, A. Chambaudet, R. Saouli, A. El-Rahamany. A study of CR-39 bulk etch properties under various temperature and concentration conditions to modelize the dissolution rate. *Nucl. Tracks Rad. Meas.* 19(1-4), 199, 1169–170.
- [3] P.G. Green, A.G. Ramli, A.R. Al-Najjar, F. Abu-Jarad, S.A. Durrani. A study of bulk etch rates and track-etch rates in CR-39. *Nucl. Instrum. Methods* 203, 1982, 551–559.
- [4] Durrani, S.A.; Bull, R.K. *Solid State Nuclear Track Detection. Principles, Methods and Applications*; Pergamon Press: Oxford, UK, 1987.
- [5] M. A. Ranaa, I.E. Qureshi. Studies of CR-39 etch rates. *Nucl. Instrum. Meth. B* 98, 2002, 129–134.
- [6] E.M. Awad, M. A. Rana, Mushtaq Abed Al-Jubbori. Bulk etch rates of CR-39 at high etchant concentrations: diffusion limited etching. *Nucl. Sci. Tech.*, 2020, 31:118

- [7] Malik, E.U. Khan, I.E. Qureshi, S.N. Husaini, M. Sajid, S. Karim, K. Jamil, Swelling in CR-39 and its effect on bulk etch-rate, *Radiat. Meas.* 35, 2002, 301 – 305.
- [8] C. Papachristodoulou, D. Patiris, K.G. Ioannides. Determination of bulk etch rate for CR-39 nuclear track detectors using an X-ray fluorescence method. *Nucl. Instrum. Meth. B* 264, 2007, 177–182.
- [9] B. Dörschel, D. Hermsdorf, K. Kadner, S. Starke. Variation of the track etch rate along the trajectories of light ions in CR-39. *Radiat. Meas.* 35, 2002, 177–182.
- [10] D. Hermsdorf, M. Hunger. Determination of track etch rates from wall profiles of particle tracks etched in direct and reversed direction in PADC CR-39 SSNTDs. *Radiat. Meas.* 44, 2009, 766–774.
- [11] D. Nikezic, J.M. Stajic, K.N. Yu. Updates to TRACK\_TEST and TRACK\_VISION Computer Programs. *Polymers* 13, 2021, 560.
- [12] D. Nikezic, K.N. Yu. Computer program TRACK\_VISION for simulating optical appearance of etched tracks in CR-39 nuclear track detectors. *Comput. Phys. Commun.* 178, 2008, 591–595.
- [13] C. Brun, M. Fromm, M. Jouffroy, P. Meyer, J.E. Groetz, F. Abel, et al. Intercomparative study of the detection characteristics of the CR-39 SSNTD for light ions: Present status of the Besancon—Dresden approaches. *Radiat. Meas.* 31, 1999, 89–98.
- [14] K.N. Yu, F.M.F. Ng, D. Nikezic, Measuring depths of sub-micron tracks in a CR-39 detector from replicas using atomic force microscopy. *Radiat. Meas.* 40, 2005, 380–383.
- [15] M.A. Al-Jubbori. V-function to investigate tracks of the alpha particle irradiated CR-39 detector. *Radiat. Meas.* 136, 2020, 106388.
- [16] D. Hermsdorf. Evaluation of the sensitivity function V for registration of  $\alpha$ -particles in PADC CR-39 solid state nuclear track detector material. *Radiat. Meas.* 44, 2009, 283–288.
- [17] D. Nikezic, K.N. Yu, J.M. Stajic. Computer program for the sensitivity calculation of a CR-39 detector in a diffusion chamber for radon measurements. *Rev. Sci. Instrum.* 85, 2014, 022102.
- [18] J.M. Stajic, V.M. Markovic, B. Milenkovic, N. Stevanovic, D. Nikezic. Distribution of alpha particle tracks on CR-39 detector in radon diffusion chamber. *Radiat. Phys. Chem.* 181, 2021, 109340.
- [19] M. Calamosca, S. Penzo, G. Gualdrini. Experimental determination of CR-39 counting efficiency to  $\alpha$  particles to design the holder of a new radon gas dosimeter. *Radiat. Meas.* 36, 2003, 217–219.

**COMPARISON OF CR-39 RESPONSE FUNCTIONS FOR ALPHA PARTICLE  
DETECTION**

**Jelena STAJIĆ<sup>1</sup>, Biljana MILENKOVIĆ<sup>1</sup>, Nenad STEVANOVIĆ<sup>2</sup>,  
Vladimir M. MARKOVIĆ<sup>2</sup> and Dragoslav NIKEZIĆ<sup>2,3</sup>**

- 1) *University of Kragujevac, Institute for Information Technologies, Kragujevac, Serbia,*  
[stajicjelenal1052012@gmail.com](mailto:stajicjelenal1052012@gmail.com), [bmilenkovic@kg.ac.rs](mailto:bmilenkovic@kg.ac.rs)
- 2) *University of Kragujevac, Faculty of Science, 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)
- 3) *The State University of Novi Pazar, NoviPazar, Serbia,* [nikezic@kg.ac.rs](mailto:nikezic@kg.ac.rs)

**ABSTRACT**

The paper presents a comparison of V functions that are commonly used in the analysis of alpha particle detection by CR-39 detector. Previously developed computer program called TRACK.VISION2.1 which simulates the visualization of tracks in solid state nuclear track detectors, was used to estimate critical angles for alpha particle detection. Particle incident energies and angles were varied and the possibility of particle detection was considered based on the visibility criterion. The results obtained for five V functions were presented and compared. Fitting parameters for expressing critical angle of detection in relation to particle incident energy were given for recently published V function. The new function was also implemented in the program which calculates the calibration coefficient of CR-39 detector in radon diffusion chamber. V functions that provided the best and the worst agreement of theoretical results with the experimental observations were found. Radon calibration coefficient obtained by the new function was lower than the one obtained from the experiment of exposing CR-39 detector to known concentration of radon in a diffusion chamber.



## INFLUENCE OF REFERENCE FIELD SPECTRA ON CALIBRATION OF FIELD CLASS DOSIMETERS

Miloš ŽIVANOVIĆ<sup>1</sup>, Amra ŠABETA<sup>2</sup>,  
Nikola KRŽANOVIĆ<sup>1</sup>, Vedrana MAKARIĆ<sup>2</sup>, Miloš ĐALETIĆ<sup>1</sup>,  
Milica STUPAR<sup>2</sup> and Srbojjub STANKOVIĆ<sup>1</sup>

1), „VINČA” Institute of Nuclear Sciences - National Institute of the Republic of Serbia, University of Belgrade, Belgrade, Serbia, [milosz@vinca.rs](mailto:milosz@vinca.rs), [krzanovic@vinca.rs](mailto:krzanovic@vinca.rs), [djaletic@vinca.rs](mailto:djaletic@vinca.rs), [srbas@vinca.rs](mailto:srbas@vinca.rs)

2) Institute of Metrology of Bosnia and Herzegovina, Sarajevo, Bosnia i Hercegovina, [amra.sabeta@met.gov.ba](mailto:amra.sabeta@met.gov.ba), [vedrana.makaric@met.gov.ba](mailto:vedrana.makaric@met.gov.ba), [milica.stupar@met.gov.ba](mailto:milica.stupar@met.gov.ba)

### ABSTRACT

*Active electronic dosimeters are usually calibrated in Secondary Standards Dosimetry Laboratories in reference photon fields, with the uncertainty which is typically around 5 % ( $k=2$ ). Reference fields are established in accordance with relevant international standards – usually ISO 4037 for photon radiation. Some differences in spectra between different laboratories are unavoidable, but the effect on reference dose rates is well studied and within the above mentioned measurement uncertainty, and this is confirmed by existing interlaboratory comparisons. However, many field class dosimeters have poor energy dependence, especially in the energy range below 100 keV, which could cause large differences in calibration factors determined in different calibration laboratories under nominally the same conditions. This may also have implications for dosimeter testing or verification. In this paper, preliminary results obtained in two different calibration laboratories are presented.*

### 1. Introduction

Active personal and ambient dosimeters are commonly used in radiation protection. Most of these instruments measure operational quantities such as personal dose equivalent and ambient dose equivalent, but in some countries other quantities are still used. These dosimeters are calibrated in most cases in Secondary Standards Dosimetry Laboratories (SSDL), which can usually provide measurement uncertainty of around 5 % ( $k=2$ ). This measurement uncertainty represents the best measurement capabilities, and it is in most cases based on the calibration of reference class vented ionization chambers, which are high quality dosimeters built for use in laboratory conditions. However, field dosimeters are usually simpler and more robust, but on the other hand have worse metrological properties – including repeatability, linearity and energy dependence. Some dosimeters, such as non-compensated Geiger–Müller (GM) counters can have very high overresponse for low energy photons below 100 keV, by more than several hundred percent [1-3]. Most of the active personal dosimeters have energy dependence in accordance with relevant standards, but still the differences in response for different radiation qualities are usually several tens of percents [4]. The situation is similar with passive dosimeters, which can be used for personal and ambient monitoring, and can be compensated or non-compensated. Non-compensated passive dosimeters have energy dependence on par with non-compensated GM counters [5]. Use of these dosimeters in the field measurements, even when calibrated, can cause very high measurement uncertainties. Furthermore, pronounced energy dependence can cause calibration factors determined by different SSDLs to be significantly different,

even though both SSDLs have nominally the same radiation qualities established and in compliance with relevant standards – usually ISO 4037-1 [6]. The conformity of established radiation qualities to the requirements of the standard is checked by participation in interlaboratory comparisons in terms of air kerma [7], or operational quantities (such as EURAMET DOSEtrace comparison [8]), which are conducted using vented ionization chambers, and by validation of radiation qualities, which is usually done by HVL measurements [6].

In this study, one ionization chamber will be calibrated by two different SSDLs to investigate the equivalence of calibration methods and measurement standards. In addition, several dosimeters with more or less pronounced energy dependence will also be calibrated by both laboratories, to see if the equivalence also holds for field class instruments. In this paper, calibration method is described and preliminary results are given.

## 2. Materials and methods

PTW 32005 ionization chamber with nominal volume of 27.9 cm<sup>3</sup> was selected for comparison in terms of air kerma free-in-air. Air kerma calibrations are performed by substitution method, in comparison with national standards. Correction is performed for ambient temperature and pressure, and if necessary for leakage.

Comparison is also performed in terms of operational quantities, by using the same methods normally used for user dosimeters. Personal dosimeters that were selected are in conformance with IEC 61256 [9], meaning that the energy dependence of their response is between +67 % and -29 %, compared with the response for reference radiation quality (usually Cs-137). Several ambient dosimeters were selected with increasing energy dependence, including low-cost non-compensated GM-counters.

The comparison is performed in 8 radiation qualities, N-40 to N-200 and S-Cs (codes are from ISO 4037-1 [6], and S-Cs represents field of Cs-137 isotope). The overview of the used radiation qualities is given in Table 1.

**Table 1. Radiation qualities used for interlaboratory comparison. Data are taken from ISO 4037-1, and actual values in SSDLs differ within the limits defined in the standard.**

Radiation quality	High Voltage (kV)	Mean Energy (keV)	1 <sup>st</sup> HVL at 2.5 m (mm)
N-40	40	33,3	2,63 Al
N-60	60	47,9	0,235 Cu
N-80	80	65,2	0,580 Cu
N-100	100	83,3	1,09 Cu
N-120	120	100	1,67 Cu
N-150	150	118	2,30 Cu
N-200	200	165	3,92 Cu
S-Cs	/	662	/

The comparison is performed in the following way: dosimeters are first calibrated in VINS, then in IMBiH, and then again in VINS, to check for long term stability and possible changes to the dosimeters, such as physical damage to the dosimeter components. Calibration coefficients (or factors) are compared for each dosimeter and for each radiation quality. At this moment, around half of the measurements have been completed.

### 3. Results and discussion

According to the preliminary results, significant difference was noticed between calibration factors for field class instruments in X-ray radiation qualities. Differences were much smaller in S-Cs radiation quality. There are two reasons for this difference: most dosimeters have much smaller energy dependence in the region around 662 keV, which is the energy of Cs-137. Also, radiation quality is much better defined for Cs-137 (single photon emission) than for X-ray radiation qualities (continuous spectra, validated by HVL measurements), and consequently the difference between SSDLs is much smaller. This also causes smaller differences for energy dependent field class dosimeters. The differences were much smaller for ionization chamber in all radiation qualities, and can be explained by measurement uncertainty.

Preliminary results for one dosimeter, based on 2 calibrations instead of 3, are given for a low-cost ambient dosimeter. Difference between calibration factors ranges between 3 % for Cs-137 (not statistically significant) and 25 % for N-40 radiation quality.

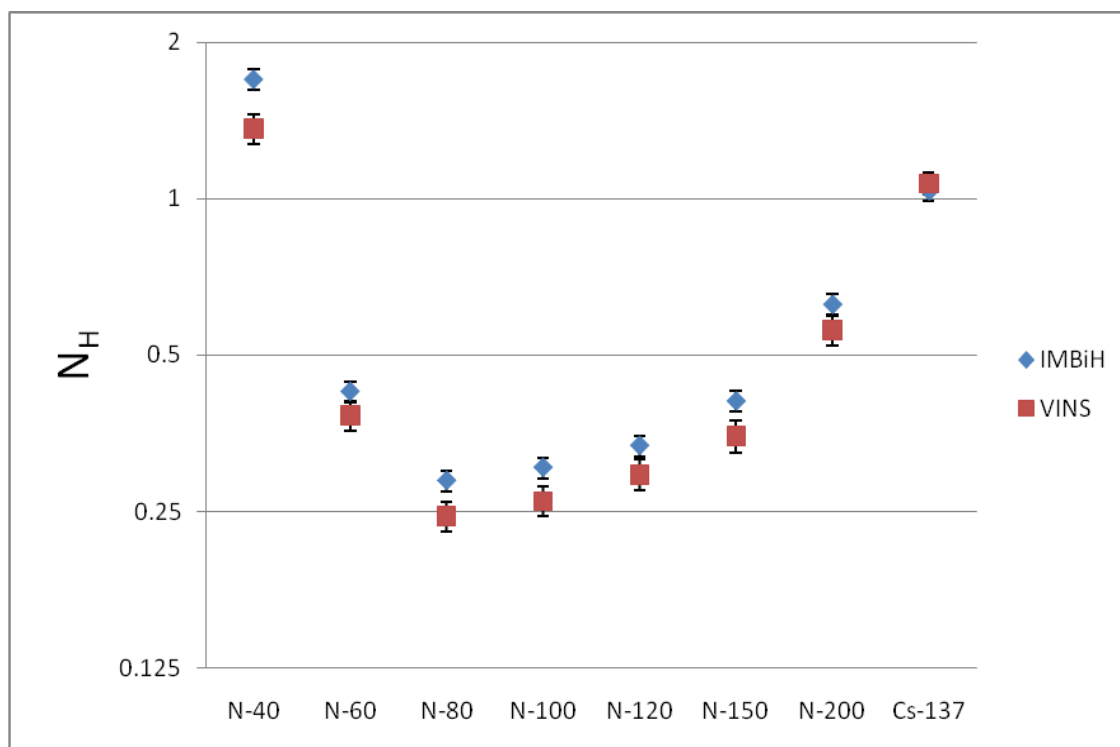


Fig.1 Comparison of calibration factors for a low cost ambient dosimeter.

### 4. Conclusion

It is very important to consider energy dependence of field class dosimeters, especially for low-cost or special purpose dosimeters. In some cases, the overresponse can be several hundred percent, and on the other hand, dosimeter might be unable to measure low energy photons, giving only background indication even when irradiated. In some cases, the energy dependence can be so high that even in reference conditions realized by SSDs, calibration factors show significant differences. In such cases, additional uncertainty should be considered by users of the dosimeters, even if the dosimeters are used in known radiation fields (e.g. fields of known radionuclides). These problems are not as evident in Cs-137 field, which is most commonly used, due to the inherent spectral purity of such fields and due to the relatively flat energy response of most dosimeters in this region.

### 5. Acknowledgement

This project, 17RPT01 DOSEtrace, 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. Literature

- [1] Viacheslav Morosh, Annette Röttger, Stefan Neumaier, Faton Krasniqi, Miloš Živanović, Nikola Kržanović, Gordana Pantelić, Giorgia Iurlaro, Francesca Mariotti, Luciano Sperandio, Steven Bell, Sotiris Ioannidis, Martin Kelly, Marco Sangiorgi, Investigation into the performance of dose rate measurement instruments used in non-governmental networks, *Radiation Measurements* 143, 2021, 106580
- [2] Nikola Kržanović, Koviļjka Stanković, Miloš Živanović, Miloš Đaletić, Olivera Ciraj-Bjelac, Development and testing of a low cost radiation protection instrument based on an energy compensated Geiger-Müller tube, *Radiation Physics and Chemistry*, 164, 2019, 108358
- [3] Sandra Ćeklić, Danijela Arandić, Miloš Živanović, Olivera Ciraj-Bjelac, Đorđe Lazarević, Performance of radiation survey meters in X- and gamma-radiation fields, *Radiation Protection Dosimetry*, 162(1-2), 2014, pp. 139 – 143
- [4] Nikola Kržanović, Miloš Živanović, Olivera Ciraj-Bjelac, Đorđe Lazarević, Sandra Ćeklić, Srboļjub Stanković, Performance Testing of Selected Types of Electronic Personal Dosimeters in X- and Gamma radiation fields, *Health Physics* 113(4), 2017, pp. 252-261
- [5] Željka Knežević, Marija Majer, Zuzanna Baranowska, Olivera Ciraj Bjelac, Giorgia Iurlaro, Nikola Kržanović, Francesca Mariotti, Marijana Nodilo, Stefan Neumaier, Katarzyna Woļszczuk, Miloš Živanović, Investigations into the basic properties of different passive dosimetry systems used in environmental radiation monitoring in the aftermath of a nuclear or radiological event, *Radiation Measurements* 146, 2021, 106615
- [6] ISO 4037-1:2019, X and gamma reference radiation fields for calibrating dosemeters and doserate meters and for determining their response as a function of photon energy - Part 1: Radiation characteristics and production methods, ISO, Geneva, 2019
- [7] Andreas Steurer, Wilhelm Tiefenboeck, Djordje Lazarevic and Milos Zivanovic, Bilateral comparisons of air kerma and absorbed dose to water standards in 60Co

radiation beams for radiotherapy and air kerma standards in  $^{137}\text{Cs}$  radiation beams for radiation protection between BEV (Austria) and VINS (Serbia) [EURAMET.RI(I)-K1.2, K4.2 and K5.1], *Metrologia*, (55), Technical Supplement, 2018, pp. 1-38

- [8] Miloš Živanović, Oliver Hupe, Amra Šabeta, Nikola Kržanović and Vedrana Makarić, EURAMET DOSEtrace project and supplementary comparison, XXX simpozijum Društva za zaštitu od zračenja Srbije i Crne Gore, 2 – 4. oktobar, 2019, Divčibare, Srbija, pp. 472-477
- [9] IEC 61526:2010, Radiation protection instrumentation - Measurement of personal dose equivalents  $H_p(10)$  and  $H_p(0,07)$  for X, gamma, neutron and beta radiations - Direct reading personal dose equivalent meters

**UTICAJ SPEKTARA REFERENTNIH POLJA NA ETALONIRANJE  
KORISNIČKIH DOZIMETARA**

**Miloš ŽIVANOVIĆ<sup>1</sup>, Amra ŠABETA<sup>2</sup>,  
Nikola KRŽANOVIĆ<sup>1</sup>, Vedrana MAKARIĆ<sup>2</sup>, Miloš ĐALETIĆ<sup>1</sup>,  
Milica STUPAR<sup>2</sup> i Srboljub STANKOVIĆ<sup>1</sup>**

1) Institut za nuklearne nauke Vinča, Beograd, Srbija, Univerzitet u Beogradu,  
[milosz@vinca.rs](mailto:milosz@vinca.rs), [krzanovic@vinca.rs](mailto:krzanovic@vinca.rs), [djaletic@vinca.rs](mailto:djaletic@vinca.rs), [srbas@vinca.rs](mailto:srbas@vinca.rs)

2) Institut za mjeriteljstvo Bosne i Hercegovine, 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), [milica.stupar@met.gov.ba](mailto:milica.stupar@met.gov.ba)

**SADRŽAJ**

Aktivni elektronski dozimetri se najčešće etaloniraju u Sekundarnim standardnim dozimetrijskim laboratorijama u referentnim poljima fotonskog zračenja, sa mernom nesigurnošću od oko 5 % ( $k=2$ ). Referentna polja se uspostavljaju u skladu sa međunarodnim standardima, obično ISO 4037 za fotonsko zračenje. Male razlike u spektrima u različitim laboratorijama su neizbežne, ali je efekat na referentne vrednosti dobro proučen i ostaje u okviru mernih nesigurnosti, što je potvrđeno postojećim međulaboratorijskim poređenjima. Međutim, mnogi korisnički dozimetri imaju lošu energetska zavisnost, pogotovo u opsegu energija ispod 100 keV, što može da uzrokuje velike razlike u kalibracionim faktorima određenim u različitim laboratorijama u nominalno istim uslovima. To može da ima posledice i na ispitivanje ili overavanje dozimetara. U ovom radu su prikazani prvi rezultati dobijeni u dve različite laboratorije za etaloniranje.

## ISPITIVANJE DISTRIBUCIJE $^{226}\text{Ra}$ U UZORCIMA VODE PRIMENOM MONTE KARLO SIMULACIJA

**Danijel VELIMIROVIĆ, Dušan MRĐA, Jan HANSMAN, Jovana KNEŽEVIĆ, Sofija FORKAPIĆ, Kristina BIKIT i Ištvan BIKIT**

*Univerzitet u Novom Sadu, Prirodno-matematički fakultet, Departman za fiziku, Novi Sad, Srbija, [danijel.velimirovic@df.uns.ac.rs](mailto:danijel.velimirovic@df.uns.ac.rs), [mrdjad@df.uns.ac.rs](mailto:mrdjad@df.uns.ac.rs), [jan.hansman@df.uns.ac.rs](mailto:jan.hansman@df.uns.ac.rs), [jovana.knezevic@df.uns.ac.rs](mailto:jovana.knezevic@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), [bikit@df.uns.ac.rs](mailto:bikit@df.uns.ac.rs)*

### SADRŽAJ

*Kvantitativno određivanje sadržaja radionuklida gama spektrometrijom zahteva poznavanje efikasnosti detekcije gama zračenja koja ne zavisi samo od detektorskog sistema već i od oblika i položaja uzorka u odnosu na detektor, kao i od prostorne raspodele radionuklida u uzorku. U ovom radu je ispitana prostorna raspodela  $^{226}\text{Ra}$  i njegovih potomaka ( $^{214}\text{Pb}$  i  $^{214}\text{Bi}$ ) u uzorcima vode korišćenjem Monte Karlo simulacija, sa ciljem određivanja efikasnosti detekcije za različite prostorne raspodele gama emitera, kao i uticaj kišljenja rastvora azotnom kiselinom na prostornu raspodelu pomenutih radionuklida. Dobijeni simulacioni rezultati su upoređeni sa gamaspektrometrijskim rezultatima. Nađeno je da zakišljeni vodeni rastvor  $^{226}\text{Ra}$  i nakon dužeg vremena zadržava homogenu raspodelu, dok se radioizotopi unutar nezakišljenog vodenog rastvora  $^{226}\text{Ra}$  koncentrišu oko zidova i dna suda. Istraživanje je pokazalo da se sekularna radioaktivna ravnoteža između  $^{226}\text{Ra}$  i njegovih potomaka ne uspostavlja ukoliko se za pakovanje uzoraka, pripremljenih za merenje na bazi postradonskih linija, koriste kontejneri od neadekvatnih materijala koji dozvoljavaju emanaciju  $^{222}\text{Rn}$  kroz zidove suda u kojem se uzorak nalazi. Konstantno curenje  $^{222}\text{Rn}$  iz matrice onemogućava uspostavljanje sekularne radioaktivne ravnoteže između  $^{226}\text{Ra}$  i njegovih potomaka i doprinosi potencijalno velikim greškama prilikom određivanja aktivnosti pomenutom metodom.*

### 1. Uvod

Kao deo prirodnog uranovog niza,  $^{226}\text{Ra}$  je široko rasprostranjen u zemljinoj kori i jedan je od prirodnih radionuklida koji se mogu naći u vodi. Odlikuje ga veoma visoka radiotoksičnost budući da se nakon unosa u organizam deponuje u kostima i mokraćnoj bešici, što povećava rizik od razvoja karcinoma [1]. Zbog zdravstvenih problema kojima populacija može biti izložena, precizno određivanje koncentracije aktivnosti  $^{226}\text{Ra}$  u uzorcima životne sredine važno je za zaštitu stanovništva od jonizujućeg zračenja [2-4]. Nedestruktivna priroda, ali i mogućnost analize uzorka bez prethodne komplikovane radiohemijske pripreme, gamaspektrometrijsku analizu čini jednom od najpogodnijih metoda za ispitivanja radioaktivnosti životne sredine. Međutim, precizna kalibracija detektorskog sistema na efikasnost detekcije gama fotona od ključnog je značaja u kvantitativnoj gamaspektrometrijskoj analizi. Efikasnost detekcije ne zavisi samo od detektorskog sistema, već i od oblika i položaja uzorka unutar detektora, kao i prostorne raspodele radionuklida u uzorku koji se meri. Poznavanje raspodele emitera unutar uzoraka je ključno za adekvatno određivanje efikasnosti, a samim tim i određivanje korektnih koncentracija aktivnosti uzorka. Upravo je ova problematika bila motiv za ispitivanje ponašanja  $^{226}\text{Ra}$  i njegovih potomaka u vodi, kao i uticaj njihove raspodele u vodenoj matrici na efikasnost detekcije. Kalibracija efikasnosti se

eksperimentalno može odrediti pomoću standarda koji u sebi sadrži radionuklide poznatih aktivnosti, a koji pokrivaju oblasti energija gama fotona koje se očekuju unutar uzorka. U cilju što preciznijeg određivanja efikasnosti, a samim tim i aktivnosti nepoznatih uzoraka, neophodno je da standardni referentni materijal poseduje osobine (geometriju, gustinu, sastav) što sličnije nepoznatom uzorku [5, 6]. Kako upotreba standarda kao kalibracionog sredstva nekada nije moguća, usled komplikovane geometrije ili nehomogene raspodele emitera unutar uzorka, jedno od rešenja jeste upotreba Monte Karlo simulacija.

### 2. Eksperiment

*High Purity Germanium* (HPGe) detektor korišćen u ovom radu je koaksijalni detektor p-tipa, proizvođača Canberra. Kristal germanijuma, dijametra 61 mm i visine 52 mm, smešten je u aluminijumskom kućištu debljine 1,5 mm. Relativna efikasnost detektora je 35,6 %. HPGe detektor je povezan sa modulom za digitalnu obradu signala „Inspector 2000“, pri čemu se snimanje i analiza gama spektara vrši pomoću softvera Genie 2000. Oko detektora nalazi se olovna zaštita oblika cilindra, unutrašnjeg dijametra 17 cm, debljine 12 cm i visine 37 cm. Da bi se eliminisao uticaj X-fluorescentnog zračenja olova, unutrašnjost zaštite je obložena slojevima kalaja i bakra debljine 2 mm.

U svrhu eksperimenta pripremljena su dva vodena rastvora poznatih koncentracija  $^{226}\text{Ra}$ . U prvi uzorak (destilovana voda) dodat je 1 ml  $^{226}\text{Ra}$  standarda koncentracije aktivnosti 39,7 Bq/ml, dok je u drugi uzorak (destilovana voda) pored 1 ml standarda identične koncentracije aktivnosti dodato još 5 ml  $\text{HNO}_3$ . Pripremljeni rastvori, zapremina od po 200 ml, presuti su u dve identične cilindrične polietilenske bočice, koje su potom zatvorene, a spoj poklopca i suda obmotan teflon trakom. Nakon presipanja, dimenzija matrice vodenog rastvora unutar bočica iznosila je 75 mm x 50 mm. Sa sigurnošću smo mogli tvrditi da se u oba uzorka nalaze identične aktivnosti  $^{226}\text{Ra}$ , kao i to da su im geometrije identične. Bilo koje odstupanje od izmerene i poznate aktivnosti  $^{226}\text{Ra}$  proizilazi direktno iz geometrije uzorak-detektor. Kako u pripremljenim uzorcima nije bilo primesa prirodnih radioaktivnih nizova (uranijum, torijum i aktinijum), nije bio prisutan ni  $^{235}\text{U}$  koji bi svojom linijom na 185,7 keV uticao na precizno određivanje aktivnosti  $^{226}\text{Ra}$  direktno izlinije na 186,1 keV.

Izvor zračenja, tačnije vodeni rastvor  $^{226}\text{Ra}$ , koji se nalazi u cilindričnoj polietilenskoj bočici, postavljen je direktno na aluminijumsku kapu detektora, a poklopac olovne zaštite je zatvoren, te je na ovaj način uticaj fonskog zračenja smanjen na minimum.

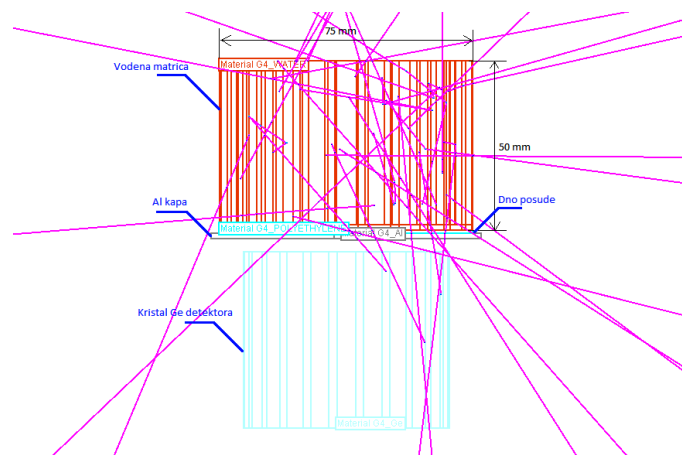
Izvršene su dve grupe merenja, prva nakon 7 dana od pripreme uzoraka i druga nakon 33 dana. Kako je period poluraspada  $^{226}\text{Ra}$  1600 godina, a njegovog potomka  $^{222}\text{Rn}$  3,8 dana, sekularna radioaktivna ravnoteža uspostavlja se nakon 7-8 perioda poluraspada  $^{222}\text{Rn}$ , odnosno nakon 30 dana. Na osnovu ovoga očekuje se da će u drugoj grupi merenja doći do uspostavljanja sekularne radioaktivne ravnoteže između  $^{226}\text{Ra}$  i njegovih potomaka, te da će aktivnosti dobijene direktno iz  $^{226}\text{Ra}$  linije i postradonskih linija biti identične, odnosno iznosiće 39,7 Bq.

### 3. Monte Karlo simulacije

Simulirane efikasnosti dobijene su primenom Geant4 programskog paketa (verzija 10.05) [7]. U cilju izvođenja simulacije, modelovan je prilično jednostavan sistem koji se zasniva na detektorskom sistemu korišćenom u eksperimentu. Kao aktivna zapremina detektora konstruisan je kristal germanijuma dijametra 61 mm i visine 52 mm. Na 4 mm

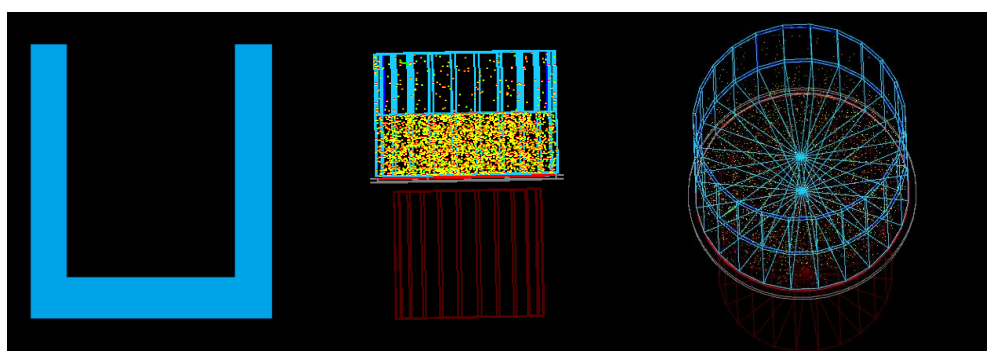


iznad kristala konstruisana je aluminijska cilindrična kapa debljine 1,5 mm na kojoj leži polietilenski disk debljine 1 mm. Ovaj disk predstavlja dno bočice u kojoj se nalazi uzorak. Cilindrična vodena matrica dimenzija 75 mm x 50 mm postavljena je direktno na polietilenski disk (slika 1).



**Slika 1. Simulirana geometrija postavke HPGe detektora za slučaj zakišelnog rastvora.**

Simulirano je više različitih emisionih zapremina unutar vodene matrice, koje odgovaraju slučaju zakišelnog i nekišelnog rastvora (slike 1 i 2). Sledeći se prvobitnim pretpostavkama, gama fotoni zakišelnog rastvora raspoređeni su homogeno unutar vodene matrice, dok je u slučaju nekišelnog rastvora bilo neophodno modelovati drugačije geometrije unutar vodene matrice. Referentna aktivnost  $^{226}\text{Ra}$  omogućuje proveru pretpostavke zadržavanja homogene raspodele radionuklida unutar zakišelnog rastvora, kao i mogućnost ispitivanja raspodele radionuklida u nekišelnom rastvoru.



**Slika 2. Simulirana emisiona zapremina za slučaj nekišelnog rastvora.**

Iz vodene matrice generisani su gama fotoni različitih energija, u zavisnosti od verovatnoće emisije, a koji odgovaraju radioaktivnim raspadima  $^{226}\text{Ra}$  (186,1 keV) i potomcima  $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{214}\text{Pb}$  (295,2 keV i 351,9 keV) i  $^{214}\text{Bi}$  (609,3 keV, 1120,3 keV i 1764,5 keV). Da bi statističke nesigurnosti bile svedene na minimum, generisano je  $10^7$  gama fotona različitih energija. Tako je, na primer, broj izotropno generisanih gama fotona energije 186,1 keV i verovatnoće emisije  $P_\gamma=3,5\%$ , koji potiču iz raspada  $^{226}\text{Ra}$  jednak  $N_\gamma = 10^7 \cdot 0.035 = 350000$ . Simulirane energije, odgovarajuće verovatnoće emisije i broj emitovanih gama fotona prikazani su u tabeli 1.

**Tabela 1. Broj generisanih gama fotona radionuklida od značaja.**

$E_\gamma$ [keV]	Radionuklid	$P_\gamma$ [%]	Broj generisanih gama fotona
186,1	$^{226}\text{Ra}$	3,5	350000
295,2	$^{214}\text{Pb}$	19,2	1920000
351,9	$^{214}\text{Pb}$	37,1	3710000
609,3	$^{214}\text{Bi}$	46,1	4610000
1120,3	$^{214}\text{Bi}$	15	1500000
1764,5	$^{214}\text{Bi}$	15,9	1590000

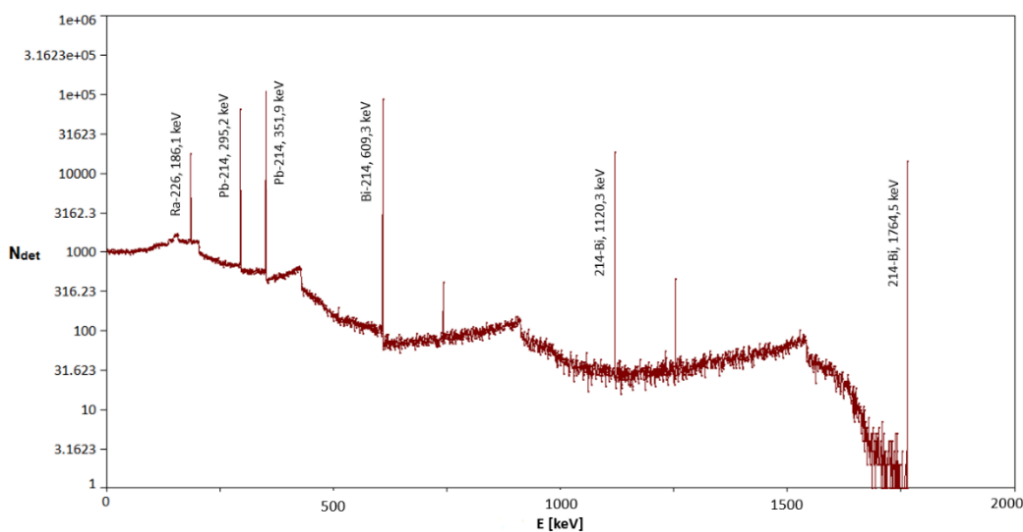
Efikasnosti detekcije  $\varepsilon_{sim}$  na pojedinim energijama mogu se dobiti kao količnik broja detektovanih događaja  $N_{det}$  pod fotopikom u simuliranom spektru (slika 3) i ukupnog broja generisanih gama fotona određene energije  $N_{sim}$  iz vodene matrice:

$$\varepsilon_{sim} = \frac{N_{det}}{N_{sim}} \quad (1)$$

Dok je aktivnost  $A$  radionuklida od značaja dobijena iz:

$$A = \frac{R}{P_\gamma \cdot \varepsilon_{sim}} \quad (2)$$

gde je  $R$  odbroj po sekundi pod fotopikom i određuje se direktno iz eksperimentalnog spektra,  $P_\gamma$  verovatnoća emisije gama fotona energije  $E$ , a  $\varepsilon_{sim}$  je efikasnost detekcije dobijena u simulaciji direktno iz (1). Kada se dobijeni rezultati poklope sa spajkovanom vrednošću od 39,7 Bq, sa sigurnošću možemo tvrditi da simulirana raspodela radionuklida odgovara onoj unutar uzorka. Na ovaj način, indirektno preko efikasnosti detekcije, ispitivana je prostorna raspodela gama emitera unutar uzorka.



**Slika 3. Simulirani gama spektar germanijumskog detektora.**

## 4. Rezultati i diskusija

Rezultati dobijeni nakon prve grupe merenja (7 dana od pripreme uzoraka) prikazani su u tabelama 2 i 3. Pretpostavljeno je da u prvoj grupi merenja nije došlo do gubitka homogene raspodele radionuklida u nekišljenom uzorku, te su raspadi simulirani homogeno iz celokupne vodene matrice. Dobijene efikasnosti detekcije su stoga identične za slučaj nekišljenog i zakišljenog rastvora. U tabeli 2 vidimo da aktivnost dobijena direktno iz  $^{226}\text{Ra}$  linije značajno odstupa od spajkovane, te zaključujemo da simulirana raspodela radionuklida u nekišljenom rastvoru ne odgovara realnoj. Sa druge strane u slučaju zakišljenog rastvora aktivnost dobijena direktno iz linije  $^{226}\text{Ra}$  poklapa se sa spajkovanom. Postradonske linije u oba slučaja ne daju korektne rezultate, jer u uzorku nije došlo do uspostavljanja sekularne radioaktivne ravnoteže.

**Tabela 2. Neškišljen uzorak.**

$E_\gamma$ [keV]	Radionuklid	$P_\gamma$ [%]	$R_{exp} \times 10^{-3}$ [c/s]	$\epsilon_{sim} \times 10^{-3}$	A[Bq]
186,1	$^{226}\text{Ra}$	3,5	$61 \pm 3$	$52,07 \pm 0,39$	$33,47 \pm 1,66$
295,2	$^{214}\text{Pb}$	19,2	$64,29 \pm 2,56$	$37,02 \pm 0,14$	$9,05 \pm 0,36$
351,9	$^{214}\text{Pb}$	37,1	$114,10 \pm 2,98$	$32,09 \pm 0,09$	$9,58 \pm 0,25$
609,3	$^{214}\text{Bi}$	46,1	$86,60 \pm 2,41$	$20,69 \pm 0,07$	$9,02 \pm 0,25$
1120,3	$^{214}\text{Bi}$	15	$18,50 \pm 1,29$	$13,47 \pm 0,09$	$9,15 \pm 0,64$
1764,5	$^{214}\text{Bi}$	15,9	$16,40 \pm 1,04$	$9,50 \pm 0,08$	$10,86 \pm 0,69$

**Tabela 3. Zakišljen uzorak.**

$E$ [keV]	Radionuklid	$P_\gamma$ [%]	$R_{exp} \times 10^{-3}$ [c/s]	$\epsilon_{sim} \times 10^{-3}$	A[Bq]
186,1	$^{226}\text{Ra}$	3,5	$72,97 \pm 3,19$	$52,07 \pm 0,39$	$39,97 \pm 1,77$
295,2	$^{214}\text{Pb}$	19,2	$27,40 \pm 2,64$	$37,02 \pm 0,14$	$10,13 \pm 0,37$
351,9	$^{214}\text{Pb}$	37,1	$119 \pm 3$	$32,09 \pm 0,09$	$9,99 \pm 0,26$
609,3	$^{214}\text{Bi}$	46,1	$93,10 \pm 2,52$	$20,69 \pm 0,07$	$9,76 \pm 0,27$
1120,3	$^{214}\text{Bi}$	15	$19,90 \pm 1,25$	$13,47 \pm 0,09$	$9,84 \pm 0,62$
1764,5	$^{214}\text{Bi}$	15,9	$16,90 \pm 1,09$	$9,50 \pm 0,08$	$11,19 \pm 0,73$

U tabelama 4 i 5 prikazani su rezultati dobijeni nakon druge grupe merenja (33 dana od pripreme uzoraka). Za razliku od prethodne grupe merenja i simulacija, emisiona zapremina nekišljenog rastvora je promenjena. Modelovana je tako da se gama fotoni emituju izotropno iz zapremine nalik obrnutoj marinelj geometriji, visine dna 1,5 mm i debljine zidova 7 mm. Aktivnosti koje su dobijene direktno iz linije  $^{226}\text{Ra}$  uporedive su za slučaj kišljenog i nekišljenog rastvora, te možemo tvrditi da simulirana raspodela radionuklida odgovara realnom slučaju, dok se u slučaju postradonskih linija vidi relativno odstupanje do oko 20 %. Aktivnosti dobijene iz postradonskih linija i nakon 33 dana od pripreme uzoraka odstupaju od spajkovane vrednosti, što se može objasniti konstantnom emanacijom  $^{222}\text{Rn}$  iz matrice, a samim tim i neuspostavljanjem sekularne radioaktivne ravnoteže između  $^{226}\text{Ra}$  i njegovih potomaka.

**Tabela 4. Nekišeljen uzorak.**

$E$ [keV]	Radionuklid	$P\gamma$ [%]	$R_{exp} \times 10^{-3}$ [c/s]	$\epsilon_{sim} \times 10^{-3}$	$A$ [Bq]
186,1	$^{226}\text{Ra}$	3,5	$64,30 \pm 2,93$	$46,29 \pm 0,37$	$39,69 \pm 1,84$
295,2	$^{214}\text{Pb}$	19,2	$89,80 \pm 2,65$	$32,95 \pm 0,13$	$14,19 \pm 0,42$
351,9	$^{214}\text{Pb}$	37,1	$143,80 \pm 3,14$	$28,79 \pm 0,09$	$13,46 \pm 0,30$
609,3	$^{214}\text{Bi}$	46,1	$111,40 \pm 2,61$	$18,70 \pm 0,06$	$12,91 \pm 0,31$
1120,3	$^{214}\text{Bi}$	15	$24,90 \pm 1,33$	$12,26 \pm 0,09$	$13,54 \pm 0,73$
1764,5	$^{214}\text{Bi}$	15,9	$20,17 \pm 1,08$	$8,82 \pm 0,07$	$14,37 \pm 0,78$

**Tabela 5. Zakišeljen uzorak.**

$E$ [keV]	Radionuklid	$P\gamma$ [%]	$R_{exp} \times 10^{-3}$ [c/s]	$\epsilon_{sim} \times 10^{-3}$	$A$ [Bq]
186,1	$^{226}\text{Ra}$	3,5	$73,80 \pm 3,74$	$52,07 \pm 0,39$	$40,43 \pm 2,07$
295,2	$^{214}\text{Pb}$	19,2	$109,30 \pm 3,11$	$37,02 \pm 0,14$	$15,30 \pm 0,30$
351,9	$^{214}\text{Pb}$	37,1	$186,04 \pm 3,50$	$32,09 \pm 0,09$	$15,62 \pm 0,30$
609,3	$^{214}\text{Bi}$	46,1	$147,90 \pm 3,02$	$20,69 \pm 0,07$	$15,51 \pm 0,32$
1120,3	$^{214}\text{Bi}$	15	$32,20 \pm 1,56$	$13,47 \pm 0,09$	$16,43 \pm 0,78$
1764,5	$^{214}\text{Bi}$	15,9	$26,60 \pm 1,28$	$9,50 \pm 0,08$	$17,61 \pm 0,86$

## 5. Zaključak

Cilj ovog rada bio je upotreba Monte Karlo simulacija za indirektno ispitivanje prostorne raspodele  $^{226}\text{Ra}$  poznate koncentracije aktivnosti, kao i njegovih potomaka  $^{214}\text{Pb}$  i  $^{214}\text{Bi}$  unutar pripremljenih vodenih rastvora. Ispitan je i uticaj kišeljenja rastvora azotnom kiselinom na prostornu raspodelu pomenutih radionuklida. Kako efikasnost detekcije direktno zavisi od raspodele gama emitera, tako se spajkovana aktivnost  $^{226}\text{Ra}$  dobija samo ukoliko zadata raspodela gama emitera unutar simulacije odgovara njihovoj raspodeli unutar uzorka. Jasno se vidi da zakišeljen vodeni rastvor  $^{226}\text{Ra}$  i nakon dužeg vremenskog perioda zadržava homogenost, dok se u nekišeljenom rastvoru radionuklidi talože na dno i zidove suda. Istraživanje je takođe pokazalo da se sekularna radioaktivna ravnoteža između  $^{226}\text{Ra}$  i njegovih potomaka ne uspostavlja ukoliko se za skladištenje uzoraka, pripremljenih za gamaspektrometrijsku analizu pomoću postradonskih linija, koriste kontejneri od neadekvatnih materijala koji dozvoljavaju emanaciju  $^{222}\text{Rn}$  [8]. Konstantno curenje radona kroz zidove i spojeve suda onemogućava uspostavljanje sekularne radioaktivne ravnoteže između  $^{226}\text{Ra}$  i njegovih potomaka, što potencijalno dovodi do velikih grešaka prilikom određivanja aktivnosti gamaspektrometrijskom metodom.

## 6. Zahvalnica

Istraživanja je finansiralo Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije (Ev. br. 451-03-9/2021-14/ 200125).

## 7. Literatura

- [1] Safe Handling of Radionuclides, No. 1, IAEA, Vienna, 1973.
- [2] M. Bronzović, G. Marović, M. Vrtar, Public exposure to  $^{226}\text{Ra}$  in drinking water, *Arh. Hig. Rada. Toksiko*, 57, 2006, 39–44.

- [3] P. Vesterbacka, T. Turtiainen, S. Heinävaara, H. Arvela, Activity concentrations of  $^{226}\text{Ra}$  and  $^{228}\text{Ra}$  in drilled well water in Finland, *Radiat. Prot. Dosim*, 121, 2006, 406–412.
- [4] S. D. Dragović, Lj. J. Janković-Mandić, R. M. Dragović, M. M. Đorđević, M. M. Đokić, Spatial distribution of the  $^{226}\text{Ra}$  activity concentrations in well and spring waters in Serbia and their relation to geological formations, *J. Geochem. Explor*, 112, 2012, 206–211.
- [5] M. L'Annunziata, *Handbook of Radioactivity Analysis*, 3rd edition, Academic Press, 2021.
- [6] G. R. Gilmore, *Practical Gamma-ray Spectrometry*, 2nd Edition, John Wiley & Sons, 2008.
- [7] Geant4 User's Guide for Application Developers, Version: Geant4 10.05.p01, 5th March, Geant4 Collaboration, 2019.
- [8] W. Arafa, Permeability of radon-222 through some materials, *Radiat. Meas*, 35, 2002, 207–211.

**DETERMINATION OF SPATIAL DISTRIBUTION OF  $^{226}\text{Ra}$  IN WATER  
SAMPLES USING MONTE CARLO SIMULATIONS**

**Danijel VELIMIROVIĆ, Dušan MRĐA, Jan HANSMAN, Jovana KNEŽEVIĆ,  
Sofija FORKAPIĆ, Kristina BIKIT and Ištvan BIKIT**

*University of Novi Sad, Faculty of Sciences, Department of Physics, Novi Sad, Serbia,  
[danijel.velimirovic@df.uns.ac.rs](mailto:danijel.velimirovic@df.uns.ac.rs), [mrdjad@df.uns.ac.rs](mailto:mrdjad@df.uns.ac.rs), [jan.hansman@df.uns.ac.rs](mailto:jan.hansman@df.uns.ac.rs),  
[jovana.knezevic@df.uns.ac.rs](mailto:jovana.knezevic@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),  
[bikit@df.uns.ac.rs](mailto:bikit@df.uns.ac.rs)*

**ABSTRACT**

Quantitative determination of radionuclide content by gamma spectrometry requires knowledge of the efficiency of gamma radiation detection. Efficiency depends not only on the detector system, but also on the shape and position of the sample in relation to the detector, as well as on the spatial distribution of radionuclides in the sample. In this paper, the spatial distribution of  $^{226}\text{Ra}$  and its progenies ( $^{214}\text{Pb}$  and  $^{214}\text{Bi}$ ) in water samples was investigated using Monte Carlo simulations. The main aim was determining the detector efficiency for different spatial distributions of gamma emitters, as well as the influence of nitric acid acidification of the solution on the spatial distribution of these radionuclides. The obtained simulation results were compared with gamma spectrometry results. The comparison shows that the acidified aqueous solution of  $^{226}\text{Ra}$  maintained a homogeneous distribution after a prolonged time, while the radioisotopes in the non-acidified aqueous solution of  $^{226}\text{Ra}$  concentrated around the walls and bottom of the container. In addition, our study implies that a secular radioactive equilibrium between  $^{226}\text{Ra}$  and its progenies cannot be established in containers which allow  $^{222}\text{Rn}$  to emanate through its walls. The constant radon leakage prevents the secular radioactive equilibrium between  $^{226}\text{Ra}$  and its progeny, contributing to potentially large errors in the activity determination in samples prepared for measurements based of daughter products of radon.

## ISPITIVANJE KOMPONENTI FONSKOG SPEKTRA HPGE DETEKTORA U OLOVNOJ ZAŠTITI PRIMENOM MONTE KARLO SIMULACIJA

**Danijel VELIMIROVIĆ, Dušan MRĐA, Jan HANSMAN, Jovana KNEŽEVIĆ, Sofija FORKAPIĆ, Kristina BIKIT i Ištvan BIKIT**

*Univerzitet u Novom Sadu, Prirodno-matematički fakultet, Departman za fiziku, Novi Sad, Srbija, [danijel.velimirovic@df.uns.ac.rs](mailto:danijel.velimirovic@df.uns.ac.rs), [mrdjad@df.uns.ac.rs](mailto:mrdjad@df.uns.ac.rs), [jan.hansman@df.uns.ac.rs](mailto:jan.hansman@df.uns.ac.rs), [jovana.knezzevic@df.uns.ac.rs](mailto:jovana.knezzevic@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), [bikit@df.uns.ac.rs](mailto:bikit@df.uns.ac.rs)*

### SADRŽAJ

*U ovom radu predstavljena je Monte Karlo simulacija fona, HPGe detektora u olovnoj zaštiti, koji potiče od prirodnih radionuklida, kosmičkog zračenja i kontaminacije olova. Prednost Monte Karlo simulacija leži u tome što je moguće simulirati svaku od navedenih komponenti zasebno i na taj način, ukoliko je potrebno, utvrditi koja od njih ima najveći doprinos fonu HPGe detektora. Za potrebe simulacije konstruisana je geometrija laboratorije u kojoj je vršeno eksperimentalno merenje. Laboratorija, a ujedno i emisiona zapremina, predstavljena je šupljom kockom dimenzija 4 m, debljine zidova 20 cm, unutar koje je postavljen HPGe detektor u olovnoj zaštiti. Unutar emisione matrice razmatrane su homogene distribucije radionuklida K-40 i radioaktivnih nizova U-238 i Th-232. Kosmičko zračenje simulirano je pomoću baze CRY, koja korisniku omogućava odabir željenih komponenti, kao i nadmorske visine i geografske širine, dok je kontaminacija olovne zaštite predstavljena raspadima jezgara Pb-210. Poređenjem dobijenih i simuliranih fonskih spektara sa eksperimentalnim, utvrđeno je dobro slaganje, u regionu energija do 3 MeV, pri čemu su određeni i pojedinačni doprinosi fonskom spektru HPGe detektora svake od navedenih komponenti.*

### 1. Uvod

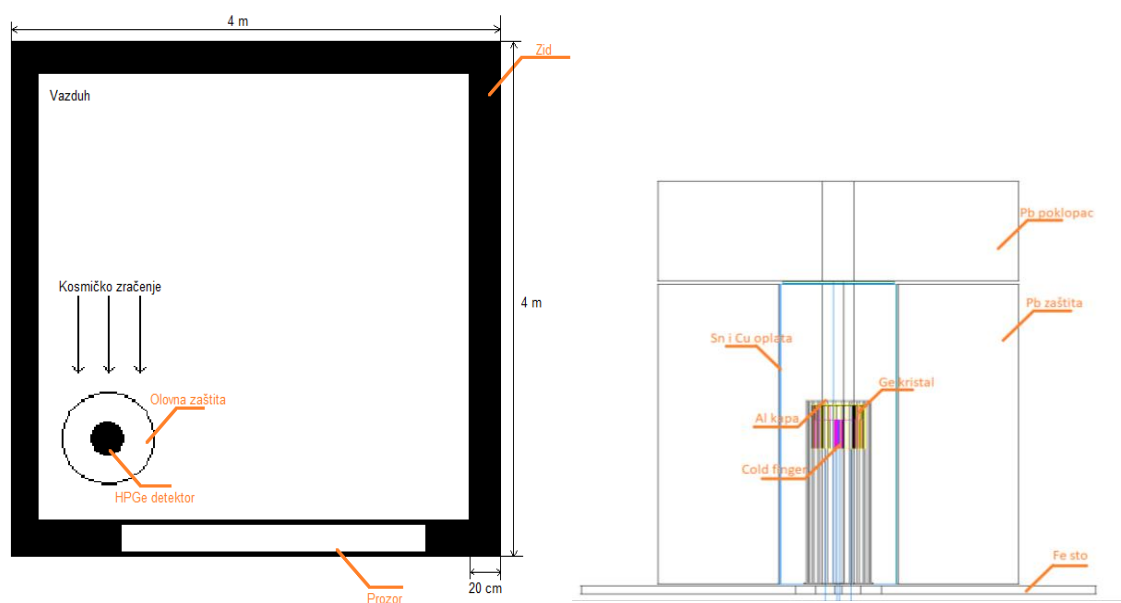
Usled odlične energijske rezolucije i visoke efikasnosti poluprovodnički (HPGe) detektori imaju široku eksperimentalnu primenu, od eksperimenata koji uključuju potragu za slabo interagujućim česticama, dvostrukim beta raspadom, sve do gama spektrometrijske analize i merenja radioaktivnosti u životnoj sredini [1,2]. Veliki izazov sa kojim se suočavaju niskofonski sistemi je potreba da se uticaj fonskog zračenja iz okruženja spektrometra svede na minimum. Kako bi se ovo postiglo, detektor se mora opkoliti materijalima visoke gustine, visokog rednog broja i visoke radiočistoće, da bi se redukovao intenzitet zračenja radioizotopa poreklom iz zemljine kore, a koji se nalaze u okruženju detektora. Osnovni izvori fona HPGe detektora mogu se podeliti na: kosmičko zračenje, prirodne radioaktivne nizove, K-40, radon i njegove potomke koji se nalaze u vazduhu, kontaminaciju zaštite i materijala od kojih je detektor napravljen. Doprinos ovih izvora fonskom zračenju zavisi od kvaliteta i vrste detektora, čistoće materijala koji se koriste za njegovu zaštitu i nivoa kontaminacije u laboratoriji u kojoj je detektor postavljen. Cilj ovog rada bio je ispitivanje doprinosa pojedinih komponenti fona HPGe detektora upotrebom Monte Karlo simulacija i Geant4 programskog paketa. Simuliran je celokupan detektorski sistem, kao i laboratorija u kojoj se sistem nalazi, a dobijeni rezultati upoređeni su sa eksperimentalnim.

## 2. Eksperimentalna postavka i Monte Karlo simulacije

*High Purity Germanium* (HPGe) detektor korišćen u ovom radu je koaksijalni detektor p-tipa, proizvođača Canberra, relativne efikasnosti od 35,6 % i rezolucije 1,80 keV na 1,33 MeV. Kristal germanijuma, dijametra 61 mm i visine 52 mm, je smešten u Al kućištu debljine 1,5 mm. HPGe detektor je povezan sa modulom za digitalnu obradu signala, „Inspector 2000“, pri čemu se snimanje i analiza gama spektara vrši pomoću softvera Genie 2000. Detektor je okružen cilindričnom olovnom zaštitom sa unutrašnjim dijametrom od 17 cm i debljine 12 cm, dok se iznad detektora nalazi olovni poklopac debljine 12 cm (slika 1). Unutrašnjost zaštite je obložena slojevima kalaja i bakra debljine 2 mm, koji gotovo u potpunosti eliminišu X–fluorescentno zračenje olova.

Spektar fona HPGe detektora u olovnoj zaštiti snimljen je u Laboratoriji za ispitivanje radioaktivnosti uzoraka i doze jonizujućeg i nejonizujućeg zračenja, u zgradi Departmana za Fiziku, Prirodno–matematičkog fakulteta u Novom Sadu (45,245161 °N, 19,851909 °E). Model laboratorije sa naznačenim dimenzijama i pozicijom detektora je prikazan na slici 1. *Live time* spektra je iznosilo  $t_{live} = 71128$  s, dok je *real time* iznosilo 71191 s (mrtvo vreme 0,09 %). Integralni odbroj fonskog spektra je iznosio 215046 c, dok je stopa odbroja bila  $R_{exp} = 3,02$  c/s.

Monte Karlo simulacije realizovane su pomoću softverskog paketa Geant4 (verzija 10.05) [3]. Detektor je modelovan na osnovu tehničke specifikacije obezbeđene od strane proizvođača, koja obuhvata dimenzije i vrste materijala koje ulaze u sastav detektorskog sistema. Validacija simuliranog HPGe detektora u odnosu na pravi detektor izvršena je korišćenjem standardnih kalibracionih tačkastih izvora (Cs-137, Am-241, Co-60), koji pokrivaju energijski region od (60 keV–1,33 MeV), postavljenih na 25 cm od kape detektora. Efikasnosti detekcije dobijene iz eksperimentalnog spektra upoređene su sa simuliranim efikasnostima i dobijeno je relativno odstupanje od 10 % u energijskom regionu do 2 MeV. Dobro slaganje eksperimentalnih i simuliranih rezultata ukazuje na to da je detektorski sistem korektno modelovan unutar simulacije.



**Slika 1. Model laboratorije i HPGe detektorskog sistema.**



U svrhu eksperimenta modelovana je i olovna zaštita koja okružuje HPGe kristal, kao i laboratorija u kojoj se sistem nalazi. Laboratoriju predstavlja šuplja kocka ispunjena vazduhom, dimenzija stranica 4 m i debljine zidova 20 cm, a materijali su definisani pomoću NIST baze i to kao G4AIR i kao G4Concrete modifikovane gustine. Na zidu ispred detektorskog sistema konstruisan je prozor dimenzije 3,5 x 2,5 m. Svi raspadi K-40 i prirodnih radioaktivnih nizova emitovani su direktno iz zida i poda laboratorije. Jednostavnosti radi, razmatrana je homogena raspodela radionuklida unutar emisione matrice, kao i slučaj da su prirodni radioaktivni nizovi u ravnoteži. Prethodnim gama spektrometrijskim analizama utvrđeno je da su koncentracije aktivnosti Th-232 i Ra-226 građevinskog materijala u zidu približno identične i da iznose  $\sim 45$  Bq/kg, dok je koncentracija K-40 13 puta veća i iznosi  $\sim 600$  Bq/kg. Ove vrednosti, kao i masa emisione zapremine, poslužile su kao polazne tačke prilikom normiranja simuliranih spektara. Koncentracije aktivnosti radona u niskofonskoj laboratoriji imaju maksimalne vrednosti od  $\sim 30$  Bq/m<sup>3</sup>, stoga doprinos radona i njegovih potomaka nije posebno analiziran u ovom radu. Kosmičko zračenje simulirano je pomoću CRY baze [4], iz emisione površine oblika kvadrata dimenzije 0,5 m x 0,5 m postavljene na nekoliko cm od poklopca cilindrične zaštite. Generisano je  $10^7$  čestica, od čega je emitovano  $8,23 \times 10^6$  kosmičkih miona i  $1,77 \times 10^6$  kosmičkih neutrona. Na ovaj način su drastično smanjeni promašaji kristala, a samim tim je i dobijena nešto povoljnija statistika. Poznato je da fluks kosmičkih miona na nivou mora iznosi  $167 \text{ 1/(s * m}^2\text{)}$ , te sledi da će broj generisanih miona iz emisione površine  $0,25 \text{ m}^2$ , koji odgovara vremenu od  $t_{live} = 71128$  s biti:

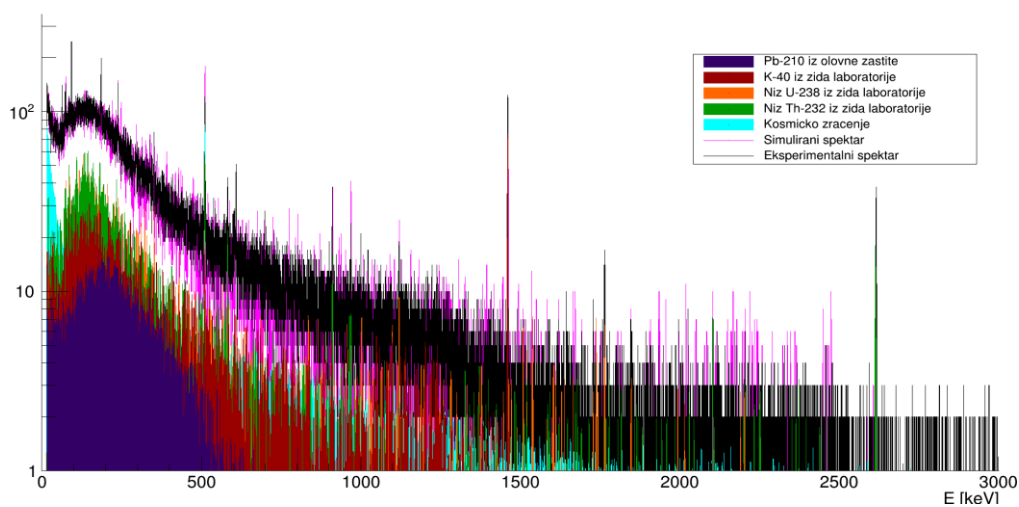
$$N_{\mu} = 167 \frac{1}{\text{s m}^2} \times 0,25 \text{ m}^2 \times 71128 \text{ s} = 2,97 \times 10^6 \#(1)$$

Poznavajući  $N_{\mu}$  moguće je korektno normirati simulirani spektar kosmičkog zračenja. Kako bi se ispitaio doprinos kontaminacije zaštite koja potiče od prisustva primordijalnih elemenata kao što su U-238, a čiji se potomci Pb-210 i Bi-210 ne mogu hemijski separisati prilikom proizvodnje zaštite, simulirano je  $500 \times 10^6$  raspada Pb-210 iz olovnog cilindra i poklopca. Kako je zaštita napravljena od relativno novijeg olova procenjena je aktivnost Pb-210 na  $\sim 200$  Bq/kg. Skaliranje pojedinačnih spektara navedenih komponenti u odnosu na  $t_{live}$ , a i Gausovo širenje spektralnih linija koristeći funkciju zavisnosti širine linije od energije, izvršeno je naknadno pomoću ROOT-a [5]. Kako bi se utvrdila simulirana stopa odbroja i na taj način uporedili simulirani i eksperimentalni rezultate, neophodno je izračunati ekvivalentno vreme  $t_{ekv}$  za koje bi se generisani raspadi od značaja odigrali u stvarnosti. Tako će se, na primer, u slučaju niza U-238, čijih je raspada emitovano ukupno  $8 \times 10^9$ , ekvivalentno vreme dobiti direktno iz pretpostavljene koncentracije aktivnosti od 45 Bq/kg i mase emisione zapremine koja iznosi 16410 kg. Ekvivalentno vreme je tada jednako:

$$t_{ekv} = \frac{8 \times 10^9}{45 \text{ Bq/kg} \times 16410 \text{ kg}} = 10833 \text{ s} \#(2)$$

**Tabela 1. Simulirane komponente i njihov doprinos fonu HPGe detektora.**

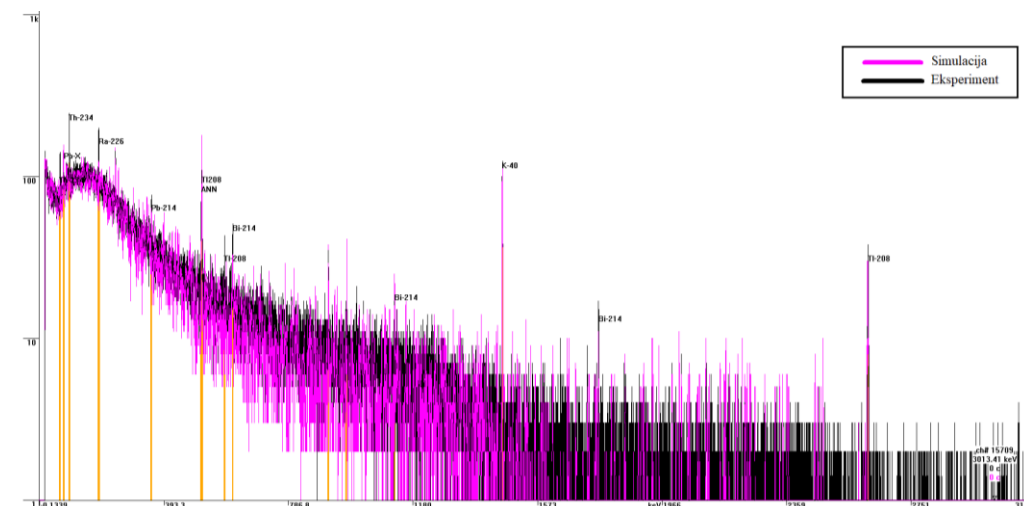
Komponenta fona	Broj generisanih raspada	A [Bq/kg]	I <sub>det</sub> [c]	t <sub>ekv</sub> [s]	R <sub>sim</sub> [c/s]	$\Sigma$	R <sub>exp</sub> [c/s]	Doprinos fonu [%]
Niz U-238	8×10 <sup>9</sup>	45	6507	10833	0,60	2,92	3,02	19,9
Niz Th-232	8×10 <sup>9</sup>	45	8849	10833	0,82			27,1
K-40	10×10 <sup>9</sup>	600	5826	9627	0,61			20,0
Kosmičko zračenje	10×10 <sup>6</sup>	-	122797	197090	0,62			20,6
Pb-210	500×10 <sup>6</sup>	200	14425	52709	0,27			9,1



**Slika 2. Kvalitativni prikaz doprinosa simuliranih komponenti fonu.**

**Tabela 2. Eksperimentalni i simulirani net odbroji pod fotopikovima karakterističnih prirodnih radionuklida.**

E [keV]	Radionuklid	N <sub>exp</sub>	N <sub>sim</sub>	N <sub>sim</sub> / N <sub>exp</sub>
186,1	U-235/Ra-226	555	361	0,65
238,53	Pb-212	373	364	0,98
351,6	Pb-214	220	201	0,91
511	Ann	1070	1220	1,14
609	Bi-214	207	181	0,87
911	Ac-228	170	163	0,96
1120	Bi-214	83	79	0,95
1460,8	K-40	1286	1149	0,89
1764,4	Bi-214	134	117	0,87
2614,6	Tl-208	364	351	0,96



**Slika 3. Eksperimentalni i simulirani gama spektar HPGe detektora u olovnoj zaštiti sa označenim fotopikovima karakterističnih prirodnih radionuklida.**

U tabeli 1 predstavljene su simulirane komponente fona, stopa odbroja za svaku od njih, kao i njihov doprinos celokupnom fonu HPGe detektora u olovnoj zaštiti, dok su u tabeli 2 prikazani net odbroji pod fotopikovima karakterističnih prirodnih radionuklida detektovanih u fonskom spektru, kao i net odbroji dobijeni iz simulacije.

### 3. Diskusija rezultata i zaključak

Poređenjem simuliranog i eksperimentalnog spektra primetno je izvesno neslaganje u regionu od 0,5 MeV do 1,5 MeV što je vidljivo na slikama 2 i 3, gde simulacija neznatno podbacuje u odnosu na eksperiment. Posmatrajući celokupan region od 0 do 3 MeV utvrđeno je veoma dobro slaganje, razlike svega 10 %. Iz dobijenih rezultata zaključujemo da najveći uticaj na fon HPGe detektora imaju upravo primordijalni radioaktivni nizovi, od kojih najveći doprinos ima niz Th-232, dok je doprinos kosmičkog zračenja gotovo identičan onom od U-238 i K-40. Direktnim poređenjem odbroja pod fotopikovima koji potiču od prirodnih gama emitera utvrđeno je relativno dobro slaganje eksperimentalnih i simuliranih rezultata. Odstupanje od 35 % na gama liniji od 186,1 keV može poticati od prisustva U-235 u okruženju detektora, a čiji raspadi ovde nisu simulirani. Ovo nam govori da su prvobitno pretpostavljene koncentracije aktivnosti prirodnih radionuklida koji se nalaze u blizini detektorskog sistema, kontaminacija zaštite, kao i fluks kosmičkog zračenja, relativno dobro procenjeni.

### 4. Zahvalnica

Istraživanja je finansiralo Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije (Ev. br. 451-03-9/2021-14/ 200125)

### 5. Literatura

- [1] M. L'Annunziata, *Handbook of Radioactivity Analysis*, 3rd edition, Academic Press, 2012.
- [2] G. R. Gilmore, *Practical Gamma-ray Spectrometry*, 2nd Edition, John Wiley & Sons, 2008.

- [3] Geant4 User's Guide for Application Developers, Version: Geant4 10.05.p01, 5th March, Geant4 Collaboration, 2019.
- [4] C. Hagmann, D. Lange and D. Wright, Cosmic-ray shower generator (CRY) for Monte Carlo transport codes, *2007 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record*, 2007, 1143-1146.
- [5] Rene Brun, Fons Rademakers, *ROOT - An ObjectOriented Data Analysis Framework*, Nucl. Inst. & Meth. in Phys. Res. A 389, 1997, 81-86.

### EXPLORATION OF BACKGROUND SPECTRAL COMPONENTS OF LEAD SHIELDED HPGE DETECTOR BY MONTE CARLO SIMULATIONS

**Danijel VELIMIROVIĆ, Dušan MRĐA, Jan HANSMAN, Jovana KNEŽEVIĆ,  
Sofija FORKAPIĆ, Kristina BIKIT and Ištvan BIKIT**

*University of Novi Sad, Faculty of Sciences, Department of Physics, Novi Sad, Serbia,  
[danijel.velimirovic@df.uns.ac.rs](mailto:danijel.velimirovic@df.uns.ac.rs), [mrdjad@df.uns.ac.rs](mailto:mrdjad@df.uns.ac.rs), [jan.hansman@df.uns.ac.rs](mailto:jan.hansman@df.uns.ac.rs),  
[jovana.knezevic@df.uns.ac.rs](mailto:jovana.knezevic@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),  
[bikit@df.uns.ac.rs](mailto:bikit@df.uns.ac.rs)*

#### ABSTRACT

This paper presents a Monte Carlo simulation of background spectral components of lead shielded HPGe detector, which originates from natural radionuclides, cosmic radiation and lead contamination. The advantage of Monte Carlo simulation lies in the fact that it is possible to simulate each of these components separately and thus, if necessary, determine which of them has the greatest contribution to the background of HPGe detector. For the purposes of simulation, the geometry of the laboratory, in which the experimental measurement was performed, was simulated. The laboratory, and the emission volume, is represented by a hollow cube measuring 4 m, with a wall thickness of 20 cm, inside which a lead-protected HPGe detector is placed. Within the walls of the matrix, homogeneous distributions of radionuclides K-40 and radioactive sequences of U-238 and Th-232 were considered. Cosmic radiation was simulated using the CRY database, which allows the user to select the desired components, altitude and latitude, while lead protection contamination was simulated by the decay of Pb-210 nuclei. By comparing the obtained and simulated background spectra with the experimental ones, a good agreement was found in the energy region up to 3 MeV, where the individual contributions to the background spectrum of HPGe detectors of each of the mentioned components were determined.

## RAZVOJ METODE ZA SMANJENJE KONCENTRACIJE $^{226}\text{Ra}$ U FOSFOGIPSU

Predrag KUZMANOVIĆ<sup>1,2</sup>, Mirjana ANTONIJEVIĆ NIKOLIĆ<sup>2</sup>, Dušan MRĐA<sup>1</sup>, Sofija FORKAPIĆ<sup>1</sup>, Jan HANSMAN<sup>1</sup> i Jovana KNEŽEVIĆ<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), [mrđjad@df.uns.ac.rs](mailto:mrđjad@df.uns.ac.rs), [sofija@df.uns.ac.rs](mailto:sofija@df.uns.ac.rs), [jan.hansman@df.uns.ac.rs](mailto:jan.hansman@df.uns.ac.rs), [jovana.knezevic@df.uns.ac.rs](mailto:jovana.knezevic@df.uns.ac.rs)

2) Akademija strukovnih studija Šabac, Odsek za medicinske i poslovno-tehnološke studije, Šabac, Srbija, [predrag.kuzmanovic@vmpts.edu.rs](mailto:predrag.kuzmanovic@vmpts.edu.rs), [mantonijevicnikolic@vmpts.edu.rs](mailto:mantonijevicnikolic@vmpts.edu.rs)

### SADRŽAJ

Fosfogips je otpad iz procesa proizvodnje fosforne koseline, kojeg u Srbiji svake godine nastane oko 810 hiljada tona. Imajući u vidu da u sebi može da sadrži različite nečistoće kao i povišenu koncentraciju aktivnosti  $^{226}\text{Ra}$ , njegova upotreba u građevinskoj industriji kao zamena za prirodni gips može biti ograničena. Cilj ovog istraživanja jeste razvoj metode za smanjenje koncentracije aktivnosti  $^{226}\text{Ra}$  u fosfogipsu. Tretman fosfogipsa sa povećanim sadržajem  $^{226}\text{Ra}$  izvršen je u kiseloj sredini uz dodatak  $\text{BaSO}_4$ . Ispitivan je uticaj mešanja i temperature na tretman odnosno koncentraciju aktivnosti  $^{226}\text{Ra}$ . Uočeno je da tretman fosfogipsa može u znatnoj meri smanjiti vrednost koncentracije aktivnosti  $^{226}\text{Ra}$ , ali istovremeno može uticati na smanjenje koncentracije aktivnosti  $^{238}\text{U}$ . Uočeno je da efikasnost uklanjanja radionuklida u izuzetnoj meri zavisi od temperature i efekta mešanja. Takođe uočeno je da ispitivani tretmani nije imao uticaj na sadržaj  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  i  $^{137}\text{Cs}$  u fosfogipsu.

### 1. Uvod

Fosfogips ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) je otpad iz procesne proizvodnje fosforne kiseline ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ) u industriji veštačkih đubriva. Fosforna kiselina se obično proizvodi reakcijom minerala fluor-apatita ( $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$ ) i sumporne kiseline ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) u prisustvu vode (tzv. mokri postupak) na temperaturi između 75 i 80 °C prema reakciji [1-3]:



U odnosu na jednu tonu proizvedene fosforne kiseline, nastane oko 3-5 tona otpadnog fosfogipsa [4]. Prema svom hemijskom sastavu veoma je sličan prirodnom gipsu. Ono što ga razlikuje od prirodnog gipsa i što mu ograničava upotrebu u građevinskoj industriji jeste pvećan sadržaj prirodnih radionuklida, pre svega:  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{210}\text{Po}$  i  $^{234}\text{U}$  [1,3,5,6]. Zbog ovoga fosfogips je svrstan u grupu *NORM* materijala (eng. *Naturally-Occurring Radioactive Materials*). Pored radionuklida može da sadrži i ostatke fosfata, fosforne kiseline, fluoride kao i organskih materija, ostatke olova, arsena, kadmijuma i bakra [3,6,7].

Upotreba fosfogipsa u građevinskoj industriji sa povećanim sadržajem  $^{226}\text{Ra}$  predstavlja opasnost od izlaganja ljudi gama zračenju i  $^{222}\text{Rn}$  [4,7]. Koncentracija aktivnosti  $^{226}\text{Ra}$  u fosfogipsu može se kretati od 200 do 3000  $\text{Bq kg}^{-1}$  [8].

U svetu postoje ogromne količine ovog otpada koji se obično odlaže na deponije čije su lokacije u bliziki reka, mora i jezera i predstavlja pretnju po životnu sredinu. Trenutna godišnja proizvodnja fosfogipsa u svetu je oko 160 miliona tona, od čega se 40 miliona

(25 %) proizvede u SAD-u. [2]. Procenjuje se da na Floridi ima nagomilano oko jedne milijarde tona ovog otpada [3]. Danas se samo oko 15 % nastalog otpada fosfogipsa u svetu reciklira, dok preostale količine ostaju deponovane bez ikakvog tretmana, na osnovu čega se može reći da deponije fosfogipsa predstavljaju međunarodni problem. Procenjuje se da se u Srbiji proizvede oko 160 hiljada tona fosforne kiseline i oko 810 hiljada tona otpadnog fosfogipsa [1].

Na globalnom nivou vlada izuzetno veliki interes za razvoj novih metoda kojima bi se smanjila koncentracija radionuklida i time omogućila njegova bezbedna primena u građevinskoj industriji. Do danas su razvijene različite metode za uklanjanje ili smanjenje radionuklida i nečistoća iz fosfogipsa [5, 9-11]. Metode koje su razvijene u ovu svrhu u svetu mogu biti vremenski zahtevne i ekonomski neisplative, te se često mora posezati za sve boljim rešenjima koja teže da zadovolje oba uslova. Razvoj svake metode treba da bude sa ciljem da se dodatno ne ugrozi zdravlje ljudi i životna sredina.

Ovaj rad prikazuje prva zapažanja tokom razvoja metode za uklanjanje  $^{226}\text{Ra}$  u uzorku fosfogipsa sa njegovom povećanom koncentracijom aktivnosti uz praćenje koncentracija aktivnosti i drugih radionuklida.

### 2. Materijal i metode

Uzorak fosfogipsa pribavljen je sa jedne od deponija fosfogipsa fabrike fosforne kiseline u Srbiji. Pre samog hemijskog tretmana fosfogips je sušen 4 h na temperaturi od  $105\text{ }^{\circ}\text{C}$  do konstantne mase. Veličina frakcije korišćena za hemijski tretman je  $\leq 0,25\text{ mm}$ . Prečišćavanje fosfogipsa izvršeno je u aparaturi za refluktovanje, uz zagrevanje na vodenom kupatilu i intenzivno mešanje na magnetnoj mešalici. Uz zagrevanje najpre je rastvoreno  $0,2\text{ g BaSO}_4$  u  $2\text{ ml}$  koncentrovane sumporne kiseline. Dobijenom rastvoru dodato je  $200\text{ ml}$   $28\text{ \% H}_2\text{SO}_4$  i nastavljeno sa zagrevanjem sve dok nije postignuta temperatura od  $95\text{ }^{\circ}\text{C}$ . U zagrejan rastvor dodato je  $50\text{ g}$  fosfogipsa i nastavljeno dalje sa zagrevanjem uz intenzivno mešanje suspenzije na magnetnoj mešalici ( $500\text{ obrtaja min}^{-1}$ ). Po ponovnom postizanju temperature od  $95\text{ }^{\circ}\text{C}$ , rastvor je zagrevan  $15\text{ min}$  uz održavanje temperature i uz intenzivno mešanje. Zatim je smesa ostavljena da se ohladi do sobne temperature. Po hlađenju, čvrsta faza je odvojena od rastvora filtracijom kroz Bihnerov levak. Tretirani fosfogips je ispiran destilovanom vodom u manjim porcijama. Posle sušenja na vazduhu dobijeni proizvod fosfogipsa je naknadno sušen u sušnici i usitnjen. Opisani postupak je ponavljan više puta, kako bi se dobila dovoljna količina fosfogipsa za merenje radioaktivnosti. Dobijenom proizvodu je izmerena koncentracija radionuklida metodom gama spektrometrije. Izgled uzorka fosfogipsa 1 pre i posle tretmana prikazan je na Slici 1.



**Slika 1. Slika osušenog uzorka fosfogipsa 1 pre tretmana (levo) i posle tretmana (desno).**

Efikasnost uklanjanja radionuklida ( $E$ ) izračunata je prema relaciji:

$$E = \frac{C_0 - C_f}{C_0} \cdot 100 \quad [\%] \quad [2]$$

gde je  $C_0$  početna koncentracija aktivnosti radionuklida a  $C_f$  konačna koncentracija aktivnosti radionuklida nakon tretmana izražene u  $\text{Bq kg}^{-1}$ .

Kako bi se sagledao efekat vremena mešanja na uklanjanje radionuklida iz fosfogipsa rađeni su eksperimenti u kojima je fosfogips tretiran bez mešanja, eksperiment u kome je vreme mešanja bilo 15 min i eksperiment u kome je vreme mešanja bilo 30 min uz smanjenje temperature na  $75 \text{ }^\circ\text{C}$ . Tretman je sproveden za dva različita uzorka fosfogipsa.

Nakon sprovedenih eksperimenata tretmana, filtracije i ispiranja, fosfogips je sušen i tako pripreman za merenje koncentracija aktivnosti radionuklida metodom gama spektrometrije.

Sadržaj radionuklida u uzorcima fosfogipsa određen je niskofonskim HPGe detektorom tipa ORTEC GMKS sa visokom spektralnom rezolucijom i relativnom efikasnošću od 32,4 % za gama pik od  $^{60}\text{Co}$  na 1332 keV sa rasponom energije od 10 keV do 3 MeV unutar olovne zaštite debljine 12 cm sa 3 mm bakarnom oblogom iznutra. Kalibracija efikasnosti je izvršena sa sertifikovanim referentnim materijalom-mešavinom radionuklidnih gama emitera u matrici smole cilindrične geometrije Češkog institute za metrologiju. Gama spektri uzorka su prikupljeni i analizirani pomoću softverskog programa GENIE 2000 [12]. Korišćenjem programa ANGLE izvršena je korekcija na efekat samoapsorpcije, koji nastaje usled matrica različitih gustina. Takva precizna kalibracija je neophodna kako bi se obezbedila mala merna nesigurnost (10 %) pri određivanju aktivnosti radioizotopa u nisko-energijskom opsegu (ispod 100 keV) gde se nalaze gama linije  $^{234}\text{Th}$  (direktni potomak  $^{238}\text{U}$ ) [1].

U svim analiziranim uzorcima pre i posle tretmana izmerena je koncentracija aktivnosti pre svega  $^{226}\text{Ra}$ , ali je tom prilikom praćen i uticaj hemijskog tretmana na koncentracije aktivnosti:  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  i  $^{238}\text{U}$ . Koncentracije aktivnosti  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  i  $^{40}\text{K}$  određene su prema gama linijama datih u radu [13]. Koncentracije aktivnosti  $^{238}\text{U}$  određene su



niskoenergetskom gama linijom od 63 keV njenog prvog potomka  $^{234}\text{Th}$  [12]. Koncentracija aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  određena je iz njegove gama linije na 662 keV. Merenja su sprovedena nakon mesec dana, pošto je bila uspostavljena sekularna radioaktivna ravnoteža između  $^{226}\text{Ra}$  i  $^{222}\text{Rn}$  [1]. Masa uzoraka iznosila je oko 250 g.

### 3. Rezultati i diskusija

Rezultati merenja koncentracija aktivnosti  $^{226}\text{Ra}$  kao i ostalih analiziranih radionuklida metodom gama spektrometrije i efikasnosti uklanjanja  $^{226}\text{Ra}$  i  $^{238}\text{U}$  prikazani su u Tabeli 1. Rezultati su prikazani za dva analizirana uzorka fosfogipsa koji su tretirani  $\text{BaSO}_4$  u kiseloj sredini uz različita vremena mešanja i na različitim temperaturama.

**Tabela 1. Izmerene vrednosti koncentracija aktivnosti radionuklida u fosfogipsu pre i posle tretmana i efikasnost uklanjanja radionuklida ( $E$ ).**

Naziv uzorka	Vreme mešanja (temperatura)	Koncentracije aktivnosti radionuklida ( $\text{Bq kg}^{-1}$ )					$E_{\text{Ra}}$ (%)	$E_{\text{U}}$ (%)
		$^{226}\text{Ra}$	$^{232}\text{Th}$	$^{40}\text{K}$	$^{137}\text{Cs}$	$^{238}\text{U}$		
<b>Fosfogips 1, (pre tretmana)</b>	-	<b>568±5</b>	<b>4,3±0,9</b>	<b>&lt; 17</b>	<b>&lt; 2,2</b>	<b>135±6</b>	-	-
Fosfogips 1 tretiran $\text{BaSO}_4$ uz mešanje	15 min (95 °C)	358±3	3,0±0,7	6±4	< 1,5	114±5	36,9	15,6
Fosfogips 1 tretiran $\text{BaSO}_4$ bez mešanja	0 min (95 °C)	565±13	3,9±1,1	< 6	< 2,8	70±3	0,5	48,1
<b>Fosfogips 2, (pre tretmana)</b>	-	<b>666±7</b>	<b>2,0±0,9</b>	<b>&lt; 16</b>	<b>&lt; 2,1</b>	<b>143±6</b>	-	-
Fosfogips 2 tretiran $\text{BaSO}_4$ uz mešanje	30 min (75 °C)	495±3	2,2±0,8	< 15	< 1,8	105±5	25,7	26,6

Kod uzorka fosfogipsa sa izmerenom vrednošću koncentracije aktivnosti  $^{226}\text{Ra}$  od  $568\pm 5 \text{ Bq kg}^{-1}$  nakon tretmana uz mešanje od 15 minuta na temperaturi od 95 °C izmerena je koncentracija aktivnosti  $^{226}\text{Ra}$  od  $358\pm 3 \text{ Bq kg}^{-1}$  što ukazuje na efikasnost uklanjanja od 36,9 %. Može se videti da je kod istog uzorka pre tretmana izmeren prilično nizak sadržaj  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  i  $^{137}\text{Cs}$ , dok je izmerena koncentracija  $^{238}\text{U}$  iznosila  $135\pm 6 \text{ Bq kg}^{-1}$ . Nakon tretmana uočava se smanjenje koncentracije aktivnosti  $^{238}\text{U}$  na vrednost od  $114\pm 5 \text{ Bq kg}^{-1}$ , što ukazuje na efikasnost uklanjanja od 15,6 %. Kod istog uzorka tokom tretmana bez mešanja uz zagrevanje na 95 °C nije uočena promena koncentracije aktivnosti  $^{226}\text{Ra}$ , dok se koncentracija aktivnosti  $^{238}\text{U}$  smanjila sa  $135\pm 6 \text{ Bq kg}^{-1}$  na  $70\pm 3 \text{ Bq kg}^{-1}$  što daje efikasnost uklanjanja od 48,1 %. Koncentracije aktivnosti ostalih analiziranih radionuklida nisu imale značajnu efikasnost uklanjanja imajući u vidu njihove niske izmerene vrednosti, kao i njihove merne nesigurnosti. U drugom uzorku fosfogipsa izmerena je vrednost koncentracije aktivnosti  $^{226}\text{Ra}$  od  $666\pm 7 \text{ Bq kg}^{-1}$ , a tretman je izvršen uz povećanje vremena mešanja na 30 min i smanjenje temperature na 75 °C izmerena je koncentracija aktivnosti  $^{226}\text{Ra}$  od  $495\pm 3 \text{ Bq kg}^{-1}$  što daje efikasnost uklanjanja od 25,7 %. Istovremeno koncentracija aktivnosti  $^{238}\text{U}$  smanjena je sa  $143\pm 6 \text{ Bq kg}^{-1}$  na  $105\pm 5 \text{ Bq kg}^{-1}$  što je dalo efikasnost uklanjanja radionuklida od 26,6 %.

Iz dobijenih rezultata iz Tabele 1 može se videti da su mešanje i temperatura dva ključna faktora koja mogu u znatnoj meri da utiču na izmerenu koncentraciju aktivnosti  $^{226}\text{Ra}$ , dok smanjeno vreme mešanja pozitivno utiče na smanjenje koncentracije aktivnosti  $^{238}\text{U}$ .

Kako je u eksperimentima korišćena frakcija fosfogipsa  $\leq 0,25$  mm, koja sadrži veliki udeo kvarca uočen je otežan rad magnetne mešalice i ravnomerno mešanje sistema. Iz tog razloga su eksperimenti rađeni sa manjim količinama fosfogipsa. Za dalja istraživanja potrebno je raditi sa manjom frakcijom koja sadrži manji udeo kvarcne komponente i veću koncentraciju aktivnosti  $^{226}\text{Ra}$  [1].

#### 4. Zaključak

Imajući u vidu dobijene rezultate gde se pokazalo da se koncentracija  $^{226}\text{Ra}$  u uzorku fosfogipsa mogla smanjiti i do 37 %, evidentno je da ovakav način tretmana sa  $\text{BaSO}_4$  u kiseloj sredini daje pozitivne efekte uz dobru efikasnost. Ovakav način ne samo da ima efekat na uklanjanje  $^{226}\text{Ra}$ , već ima i efekat uklanjanja  $^{238}\text{U}$  u manjoj ili većoj meri u zavisnosti od temperature i efekta mešanja. Očito je da ovakav način tretmana sa  $\text{BaSO}_4$  nije imao uticaj na i onako niske koncentracije  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  i  $^{137}\text{Cs}$ .

Potreban je dalji razvoj metode gde bi se uključili i optimizovali vreme mešanja, temperatura, ali i drugi parametri koji bi mogli uticati na snižavanje koncentracije aktivnosti  $^{226}\text{Ra}$ . Potrebno je ispitati i uticaj veličine frakcije na proces tretiranja ovakvim hemijskim postupkom.

#### 5. Zahvalnica

Autori se zahvaljuju na finansijskoj podršci od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije (Ev. br. 451-03-9/2021-14/ 200125).

#### 6. Literatura

- [1] P. Kuzmanović, N. Todorović, S. Forkapić, L. Filipović Petrović, J. Knežević, J. Nikolov, B. Miljević. Radiological characterization of phosphogypsum produced in Serbia. *Radiat. Phys. Chem.*, 166, 2020. 108463.
- [2] IAEA, 2013. Radiation Protection and Management of NORM Residues in the Phosphate Industry. Safety Reports Series No. 78. International Atomic Energy Agency, Vienna, 2013
- [3] K. Kovler. Radioactive materials. *Toxicity of Building Materials*, 2012. 196–240.
- [4] P. Kuzmanović, N. Todorović, D. Mrđa, S. Forkapić, L. Filipović Petrović, B. Miljević, J. Hansman, J. Knežević. The possibility of the phosphogypsum use in the production of brick: radiological and structural characterization. *J. Hazard Mater.*, 413, 2021. 125343.
- [5] H. El-Didamony, M.M. Ali, N.S Awwad, M.M. Fawzy, M.F. Attallah. Treatment of phosphogypsum waste using suitable organic extractants. *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, 291, 2012. 907–914.
- [6] A.M. Rashad. Phosphogypsum as a construction material. *J. Clean. Prod.*, 166, 2017. 732–743.
- [7] M.B. Nisti, M.P. de Campos. B P. Mazzilli. Natural radionuclides content and radon exhalation rate from Brazilian phosphogypsum piles. *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, 299(1), 2014. 261–264.

- [8] USEPA, 1990. United States Environmental Protection Agency (U.S. EPA), Report to Congress on Special Wastes from Mineral Processing: Summary and Findings, Washington, 1990.
- [9] M. S. Al-Hwaiti. Assessment of the radiological impacts of treated phosphogypsum used as the main constituent of building materials in Jordan. *Environ. Earth. Sci.*, 74(4), 2015. 3159–3169.
- [10] H. El-Didamony, H.S. Gado, N.S. Awwad, M.M. Fawzy M.F. Attallah. Treatment of phosphogypsum waste produced from phosphate ore processing. *J. Hazard. Mater.*, 244-245, 2013. 596–602.
- [11] D. Nizevičienė, D. Vaičiukynienė, B. Michalik, M. Bonczyk, V. Vaitkevičius V. Jusas, The treatment of phosphogypsum with zeolite to use it in binding material. *Constr. Build. Mater.*, 180, 2018. 134–142.
- [12] K.S Kalkan, S. Forkapić, S.B. Marković, K. Bikit, M.B. Gavrilov, R. Tošić, D. Mrđa and R. Lakatoš. The application of  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{210}\text{Pb}$  exmethods in soil erosion research of Titel loess plateau, Vojvodina, Northern Serbia. *Open Geosci.*, 12(1), 2020, 11-24.
- [13] J. Knezević, P. Kuzmanović, D. Mrdja, N. Todorović, I. Bikit, J. Hansman. Estimation of absorbed gamma dose rate from granite by Monte Carlo simulation approach. *J. Radiol. Prot.*, 40, 2020. 596–611.

**DEVELOPMENT OF A METHOD FOR REDUCING  $^{226}\text{Ra}$  CONCENTRATION  
IN PHOSPHOGYPSUM**

**Predrag KUZMANOVIĆ<sup>1,2</sup>, Mirjana ANTONIJEVIĆ NIKOLIĆ<sup>2</sup>, Dušan MRĐA<sup>1</sup>,  
Sofija FORKAPIĆ<sup>1</sup>, Jan HANSMAN<sup>1</sup> and Jovana KNEŽEVIĆ<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), [mrdjad@df.uns.ac.rs](mailto:mrdjad@df.uns.ac.rs), [sofija@df.uns.ac.rs](mailto:sofija@df.uns.ac.rs),

[jan.hansman@df.uns.ac.rs](mailto:jan.hansman@df.uns.ac.rs), [jovana.knezevic@df.uns.ac.rs](mailto:jovana.knezevic@df.uns.ac.rs)

2) *Academy of applied studies in Šabac, Department of medical and  
business-technological studies, Šabac, Serbia,* [predrag.kuzmanovic@vmpts.edu.rs](mailto:predrag.kuzmanovic@vmpts.edu.rs),  
[mantonijevicnikolic@vmpts.edu.rs](mailto:mantonijevicnikolic@vmpts.edu.rs)

**ABSTRACT**

Phosphogypsum is a waste product from the process of phosphoric acid production and in Serbia every year about 810 thousands tons of this by-product is produced. Given that it may contain various impurities as well as an increased activity concentration of  $^{226}\text{Ra}$ , its use in the construction industry as a substitute for natural gypsum may be limited. The aim of this research is to develop a method for reducing the activity concentration of  $^{226}\text{Ra}$  in phosphogypsum. Treatment of phosphogypsum with increased content of  $^{226}\text{Ra}$  was performed in an acidic medium with the addition of  $\text{BaSO}_4$ . The influence of mixing and temperature on the treatment and activity concentration of  $^{226}\text{Ra}$  was investigated. It has been observed that the treatment of phosphogypsum can significantly reduce the value of the activity concentration of  $^{226}\text{Ra}$ , but at the same time it can reduce the activity concentration of  $^{238}\text{U}$ . It has been observed that the efficiency of radionuclide removal extremely depends on the temperature and the mixing effect. It was also observed that the examined treatments had no effect on the content of  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  and  $^{137}\text{Cs}$  in phosphogypsum as well.

## ISPITIVANJE PROTOTIPOVA NOVIH SONDI S2 I S3 MERAČA DMRZ-M15

**Miloš ĐALETIĆ, Nikola KRŽANOVIĆ i Miloš ŽIVANOVIĆ**

*Institut za nuklearne nauke "Vinča", Laboratorija za zaštitu od zračenja i zaštitu životne sredine, Institut od nacionalnog značaja za Republiku Srbiju, Univerzitet u Beogradu, Srbija, [djaletic@vinca.rs](mailto:djaletic@vinca.rs), [krzanovic@vinca.rs](mailto:krzanovic@vinca.rs), [milosz@vinca.rs](mailto:milosz@vinca.rs)*

### SADRŽAJ

*U svrhu monitoringa okoline, kao i merenja kontaminacije, razvijen je dozimetar DMRZ-M15. U ovom radu su prikazani rezultati ispitivanja prototipova novih sondi S2 i S3. Ispitani su: linearnost, energetski odziv, ugaoni odziv i rad pri jačinama ambijentalnog doznog ekvivalenta van mernog opsega. Ispitivanja su izvedena u skladu sa međunarodnim standardima ISO 4037 i IEC 60846. Sonde su energetski kompenzovane i koriste se za merenje jačine ambijentalnog doznog ekvivalenta  $\dot{H}^*(10)$ . Merni opseg sonde S2 je od 0,1  $\mu\text{Sv/h}$  do 10  $\text{mSv/h}$ , a sonde S3 je od 100  $\mu\text{Sv/h}$  do 10  $\text{Sv/h}$ .*

### 1. Uvod

Kontinuirana unapređenja digitalnog merača radioaktivnog zračenja DMRZ-M15 omogućila su korišćenje različitih napona napajanja sondi što je podstaklo razvoj novih sondi korišćenjem Gajger-Milerovih (GM) detektora različitih performansi i proizvođača [1]. Uz prototip dozimetra DMRZ-M15 razvijena je i sonda S1 kao univerzalna sonda koja se može koristiti za merenje jačine ambijentalnog doznog ekvivalenta  $\dot{H}^*(10)$  kao i za detekciju kontaminacije površina radionuklidima koji emituju  $\beta$  i  $\gamma$  zračenje. Međutim, ova sonda koristi GM detektor koji nije energetski kompenzovan i prilikom merenja X i  $\gamma$  zračenja energija nižih od 200 keV dolazi do izražaja promena osetljivosti detektora u odnosu na referentni kvalitet u kome je etaloniran. Ova promena osetljivosti uzrokuje lažno više izmerene vrednosti ambijentalnog doznog ekvivalenta (primer:  $^{241}\text{Am}$ , X-zračenje...) od stvarnog. Takođe, sonda je osetljiva i na  $\beta$  zračenje, što takođe može dovesti do lažno povišenih izmerenih vrednosti  $\dot{H}^*(10)$  ukoliko se dovoljno ne poznaje vrsta izvora ili kontaminacije. Nasuprot tome, ovo povećanje osetljivosti detektora uzrokuje i poboljšanu detekciju kontaminacije radionuklidima nižih energija  $\gamma$  zračenja, kao i  $\beta$  zračenja (posebno kada je poklopac sonde skinut). Izražena ugaona zavisnost odziva koja je uslovljena samim oblikom detektora (cilindar čiji je prečnik više puta veći od visine tzv. eng. "pancake") olakšava otkrivanje lokacije izvora, ali je manje pogodna za merenje ambijentalnog doznog ekvivalenta. Već prilikom dizajniranja prototipa dozimetra, predviđen je razvoj i sondi koje su energetski kompenzovane i čija je ugaona zavisnost odziva izotropna najmanje u jednoj ravni. Takve sonde nisu pogodne za detekciju kontaminacije i imaju manju osetljivost, ali imaju dobru energetsku zavisnost i u velikoj meri su neosetljive na  $\beta$  zračenje, što je ključno za što tačnije merenje  $\dot{H}^*(10)$ . U ovom radu su dati preliminarni rezultati ispitivanja energetski kompenzovanih sondi S2 i S3 (slika 1), prve za niže a druge za više jačine doze. Merni opseg sonde S2 je od 0,1  $\mu\text{Sv/h}$  do 10  $\text{mSv/h}$ , a sonde S3 je od 100  $\mu\text{Sv/h}$  do 10  $\text{Sv/h}$ .



**Slika 1. Izgled kućišta sonde S2 i S3.**

### **2. Postavka merenja i korišćeni instrumenti**

Ispitivanja su vršena prema standardu Međunarodne elektrotehničke komisije IEC 60846-1:2009 u kome su definisani zahtevi za prenosne ambijentalne merače i monitore zračenja. Zahtev koji se postavlja je da promena osetljivosti detektora za bilo koji kvalitet X i  $\gamma$  zračenja u opsegu energija od 80 keV do 1,5 MeV i opsegu upadnog ugla od  $\pm 45^\circ$  u odnosu na osetljivost u referentnom kvalitetu i upadnom uglu ( $^{137}\text{Cs}$ ,  $\angle 0^\circ$ ) bude u opsegu od -29 % do +67 % [2]. Referentne vrednosti kerme u vazduhu su određene u SSDL Instituta za nuklearne nauke „Vinča“ (VINS-SSDL), preko sekundarnog standarda PTW 32002 (jonizaciona komora – 11). Vrednosti ambijentalnog doznoг еквивалента su utvrđene množenjem vrednosti kerme u vazduhu sa odgovarajućim konverzionim koeficijentima, prema standardu ISO 4037-3 [3]. Za ispitivanje su korišćena polja zračenja uspostavljena prema standardu ISO 4037-1 [4]. Korišćeni su kvaliteti snopova radioaktivnih izvora  $^{60}\text{Co}$  (S-Co) i  $^{137}\text{Cs}$  (S-Cs). Kao izvor X-zračenja korišćen je generator rendgenskog zračenja Hopewell Designs X80-225 kV-E, pomoću kog je postignut ISO kvalitet snopa N-100 srednje energije zračenja od 83 keV.

### **3. Rezultati i diskusija**

Prema standardu IEC 60846-1:2009 opseg merenja ambijentalnog doznoг еквивалента za prenosive dozimetre bi trebao da pokriva opseg od 0,1  $\mu\text{Sv/h}$  do 10 Sv/h, dok je za uobičajenu primenu dovoljan opseg od 1  $\mu\text{Sv/h}$  do 10 mSv/h. Opseg sonde S2 (0,1  $\mu\text{Sv/h}$  – 10 mSv/h) zadovoljava uobičajene potrebe primene u zaštiti od zračenja, a ukoliko se javi potreba za merenjem viših jačina doza, tada se koristi sonda S3 čiji opseg merenja do 10 Sv/h zadovoljava i te potrebe. Jačine ambijentalnog doznoг еквивалента više od 100 mSv/h uglavnom se mere jonizacionim komorama ili silicijumskim poluprovodničkim detektorima (do 1000 Sv/h).

Sonda S2 je etalonirana u kvalitetu S-Cs, dok je sonda S3 etalonirana u kvalitetu S-Co zbog ograničenih mogućnosti izvora S-Cs koje su višestruko niže od mernog opsega sonde S3. Nakon etaloniranja, određena je linearnost merenjem odziva sonde u kvalitetu S-Co i to u okviru pet dekada jačina doza. Rezultati merenja linearnosti za sondu S2 dati su u tabeli 1, a za sondu S3 u tabeli 2. Linearnost je određena tako što je odabrana jedna izmerena vrednost jačine doze (referentna) a zatim su određena relativna odstupanja ostalih vrednosti u odnosu na nju.

**Tabela 1. Linearnost sonde S2 u kvalitetu zračenja S-Co.**

$\dot{H}^*(10)_{\text{ref}}$ [ $\mu\text{Sv/h}$ ]	Izmerena vrednost [ $\mu\text{Sv/h}$ ]	Odnos izmerene i referentne vrednosti	Linearnost [%]
0,5	0,680	1,361	1,74
5	6,640	1,328	-0,70
50	67,55	1,351	1,02
500	668,7	1,337	referentna vrednost
5000	7127	1,425	6,59

**Tabela 2. Linearnost sonde S3 u kvalitetu zračenja S-Co.**

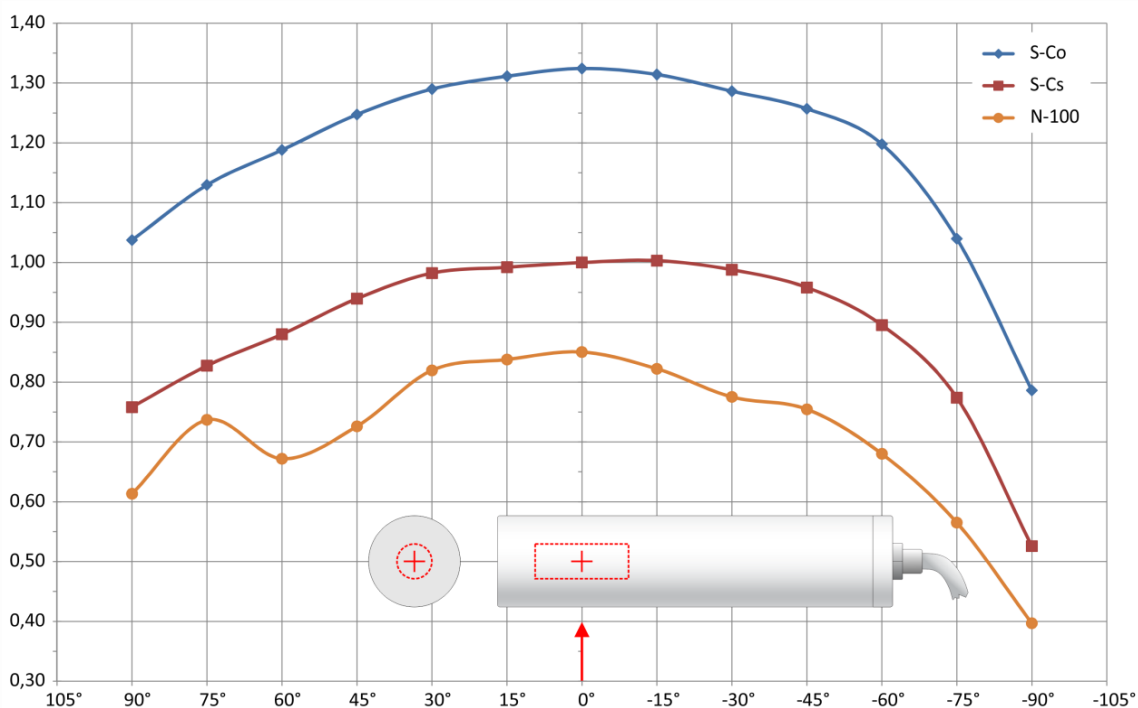
$\dot{H}^*(10)_{\text{ref}}$ [mSv/h]	Izmerena vrednost [mSv/h]	Odnos izmerene i referentne vrednosti	Linearnost [%]
0,1	0,100	1,000	6,47
1	0,943	0,943	0,40
10	9,392	0,939	referentna vrednost
100	96,04	0,960	2,26
1000	1010	1,010	7,54

Standard IEC 60846-1:2009 propisuje da linearnost mora biti u opsegu od -15 % do +22 %. Maksimalna odstupanja izmerenih vrednosti od referentne za sondu S2 su: -0,70 % i +6,59 % što je u skladu sa standardnom. Maksimalno odstupanje izmerenih vrednosti od referentne za sondu S3 je +7,54 % što je takođe u skladu sa standardnom. Sonde S2 i S3 su predviđene za energetski opseg fotonskog zračenja od 80 keV do 1,5 MeV. Standard IEC 60846-1:2009 propisuje da kombinovana energetska i ugaona zavisnost sonde za uglove od 0° do  $\pm 45^\circ$  mora biti u opsegu od -29 % do +67 % u odnosu na referentni kvalitet S-Cs i ugao od 0°. Rezultati ispitivanja sonde S2 dati su u tabeli 3, dok u toku pisanja ovog rada sonda S3 još uvek nije ispitivana.

Sonda S2 je ispitivana u opsegu uglova od 0° do  $\pm 90^\circ$  sa korakom od 15° za kvalitete zračenja N-100, S-Cs i S-Co. Referentna tačka za pozicioniranja sonde je u preseku oznaka + prikazanih crvenom bojom na slici 2 i ona predstavlja centar aktivne zapremine detektora. Pri referentnom uglu od 0°, kolimisani snop zračenja pada normalno na pravougaonu površinu označenu crvenom strelicom. Isprekidanim crvenim linijama je prikazana pozicija GM cevi u kućištu sonde. Energetska zavisnost u odnosu na referentni kvalitet S-Cs data je u trećem redu tabele 3. Ona se kreće od -15 % do +32 % što je u opsegu granica propisanih standardom. Ugaona zavisnost je data u nastavku tabele i to za svaki kvalitet pojedinačno u odnosu na referentni ugao od 0°. Očekivano, najveće odstupanje se uočava kod kvaliteta N-100 i to -15 % u opsegu od  $\pm 45^\circ$  (prema standardu). Kombinovana energetska i ugaona zavisnost za ispitivane kvalitete data je na slici 2. Maksimalno pozitivno odstupanje se dobija pri kvalitetu S-Co i uglu od 0° i iznosi +32 %, dok je maksimalno negativno odstupanje pri kvalitetu N-100 i uglu od -90° i iznosi -60 %. Maksimalno negativno odstupanje u opsegu  $\pm 45^\circ$  (opseg prema standardu) iznosi -27 %. Dobijena odstupanja u opsegu uglova  $\pm 45^\circ$  su u granicama propisanim standardom.

Tabela 3. Relativni energetska odziv sonde S2 u odnosu na referentni kvalitet S-Cs i referentni ugao od 0°.

	Kvalitet snopa		
	<i>N-100</i>	<i>S-Cs</i>	<i>S-Co</i>
Relativni energetska odziv u odnosu na referentni kvalitet S-Cs	0,85	<b>1,00</b>	1,32
Ugao	Relativni odziv u odnosu na referentni ugao od 0° za pojedinačni kvalitet snopa		
-90°	0,47	0,53	0,59
-75°	0,66	0,77	0,79
-60°	0,80	0,90	0,90
-45°	0,89	0,96	0,95
-30°	0,91	0,99	0,97
-15°	0,97	1,00	0,99
<b>0°</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>
15°	0,99	0,99	0,99
30°	0,96	0,98	0,97
45°	0,85	0,94	0,94
60°	0,79	0,88	0,90
75°	0,87	0,83	0,85
90°	0,72	0,76	0,78



Slika 2. Relativni ugaoni i energetska odziv sonde S2 u odnosu na referentni kvalitet S-Cs i ugao od 0°.



Sonda S2 je ispitivana i pri jačini doze van njenog mernog opsega i to na 1 Sv/h. Uređaj DMRZ-M15 je detektovao jačinu doze van opsega merenja sonde i prikazao alarmnu poruku na displeju. Ispitivanje sonde S3 nije izvršeno zbog tehničkih ograničenja tj. nepostojanja izvora koji može da emituje jačinu ambijentalnog doznog ekvivalenta od 1000 Sv/h (sto puta veća jačina doze od maksimalne definisane mernim opsegom sonde).

#### 4. Zaključak

Do sada dobijeni rezultati ispitivanih karakteristika sondi S2 i S3 zadovoljavaju uslove postavljene standardom IEC 60846-1:2009. Potrebno je obaviti još ispitivanja, ali trenutni zaključak je da su karakteristike sonde odgovarajuće predviđenoj nameni i da bi uskoro moglo da se počne sa pripremama za proizvodnju novih modela. Ovime bi se upotpunila ponuda sondi za digitalni merač zračenja DMRZ-M15 u oblasti merenja ambijentalnog doznog ekvivalenta sondama baziranim na GM detektorima.

#### 5. Literatura

- [1] Miloš Đaletić. Unapređenja digitalnog merača radioaktivnog zračenja DMRZ-M15 i prototip stacionarnog alarmnog merača DMRZ-M15A. *Zbornik radova XXX simpozijuma Društva za zaštitu od zračenja Srbije i Crne Gore*, 2 – 4. oktobar 2019, Divčibare, Srbija, 2019. 312–317.
- [2] *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, Geneva, 2009.
- [3] *ISO 4037-3:2019, X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and doserate meters and for determining their response as a function of photon energy – Part 3: Calibration of area and personal dosimeters and the measurement of their response as a function of energy and angle of incidence*, ISO, Geneva, 2019.
- [4] *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.

**PROTOYPE TESTING OF NEW PROBES S2 AND S3 FOR DMRZ-M15  
SURVEY METER**

**Miloš ĐALETIĆ, Nikola KRŽANOVIĆ and Miloš ŽIVANOVIĆ**

*"VINČA" Institute of Nuclear Sciences - National Institute of the Republic of Serbia,  
University of Belgrade, Belgrade, Serbia, [djaletic@vinca.rs](mailto:djaletic@vinca.rs), [krzanovic@vinca.rs](mailto:krzanovic@vinca.rs),  
[milosz@vinca.rs](mailto:milosz@vinca.rs)*

**ABSTRACT**

For the purpose of environmental monitoring, as well as measurement of contamination, the DMRZ-M15 survey meter was developed. This paper presents the results of testing prototypes of new probes S2 and S3. The following were examined: linearity, energy response, angular response and operation at ambient dose equivalent rate outside the measuring range. The tests were performed in accordance with international standards ISO 4037 and IEC 60846. The probes are energy compensated and are used to measure the ambient dose equivalent  $\dot{H}^*(10)$ . The measuring range of probe S2 is from 0.1  $\mu\text{Sv/h}$  to 10  $\text{mSv/h}$ , and of probe S3 is from 100  $\mu\text{Sv/h}$  to 10  $\text{Sv/h}$ .

**ЗАШТИТА ОД ЗРАЧЕЊА  
У МЕДИЦИНИ**

**PROCENA VREDNOSTI PARAMETARA MATEMATIČKOG MODELA ZA  
RADIJACIONI IZLAZ RENDGEN-APARATA U DIJAGNOSTIČKOJ  
RADIOLOGIJI**

**Andrea KOJIĆ, Predrag BOŽOVIĆ, Nikola KRŽANOVIĆ,  
Jelena STANKOVIĆ PETROVIĆ i Miloš ŽIVANOVIĆ**  
*Institut za nuklearne nauke “Vinča”, Univerzitet u Beogradu, Srbija,*  
[andrea.kojic@vin.bg.ac.rs](mailto:andrea.kojic@vin.bg.ac.rs), [bozovic@vin.bg.ac.rs](mailto:bozovic@vin.bg.ac.rs), [krzanovic@vinca.rs](mailto:krzanovic@vinca.rs),  
[jelena.stankovic@vinca.rs](mailto:jelena.stankovic@vinca.rs), [milosz@vinca.rs](mailto:milosz@vinca.rs)

**SADRŽAJ**

*Primena jonizujućeg zračenja u medicini je neizbežan deo moderne medicinske dijagnostike. S obzirom na globalni porast izlaganja zračenju u medicinske svrhe raste i potreba za optimizacijom doza koje se isporučuju pacijentu. U dijagnostičkoj radiologiji doza koja se isporučuje pacijentu može se proceniti ulaznom dozom na površini kože (Entrance Surface Air Kerma) i jedan od metoda za dobijanje ESAK jeste proračun na osnovu vrednosti radijacionog izlaza. Radijacioni izlaz može se izmeriti ili dobiti proračunom pomoću matematičkih formula ili Monte Karlo simulacijama. U ovom radu izmeren je radijacioni izlaz za 15 različitih rendgen-aparata i izračunati su parametri u matematičkoj formuli kako bi se dobio precizniji model za radijacioni izlaz. Rezultati su upoređeni sa rezultatima Monte Karlo simulacija, kao i sa rezultatima dobijenim u sličnim studijama.*

**1. Uvod**

Imajući u vidu da primena jonizujućeg zračenja u medicini obuhvata različite terapijske i dijagnostičke tehnike, kao i da je učestalost izlaganja jonizujućem zračenju u medicini značajno porasla, sa stanovišta zaštite od zračenja javlja se potreba za optimizacijom doze koja se isporučuje pacijentu [1]. U praksi se neretko dešava da su doze koje se isporučuju pacijentu neadekvatne za dobijanje precizne i željene dijagnostičke informacije. Ovo je posledica prekomerne ili nedovoljne izloženosti pacijenta jonizujućem zračenju, zbog čega se javlja potreba za ponovnim izlaganjem pacijenta u kratkom vremenskom periodu. U bilo kom slučaju, neophodno je uraditi procenu zdravstvenih rizika koji mogu biti povećani kao posledica stohastičkog efekta i shodno ALARA principu [2] oni moraju biti svedeni na minimum.

Za procenu doze koja se isporučuje pacijentu u dijagnostičkoj radiologiji koristi se ulazna doza na površini kože - ESAK (*Entrance Surface Air Kerma*) koja se određuje pomoću termoluminescentnih dozimetara (TLD) ili transmissionim jonizujućim komorama (TIC) [3,4]. Takođe je moguće odrediti ESAK koristeći Monte Karlo simulacije [5] ili pomoću lakšeg i manje računarski zahtevnog matematičkog metoda koji se koristi za izračunavanje vrednosti radijacionog izlaza generatora x – zračenja [6,7,8]. Ovaj matematički metod koji u sebi obuhvata parametre ekspozicije (kV, mAs, ukupnu filtraciju) i radijacioni izlaz [5,7,8] se može upotrebiti za optimizaciju doze na površini kože. Merenjem kerme u vazduhu, ukupne filtracije (TF) i napona na rendgenskoj cevi pomoću dozimetra, i uvrščavanjem ovih parametara ekspozicije u matematičku formulu može se dobiti bolja procena radijacionog izlaza generatora x – zračenja u odnosu na vrednost dobijenu direktnim merenjima, što je i cilj ovog istraživanja.

## 2. Metoda

### 2.1. Merenja radijacionog izlaza generatora x – zračenja

Merenja su dobijena koristeći poluprovodnički detektor RTI Electronics MPD [9]. Detektor je postavljen na rastojanju 100 cm od fokusa rendgenske cevi, sa kolimacijom koja obuhvata celu aktivnu zapreminu detektora. Vrednosti koje su merene obuhvataju napon rendgenske cevi, kermu u vazduhu, debljinu poluslabljenja (HVL) i ukupnu filtraciju (TF). Merenja su sprovedena na 15 dijagnostičkih rendgen-aparata (obuhvatajući trofazne i visokofrekventne generatore x – zračenja), za napone u rasponu od 50 kV do 110 kV sa korakom od 10 kV.

### 2.2. Matematički model

Radijacioni izlaz zavisi od napona cevi, proizvoda jačine struje i vremena ekspozicije, i filtracije. U jednačini (1) data je matematička formula koja opisuje ovu zavisnost:

$$Y(U, F) = A \cdot U^B \cdot F^C \quad (1)$$

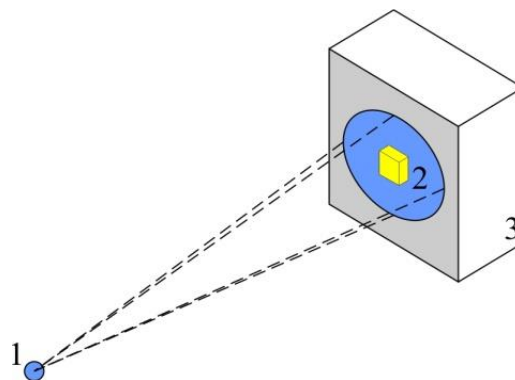
gde je U napon cevi u kV, F je ukupna filtracija u mm Al, Y radijacioni izlaz u mGy/mAs, dok su A, B i C parametri fitovanja. Radijacioni izlaz se iskazuje normiran na proizvod jačine struje i vremena ekspozicije, za lakše poređenje sa podacima koji su objavljeni u literaturi.

Kako bi se dalje analizirali parametri fitovanja, kao ulazni parametri korišćene su vrednosti napona cevi merene detektorom umesto unapred zadatih vrednosti napona, s obzirom na činjenicu da u praksi postoji razlika u merenim i zadatim vrednostima za napon cevi što najviše dolazi do izražaja kod trofaznih generatora.

Fitovanje parametara dobijeno je pomoću stepene funkcije sa jednom zavisnom i dve nezavisne promenljive korišćenjem seta podataka dobijenih merenjem radijacionog izlaza za zadate vrednosti napona. U svrhe fitovanja korišćen je računarski program OriginPro 8.5.1 [10].

### 2.3. Monte Karlo simulacije

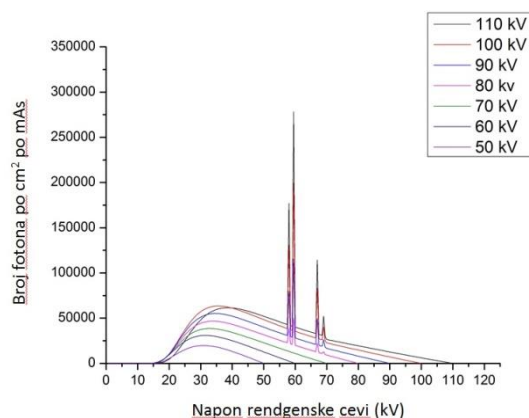
Prema specifikaciji proizvođača, detektor MPD je simuliran kao paralelopiped dimenzija 5 x 20 x 4 mm<sup>3</sup> postavljen na vodeni fantom dimenzija 6 x 30 x 30 cm<sup>3</sup>. Detektor je bio ispunjen vazduhom kako bi se rezultati interpretirali kao kerma u vazduhu (Slika 1).



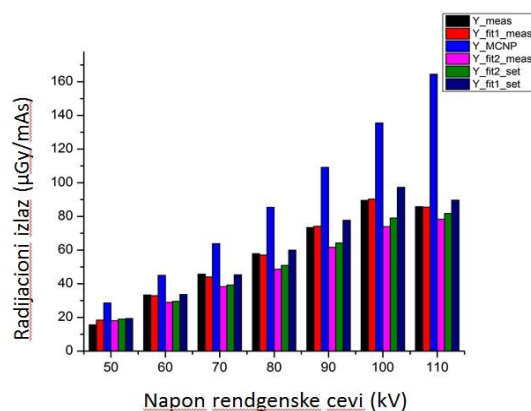
**Slika 1. Geometrijska postavka za Monte Karlo simulacije (1 – izvor x – zračenja, 2 – MPD, 3 – vodeni fantom).**

Izvor x – zračenja dizajniran je kao tačkasti izvor postavljen na rastojanje 100 cm od detektora, upravno na centar detektora. Radijaciono polje koje izvor emituje je

konusnog oblika. Dobijen je spektar x – zračenja pomoću generatora spektra opisanog u IPEM Report 78 [11] za vrednosti napona u opsegu od 50 kV do 110 kV sa korakom od 10 kV, kao i za merene vrednosti napona cevi koje su prikazane u Tabeli 1(Slika 2). ).



**Slika 2. Spektar x – zračenja za zadate vrednosti napona cevi.**



**Slika 3. Kerma u vazduhu dobijena pomoću matematičkog modela i Monte Karlo simulacija.**

Rezultati simulacija dobijeni su pomoću F6 tali je, koja korisniku kao rezultat daje deponovanu energiju usrednjenu po ćeliji u jedinicama MeV/g koja se lako može iskazati kroz kermu u vazduhu. Simulacije su sprovedene u MCNPX programskom kodu [12]. Broj simuliranih čestica za svaku simulaciju iznosio je 30 miliona, što obezbeđuje da tali ja uspešno zadovolji sve statističke testove.

### 3. Rezultati

Izmerene vrednosti za sve veličine (napon, kerma u vazduhu, debljina poluslabljenja i ukupna filtracija) date su u Tabeli 1 kao usrednjene vrednosti za 15 ispitanih rendgen-aparata. Dobijeni parametri fitovanja u ovom radu korišćeni u matematičkom modelu dati su u Tabeli 2.

**Tabela 1. Vrednosti izmerene poluprovodničkim detektorom.**

Zadati napon $U_{set}$ [kV]	Izmereni napon $U_{meas}$ (kV)	Kerma u vazduhu $K_{air}$ (mGy)	Debljina poluslabljenja HVL (mm Al)	Ukupna filtracija TF (mm Al)
50	48,94	15,67	1,89	3,07
60	59,38	33,38	2,32	2,67
70	69,10	45,73	2,77	2,78
80	78,19	57,93	3,24	2,82
90	88,11	73,49	3,69	2,82
100	96,70	89,63	4,14	2,84
110	107,68	85,81	4,58	3,72

**Tabela 2. Parametri fitovanja matematičkog modela za radijacioni izlaz.**

Parametar	Vrednost
A	0,01166
B	2,20614
C	1,08145

Na Slici 3 predstavljene su izračunate vrednosti za kerme u vazduhu. Dobijeni rezultati obuhvataju primenu parametara fitovanja prikazanih u Simo et al. [6] za izmerene ( $Y_{fit2\_meas}$ ) i zadate ( $Y_{fit2\_set}$ ) vrednosti napona rendgeske cevi, primenu parametara fitovanja dobijenih u ovom radu za izmerene ( $Y_{fit1\_meas}$ ) i zadate ( $Y_{fit1\_set}$ ) vrednosti napona kao i rezultate dobijene Monte Karlo simulacijama ( $Y_{MCNP}$ ). Takođe prikazani su i rezultati dobijeni direktnim merenjima kerme u vazduhu ( $Y_{meas}$ ).

#### 4. Diskusija

Izračunato je odstupanje procenjenih vrednosti kerme u vazduhu dobijenih na osnovu matematičkog modela koristeći parametre fitovanja dobijene u ovom radu i Simo et al. i direktno izmerenih vrednosti kerme u vazduhu.

Odstupanje izračunatih vrednosti kerme u vazduhu dobijene koristeći parametre fitovanja određenih u ovom radu iznosi manje od  $\pm 1.5\%$  u odnosu na direktno merene vrednosti kerme u vazduhu za većinu snopova zračenja, sa izuzetkom napona od 50 kV i 70 kV gde su odstupanja  $-18\%$  i  $+3.6\%$ , respektivno. Rezultati odsuptanja izračunate vrednosti kerme u vazduhu koristeći paramere fitovanja date u Simo et al., za izmerene vredosti napona, daju odstupanja vrednosti kerme u vazduhu do  $\pm 17\%$  u odnosu na direktno merene vrednosti kerme u vazduhu, pri čemu je najmanje odstupanje dobijeno za zadatu vrednost napona od 110 kV.

Poređenjem rezultata dobijenih primenom seta parametara fitovanja dobijenih u ovom radu i predloženih u Simo et al. može se zaključiti da su u slučaju većeg broja ispitanih rendgen-aparata odstupanja procenjene od direktno merene vrednosti kerme u vazduhu manja. Za oba seta parametara fitovanja odstupanje je uporedivo samo za snop zračenja koji proizvodi napon od 50 kV.

#### 5. Zaključak

Rezultati ukazuju da parametri fitovanja u matematičkom modelu za radijacioni izlaz mogu da se optimizuju u svrhu dobijanja preciznije formule. Proširivanje istraživanja trebalo bi da obuhvati pribavljanje izmerenih vrednosti kerme u vazduhu i parametara ekspozicije na većem broju rendgen-aparata i razmatranje drugih modela fitovanja parametara.

#### 6. Literatura

- [1] United Nations, "Sources and Effects of Ionizing Radiation (2008 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes A and B)", Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), UN, New York, 2010.
- [2] International Commission on Radiological Protection, "ICRP Publication 103: The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection", 2007.

- [3] N. N. Jibiri, C. J. Olowookere „Patient dose audit of the most frequent radiographic examinations and the proposed local diagnostic reference levels in southwestern Nigeria: Imperative for dose optimisation“, *J. Radiat. Res. Appl. Sci.*, 9, 274–281, 2016.
- [4] N. J. Nnamdi, J. O. Christopher, „Evaluation of dose-area product of common radiographic examinations towards establishing a preliminary diagnostic reference levels (PDRLs) in Southwestern Nigeria“, *J Appl Clin Med Phys*, 17, 392–404, 2016.
- [5] E. Massoud, HM. Diab, “Optimization of Dose to Patient in Diagnostic Radiology Using Monte Carlo Method”, *J Cell Sci Ther*, 5:155, 2014.
- [6] C. R. T. Simo, O. N. Samba, P. K. Talla, L. C. Fai, “Radiation output of Three-phase X-ray machines based on mathematical model”, *J. Radiat. Res. Appl. Sci.*, 13:1, 234-239, 2020.
- [7] A. Alghoul, M. M. Abdalla, H. M. Abubaker, “Mathematical evaluation of entrance surface dose (ESD) for patients examined by diagnostic x-rays”, *Open Access J Sci*, 1(1):8-11, 2017.
- [8] S. Kothan, M. Tungjai, “An Estimation of X-Radiation Output using Mathematic Model”, *Am. J. Appl. Sci.*, 8 (9): 923-926, 2011.
- [9] [http://rtigroup.com/content/downloads/manuals/Manuals%20Old%20Versions/Barracuda\\_and\\_QABrowser\\_Reference\\_Manual\\_-\\_English.pdf](http://rtigroup.com/content/downloads/manuals/Manuals%20Old%20Versions/Barracuda_and_QABrowser_Reference_Manual_-_English.pdf)
- [10] <https://www.originlab.com/index.aspx?go=Products/Origin>
- [11] K. Cranley , B. J. Gilmore, G. W. A. Fogarty and L. Desponds, “IPEM Report 78: Catalogue of Diagnostic X-ray Spectra and Other Data”, The Institute of Physics and Engineering in Medicine (IPEM), York, United Kingdom, 1997.
- [12] D. B. Pelotiwz, MCNPX user’s manual version 2.7.0, LA-CP-11-00438, April 2011.



**OPTIMIZATION OF RADIATION OUTPUT MATHEMATICAL MODEL  
PARAMETERS FOR X-RAY DEVICES USED IN DIAGNOSTIC RADIOLOGY**

**Andrea KOJIĆ, Predrag BOŽOVIĆ, Nikola KRŽANOVIĆ,  
Jelena STANKOVIĆ PETROVIĆ and Miloš ŽIVANOVIĆ**

*Vinca Institute of Nuclear Sciences, University of Belgrade, Serbia,  
[andrea.kojic@vin.bg.ac.rs](mailto:andrea.kojic@vin.bg.ac.rs), [bozovic@vin.bg.ac.rs](mailto:bozovic@vin.bg.ac.rs), [krzanovic@vinca.rs](mailto:krzanovic@vinca.rs),  
[jelena.stankovic@vinca.rs](mailto:jelena.stankovic@vinca.rs), [milosz@vinca.rs](mailto:milosz@vinca.rs)*

**ABSTRACT**

Application of ionizing radiation in medicine is an inseparable part of modern medical diagnostics. With increasing number of medical exposures in the world the need for optimization of doses delivered to patients arises. Doses delivered to the patient in diagnostic radiology can be estimated with Entrance Surface Air Kerma, where one of the methods for obtaining ESAK is the calculation based on radiation output. Furthermore, radiation output can be measured or calculated using mathematical formulas or Monte Carlo simulations. In this paper we measured radiation output for 15 different x-ray devices and calculated parameters for mathematical formula to obtain a more accurate model for radiation output. These results were compared with the results of Monte Carlo simulations and the results obtained in similar studies.

## **ДОЗИМЕТРИЈА**

**EMPIR PROJECT 19NET04 MIRA – JOINT NETWORK PROJECT  
SIGNIFICANCE**

**Nikola KRŽANOVIĆ<sup>1</sup>, Valentin BLIDEANU<sup>2</sup>, Andrea KOJIĆ<sup>1</sup>,  
Predrag BOŽOVIĆ<sup>1</sup> and Miloš ŽIVANOVIĆ<sup>1</sup>**

1) *Vinca Institute of Nuclear Sciences (VINS), University of Belgrade,*  
[krzanovic@vinca.rs](mailto:krzanovic@vinca.rs), [andrea.kojic@vin.bg.ac.rs](mailto:andrea.kojic@vin.bg.ac.rs), [bozovic@vin.bg.ac.rs](mailto:bozovic@vin.bg.ac.rs), [milosz@vinca.rs](mailto:milosz@vinca.rs)

2) *French Atomic Energy Commission (CEA), Gif-sur-Yvette, France*

**ABSTRACT**

*The 19NET04 MIRA Joint Network Project is a project within the EMPIR 2019 call. The main objectives of the project are to establish stakeholder dialogue, to develop the Strategic Research Agenda for the medical use of ionising radiation, to define how current European metrological services meet regulatory and stakeholder needs, to set up a knowledge-sharing programme for the stakeholders and to develop a plan for the European metrology research infrastructure via the European Metrology Network. The project addresses the strong need for a coordinated action on an international level in the different fields of ionising radiation which include medical applications, radiobiology and radiation protection.*

**1. Introduction**

The European Association of National Metrology Institutes (EURAMET) is the Regional Metrology Organisation (RMO) of Europe, which has a goal to enhance benefits of metrology to the society by establishing a balanced European measurement infrastructure. In order to achieve this goal European Metrology Research Programme (EMRP) and European Programme for Innovation and Research (EMPIR) were designed, encouraging the collaboration of European National Metrology Institutes (NMIs) and Designated Institutes (DIs) with the partners in the industry and academia. The EMPIR programme enables collaboration of NMIs and DIs, industrial and medical organisations and academia in various fields including environment, health, energy, industry etc. Joint Network Projects are the projects which facilitate the process of establishing the European Metrology Networks (EMNs). Currently, there are seven established EMNs concerning the following areas: climate and ocean observation, energy gases, mathematics and statistics, quantum technologies, smart electricity grids, smart specialisation in northern Europe and traceability in laboratory medicine. In 2019 EMPIR call, two novel Joint Network Projects have been proposed relating to the area of ionising radiation metrology.

“19NET04 MIRA, Support for a European Metrology Network on the medical use of ionising radiation” is a Joint Network Project from the 2019 Support for Networks call. The project participants are 10 NMIs and DIs from Europe, which will serve as the basis for the creation of the future EMN.

This four-year project will enable facilities and services among the EMN participants and contributors to be shared. A Strategic Research Agenda (SRA) will be proposed for the following decade, while also defining the regulatory needs and offering the knowledge-sharing programme. The structure of the project consists of three work packages, and work packages regarding the impact of the project, and project management and coordination.

### **2. Project overview and objectives**

Due to the rapid and constant development of medical imaging and radiotherapy techniques, there is a strong need for improvement in safety and efficiency of these procedures, by optimising dose delivery to the patient while achieving the desired diagnostic information or therapeutic results. This rapid evolution has induced changes in the International Atomic Energy Agency (IAEA) protocols, impacting metrology techniques, by increasing the complexity of the diagnostic and therapeutic procedures (i.e. MRI-LINAC devices, radiopharmaceuticals and diagnostic procedures using very short radiation pulses etc.). In order to appropriately assess the risk of potential side effects of such procedures, acquisition of accurate radiobiology data is necessary. By introducing shared complex and costly radiobiology facilities to the stakeholders among EMN, the large discrepancies between European countries' metrology infrastructure would be diminished. Currently, the metrology of ionising radiation used in medicine is well represented in standardisation bodies such as International Organisation for Standardisation (ISO) and International Electrotechnic Commission (IEC), but not in more clinically oriented societies such as European Society for Radiotherapy (ESTRO) and European Alliance for Medical Radiation Protection Research (EURAMED). The Joint Network Project would introduce high-level coordination of the metrology community by establishing facilitated stakeholder communication and knowledge sharing via the future EMN. In this way research and development, training and accessibility of metrological infrastructure among EMN members on a European level would be supported.

The specific objectives of the project would firstly be based on establishing constructive dialogue, workshops and similar, between the participating NMIs/DIs and the stakeholders which are involved in the medical applications of ionising radiation, where the communication would be primarily focused towards the research and standardisation. From the EMN point of view the stakeholders could be categorised into the following categories: (1) academic experts, (2) standards development organisations, (3) national and international bodies in the areas of radiation oncology and medical physics, (4) manufacturers of medical equipment, (5) medical staff and professionals. Posterior to the establishment of stakeholder communication, Strategic Research Agenda would be created in communication with the key stakeholders while taking into account the existing roadmaps and networks, such as EURAMED and the Multidisciplinary European Low Dose Initiative (MELODI), and applicable regulation [3]. The knowledge sharing programme for the stakeholders would be initiated in order to facilitate and enhance the exchange of researchers between organisations, promote events which include metrology based workshops, various stakeholder targeted events and training courses. A web-based platform would be created in order to provide accessibility of this programme to the stakeholders. The platform developed under the scope of the project should be maintained by the future EMN. The metrology network for the medical use of ionising radiation would need to be in alignment with existing EMNs and the Technical Committee for Ionising Radiation (TC-IR). The MIRA project EMN would promote the development of emerging member states and extend the collaboration to third countries.

### 3. Project impact

Constructive stakeholder dialogue in priority areas in the field of medical use of ionising radiation would allow complete overview of the gaps and the needs among European countries, with the goal of aligning activities between metrology, research and medical communities. The EMN proposed under the framework of the 19NET04 MIRA would have impact on the metrology community by improving the traceability of exposures during diagnostic, radiotherapy and radiobiology procedures. In order to improve traceability, the procedures used would need to be harmonised, supported by comparisons, and finally by studying correlations between radiation doses and potential biological effects. The consequential results would lead to the development of new standards allowing safer efficient use of medical exposure modalities. Providing the stakeholders across Europe with improved dosimetry and radiobiology capabilities would facilitate the study of stochastic radiation induced biological effects, resulting in better understanding of the radiation induced secondary tumours.

### 4. Acknowledgement

The research presented in this paper was realized within 19NET04 MIRA 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.

### 5. Literature

- [1] EURAMET, EURAMET's European Metrology Networks, <https://www.euramet.org/european-metrology-networks/?L=0> (20.05.2021)
- [2] 19NET04 MIRA, Publishable Summary for 19NET04 MIRA Support for a European Metrology Network on the medical use of ionising radiation, June 2020
- [3] Official Journal of the European Union, Regulation (EU) 2017/745 of the European Parliament and of the Council on medical devices, amending Directive 2001/83/EC, Regulation (EC) No 178/2002 and Regulation (EC) No 1223/2009 and repealing Council Directives 90/385/EEC and 93/42/EC, May 2017.

**EMPIR PROJEKAT 19NET04 MIRA – ZNAČAJ PROJEKTA ZA  
USPOSTAVLJANJE METROLOŠKE MREŽE**

**Nikola KRŽANOVIĆ<sup>1</sup>, Valentin BLIDEANU<sup>2</sup>, Andrea KOJIĆ<sup>1</sup>,  
Predrag BOŽOVIĆ<sup>1</sup> i Miloš ŽIVANOVIĆ<sup>1</sup>**

*1) Vinca Institute of Nuclear Sciences (VINS), University of Belgrade,  
[krzanovic@vinca.rs](mailto:krzanovic@vinca.rs), [andrea.kojic@vin.bg.ac.rs](mailto:andrea.kojic@vin.bg.ac.rs), [bozovic@vin.bg.ac.rs](mailto:bozovic@vin.bg.ac.rs), [milosz@vinca.rs](mailto:milosz@vinca.rs)*

*2) French Atomic Energy Commission (CEA), Gif-sur-Yvette, France*

**SADRŽAJ**

Projekat za uspostavljanje metrološke mreže 19NET04 MIRA predstavlja međunarodni projekat u okviru EMPIR 2019 poziva. Glavni ciljevi projekta jesu uspostavljanje dijaloga interesenata (stejkholdera), stvaranje strateškog plana razvoja za medicinske primene jonizujućeg zračenja, ispitivanje u kojoj meri trenutne metrološke mogućnosti evropskih instituta zadovoljavaju potrebe regulatornih tela i interesanata, postavljanje programa razmene znanja i razvoj plana za evropsku metrološku infrastrukturu putem evropske metrološke mreže. Projekat će dati odgovor na potrebu za koordiniranim aktivnostima na međunarodnom nivou u različitim oblastima primene jonizujućeg zračenja u medicini, radiobiologiji i zaštiti od zračenja.

**БИОЛОШКИ ЕФЕКТИ  
ЈОНИЗУЈУЋИХ ЗРАЧЕЊА**

## ANALIZA ZDRAVSTVENOG STANJA NAKON OBAVLJENIH PERIODIČNIH PREGLEDA ZAPOSLENIH NA EKSPLOATACIJI SIROVE NAFTE

**Sladana VUKOVIĆ, Milenko ĐUKIĆ, Jelena PAJIĆ i Boban RAKIĆ**

*Institut za medicinu rada Srbije „Dr Dragomira Karajović“, Beograd, Srbija,*

*[sladjana.vukovic@institutkarajovic.rs](mailto:sladjana.vukovic@institutkarajovic.rs), [djukicmilenko@gmail.com](mailto:djukicmilenko@gmail.com),*

*[jelena.pajic@institutkarajovic.rs](mailto:jelena.pajic@institutkarajovic.rs), [rakicboban@yahoo.co.uk](mailto:rakicboban@yahoo.co.uk)*

### SADRŽAJ

*Zatvoreni izvori se koriste za merenje geoloških karakteristika (poroznost, gustina, elementarni sastav), u bušotinama za istraživanje minerala, nafte i gasa. Cilj rada je analiza zdravstvenog stanja zaposlenih na eksploataciji nafte, nakon obavljenih periodičnih pregleda. Pregledano je 75 radnika, muškog pola, prosečne starosti 40 godina, prosečnog ekspozicionog staža 8 godina. Trinaest pregledanih je bez postavljene dijagnoze, dok je kod 62 pregledana utvrđeno 124 dijagnoza i patoloških stanja prema Međunarodnoj klasifikaciji bolesti - X revizija. Od utvrđenih dijagnoza najzastupljenije su bolesti žlezda sa unutrašnjim lučenjem, ishrane i metabolizma (29 %). Slede bolesti oka u smislu refrakcionih anomalija. Kod 3 radnika uočen je povišen arterijski pritisak bez ranije postavljene dijagnoze hipertenzije, kod istog broja registrovan je de novo poremećaj funkcije štitaste žlezde i poremećaj plućne funkcije, a kod 11 povišena glikemija. Analiza pokazuje značajno prisustvo faktora rizika za nastanak kardiovaskularnih bolesti, što je u skladu sa velikim brojem studija koje proučavanju efekte jonizujućih zračenja na kardiovaskularni sistem pri izlaganju malim dozama. Ipak, za donošenje ozbiljnijeg zaključka potrebne su dobro planirane epidemiološke studije na većem broju ispitanika, a koje će isključiti uticaje confounding faktora za nastanak cirkulatornih oboljenja.*

### 1. Uvod

Procenjen broj industrijskih radnika u 2002. godini iznosi 0,9 miliona, od ukupno 22,8 miliona radnika izloženih jonizujućim zračenjima na svojim radnim mestima. Oni primaju prosečnu godišnju efektivnu dozu od 0,3 mSv, sa trendom smanjenja doze od 1,6 mSv koja je zabeležena u 1975. godini. Zatvoreni izvori ili manji rendgen uređaji se često koriste za merenje geoloških karakteristika (poroznost, gustina, elementarni sastav), u bušotinama za istraživanje minerala, nafte i gasa. U nekim zemljama je korišćenje izvora u geološke svrhe identifikovano kao industrijska upotreba koja može dovesti do većeg profesionalnog izlaganja jonizujućim zračenjima [1]. Počeci u primeni jonizujućih zračenja pokazali su izražene efekte zračenja na žive sisteme – radiobiološko dejstvo. Jonizujućim zračenjem mogu biti oštećena sva tkiva i organi, ali dugogodišnja praksa izdvojila je najosetljivije, čije se stanje kontinuirano prati u okviru preventivnih zdravstvenih pregleda [2, 3, 4, 5, 6]. U cilju unapređenja preventivnih programa i njihove primene u domenu zaštite zdravlja i radne sposobnosti radnika potrebno je i poznavanje parametara zdravstvenog stanja. Morbiditet radnika predstavlja jedan od najvažnijih pokazatelja i merila nivoa zdravstvenog stanja [7].

### 2. Cilj rada

Cilj rada je analiza zdravstvenog stanja radnika zaposlenih na eksploataciji sirove nafte, nakon obavljenih periodičnih pregleda.



### 3. Materijal i metode

Studija preseka je sprovedena u periodu od decembra 2018. godine do decembra 2019. godine u Institutu za medicinu rada Srbije „Dr Dragomir Karajović“. Za studiju retrospektivne prirode analizirani su rezultati dobijeni iz kartona preventivnih periodičnih pregleda zaposlenih u zoni jonizujućih zračenja, u skladu sa etičkim načelima Helsinške deklaracije i načelima Etičkog komiteta Instituta. Pregledano je ukupno 75 radnika u skladu sa elementima pregleda koji su definisani Pravilnikom o prethodnim i periodičnim lekarskim pregledima zaposlenih na radnim mestima sa povećanim rizikom [8] i Pravilnikom o uslovima za dobijanje licence za obavljanje radijacione delatnosti [9]. Analizom su obuhvaćeni svi pregledani radnici upućeni na preventivni lekarski pregled. Statistička analiza je sprovedena upotrebom softverskog paketa SPSS, verzija 17 (SPSS for Windows software package, version 17.0 ; SPSS Inc, Chicago, Illinois, USA).

### 4. Rezultati i diskusija

Svi ispitanici su muškog pola, prosečne starosti 40 godina (24-69 god.). Najveći broj pregledanih pripada životnoj dobi od 26 do 35 godina (38,7 %), a slede oni u dobnoj grupi 36 - 45 godina (28,0 %) i 46 - 55 godina (18,6 %). Prosečna dužina radnog staža iznosi 15 godina (u intervalu 0,5-47 god.), a u zoni jonizujućih zračenja pregledani radnici rade u proseku 8 godina (u intervalu 0,5-42 god). Karakteristike ispitanika prikazane su na tabelama 1 i 2.

**Tabela 1. Osnovne karakteristike ispitanika.**

	N	Minimum	Maximum	Prosečna vrednost	Medijana	SD
<b>Godine života</b>	75	24	69	40,16	37,14	11,19
<b>Ukupni radni staž (godine)</b>	75	0,5	47,0	15,31	11,00	11,76
<b>Ekspozicioni radni staž (godine)</b>	75	0,5	42,0	8,34	5,00	10,47

**Tabela 2. Distribucija ispitanika u odnosu na starosnu strukturu.**

Godine	N	%
do 25	3	4,0
26-35	29	38,7
36-45	21	28,0
46-55	14	18,6
56 i više	8	10,7

Ukupno 13 pregledanih je bez postavljene dijagnoze. Kod 62 pregledana ispitanika utvrđeno je 124 dijagnoza i patoloških stanja prema Međunarodnoj klasifikaciji bolesti - X revizija (1996), a njihova distribucija prikazana je u tabeli 3. Od toga više od polovine ovih pregledanih ima postavljene dve ili više dijagnoza.

**Tabela 3. Distribucija utvrđenih dijagnoza i patoloških stanja prema grupi bolesti.**

<b>Grupe bolesti</b>	<b>N</b>	<b>%</b>
Zarazne bolesti i parazitarne bolesti	1	0,8
Tumori	2	1,6
Bolesti krvi	5	4,0
Bolesti žlezda sa unutrašnjim lučenjem, ishrane i metabolizma	36	29,0
Bolesti nervnog sistema	1	0,8
Bolesti oka i pripojaka oka	29	23,4
Bolesti uva i mastoidnog nastavka	3	2,4
Bolesti sistema krvotoka	11	8,9
Bolesti sistema za disanje	7	5,7
Bolesti kože	1	0,8
Bolesti mišićno-koštanog sistema i vezivnog tkiva	2	1,6
Bolesti urinarnog trakta	1	0,8
Simptomi, znaci, patološki klinički i laboratorijski nalazi	25	20,2
Ukupno	124	100

Od svih utvrđenih dijagnoza najzastupljenije su bolesti žlezda sa unutrašnjim lučenjem, ishrane i metabolizma (29 %). Slede bolesti oka u smislu refrakcionih anomalija, koje zahtevaju upotrebu korekcionih naočara pri radu i različiti simptomi i znaci (bez postavljene dijagnoze). U najvećem broju slučajeva radi se o nalazima koji bitno ne ugrožavaju radnu sposobnost radnika, pre svega to su nalazi poremećaja metabolizma masti (hiperlipoproteinemije) i ubrzana aktivnost jetrinih enzima. Povišen arterijski pritisak ima 8 ispitanika. Na pregledu je kod 3 radnika uočen povišen arterijski pritisak bez ranije postavljene dijagnoze hipertenzije, kod istog broja registrovan je *de novo* poremećaj funkcije štitaste žlezde i poremećaj plućne funkcije, a kod 11 povišena glikemija, što zahteva dalje praćenje. Analiza pojedinačnih dijagnoza prikazana je u tabeli 4.

**Tabela 4. Zastupljenost najčešće utvrđenih pojedinačnih dijagnoza, bolesti i stanja.**

<b>Bolesti i patološka stanja</b>	<b>N</b>	<b>%</b>
Poremećaj metabolizma lipida	25	20,2
Refrakcione anomalije oka	28	22,6
Arterijska hipertenzija	8	6,5
Povišen arterijski pritisak, bez dijagnoze	3	2,4
Hiperglikemija	11	8,9
Bolest štitaste žlezde	4	3,2
Oštećenje sluha	3	2,4
Katarakta	1	0,8
Leukocitoza	5	4,0
Ubrzana aktivnost enzima jetre	6	4,8
Hronični rinfaringitis	5	4,0
Patološki spirometrijski nalaz	3	2,4

## Биолошки ефекти јонизујућих зрачења

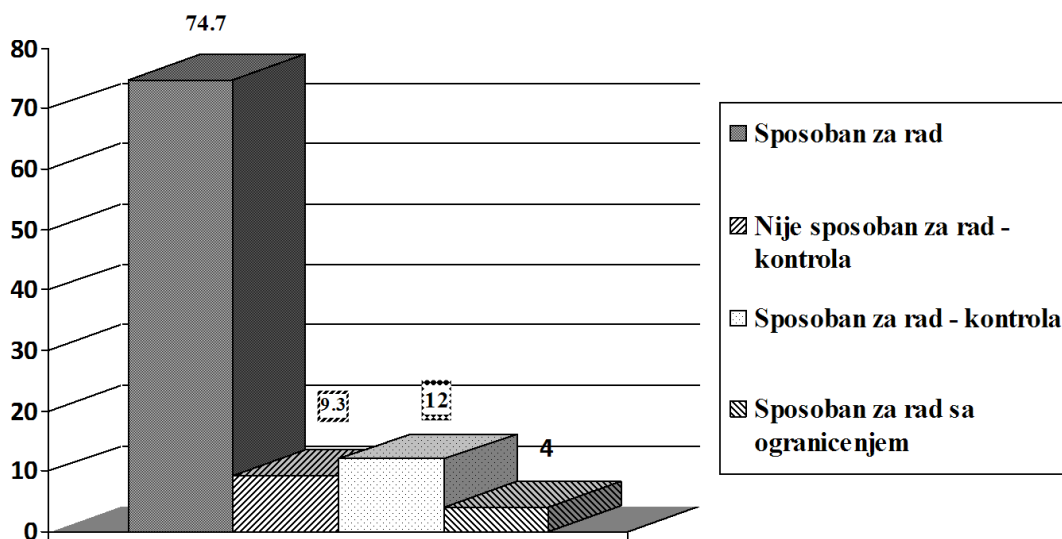
U biohemijskim analizama krvi (tabela 5) uočavaju se povišene vrednosti glikemije (max 12,6), holesterola (max 8,6) i triglicerida (max 7,6), ubrzana aktivnost transaminaza (AST max 215; ALT max 121) i povišen TSH (max 17,285), što je bio razlog najčešće dijagnostikovanih bolesti i stanja.

**Tabela 5. Karakteristike nekih biohemijskih analiza.**

Analiza	N	Minimum	Maximum	Prosečna vrednost	SD
Glikemija (mmol/l)	75	4,0	12,6	5,64	1,12
Holesterolemija (mmol/l)	75	3,3	8,6	5,72	1,09
Trigliceridemija (mmol/l)	75	0,32	7,60	1,67	1,19
HDL (mmol/l)	75	0,42	2,62	1,45	0,41
LDL (mmol/l)	75	1,70	6,17	3,52	0,95
Indeks ateroskleroze	75	0,71	4,83	2,59	0,85
AST (U/l)	75	14	215	31,43	24,77
ALT (U/l)	75	12	121	32,97	20,70
Mokraćna kiselina (umol/l)	75	213,60	766,70	379,21	91,22
TSH (uIU/ml)	75	0,55	17,28	2,14	2,16

U poslednje vreme sve je veći broj studija posvećen proučavanju efekta jonizujućih zračenja na kardiovaskularni sistem pri izlaganju malim dozama [10, 11, 12]. Osnovni uzrok koronarne bolesti srca, moždanog udara i periferne arterijske bolesti je ateroskleroza, čijem nastanku doprinosi pre svega povećan nivo holesterola u krvi [13]. U našem istraživanju najčešće dijagnostikovana oboljenja, posle refrakcionih anomalija, bila su poremećaj metabolizma masti, hiperglikemija i arterijska hipertenzija. Indukcija ili potenciranje ateroskleroze indukovane zračenjem, dovodi do povećanja oštećenja DNK. Smrt ćelija, mitohondrijalna disfunkcija, upala i fibroza su procesi potencirani zračenjem, a svi oni doprinose razvoju ateroskleroze. Međutim, doprinos ovih procesa na razvoj bolesti pri izlaganju malim dozama jonizujućih zračenja nije još dovoljno jasan [14].

Nakon pregleda data je ocena radne sposobnosti, a rezultati su prikazani na grafikonu 1.



**Grafikon 1. Ocena radne sposobnosti kod pregledanih radnika.**

Najveći broj ispitanika je proglašen sposobnim za rad (74,7 %). Sposobnih za rad uz zahtevan kontrolni pregled bilo je 9 ispitanika (12,0 %). Većina, sem jednog, obavili su zahtevani kontrolni pregled i započeli predloženo internističko lečenje i/ili dalje ispitivanje. Kod tri pregledana (4,0 %) data su ograničenja za rad na visini (kod dva ispitanika je zahtevano dalje internističko ispitivanje, kod jednog ispitanika fiziklani tretman), a na zahtevan kontrolni pregled nisu se odazvali. Ocena „nesposoban za rad u zoni jonizujućih zračenja“ data je kod 7 pregledanih (9,3 %), od toga zbog lečenja malignog oboljenja data je ocena bez kontrole kod jednog ispitanika, dok je kod ostalih zahtevan kontrolni pregled na koje su se odazvali.

Nakon obavljenih periodičnih pregleda osam ispitanika (10,7 %) je započelo internističko lečenje/praćenje zbog utvrđenog patološkog stanja, a jedan (1,3 %) je obavio operativno lečenje.

### 5. Zaključak

Uz hipertenziju, poremećaje metabolizma masti i šećera, uočava se značajno prisustvo i drugih faktora rizika za nastanak kardiovaskularnih bolesti, što je u skladu sa sve većim brojem studija koje proučavaju efekte jonizujućih zračenja na kardiovaskularni sistem pri izlaganju malim dozama. Ali, za donošenje ozbiljnijeg zaključka potrebne su dobro planirane epidemiološke studije na većem broju ispitanika, a koje će isključiti uticaje confounding faktora za nastanak cirkulatornih oboljenja.

### 6. Literatura

- [1] Sources And Effects Of Ionizing Radiation. UNSCAER 2008 Report, United Nations, New York, 2010.
- [2] E.J. Hall, A.J. Giaccia. Radiobiology for the Radiologist. Lippincot Williams and Wilkins. New York, 2012.
- [3] D. Panov, P. Čremošnik-Pajić. Zdravstveni nadzor lica koja rade u zoni jonizujućih zračenja. Seminar Jugoslovesnkog društva za zaštitu od zračenja, Cavtat 1988, 88-93.
- [4] S. Milačić. Bolesti izazvane jonizujućim zračenjima. U: Vidaković A, ur. Medicina rada II. Beograd: Udruženje za medicinu rada Jugoslavije, 1997. 621-643.
- [5] Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103, 2007.
- [6] BEIR VII. Report of the Advisory Committee on the Biological Effects of Ionising Radiations. National Academy of Sciences, National Research Council, Washington DC, USA, 2006.
- [7] V. Đorđević. Biostatistika u medicini rada. U: Vidaković A, ur. Medicina rada I. Beograd: Udruženje za medicinu rada Jugoslavije, 1996: 510-513.
- [8] Pravilnik o prethodnim i periodičnim lekarskim pregledima zaposlenih na radnim mestima sa povećanim rizikom, Službeni glasnik Republike Srbije br. 53, 2017.
- [9] Pravilnik o uslovima za dobijanje licence za obavljanje radijacione delatnosti, Beograd: Službeni glasnik Republike Srbije br.50, 2018.
- [10] M.P. Little, E.J. Tawn, I. Tzoulaki, R. Wakeford, G. Hildebrandt, F. Paris, S. Tapio, P. Elliott. Review and metaanalysis of epidemiological associations between low/moderate doses of ionizing radiation and circulatory disease risks, and their possible mechanisms. *Radiat Environ Biophys.* 49. 2010. 49.139–153.

- [11] S.C. Darby, D.J. Cutler, M. Boerma M, et al. Radiation-related heart disease: current knowledge and future prospects. *Int J Radiat Oncol Biol Phys.* 76. 2010. 656–665.
- [12] M.J. Adams, P.H. Hardenbergh, LS. Constine, S.E. Lipshultz. Radiation-associated cardiovascular disease. *Crit Rev Oncol Hematol.* 45. 2003. 55–75.
- [13] J. Stamler, M.L. Daviglius ML, D.B. Garside DB, A.R. Dyer AR, P. Greenland P, J.D. Neaton JD . Relationship of baseline serum cholesterol levels in 3 large cohorts of younger men to long-term coronary, cardiovascular, and all-cause mortality and to longevity. *JAMA* 2000; 284:311–18.
- [14] Advisory Group on Ionising Radiation. Circulatory Disease Risk. Report of the independent Advisory Group on Ionising Radiation. Doc. HPA, RCE-16, Chilton UK, AGIR, 2010.

**ANALYSIS OF THE HEALTH CONDITION AFTER PERIODIC  
INSPECTIONS OF EMPLOYEES ON CRUDE OIL EXPLOITATION**

**Sladana VUKOVIĆ, Milenko ĐUKIĆ, Jelena PAJIĆ and Boban RAKIĆ**  
*Serbian Institute of Occupational Health „Dr Dragomira Karajović“, Belgrade, Serbia,*  
[sladjana.vukovic@institutkarajovic.rs](mailto:sladjana.vukovic@institutkarajovic.rs), [djukicmilenko@gmail.com](mailto:djukicmilenko@gmail.com),  
[jelena.pajic@institutkarajovic.rs](mailto:jelena.pajic@institutkarajovic.rs), [rakicboban@yahoo.co.uk](mailto:rakicboban@yahoo.co.uk)

**ABSTRACT**

Sealed sources are used to measure geological characteristics (porosity, density, elemental composition), in wells for exploration of minerals, oil and gas. The aim of this paper is to analyze the health status of employees in oil exploitation, after periodic health check-ups. 75 workers, male, average age 40 years, average exposure time 8 years were examined. Thirteen were examined without a diagnosis, while 62 were diagnosed with 124 diagnoses and pathological conditions according to the International Classification of Diseases - X revision. Of the established diagnoses, the most common are diseases of the glands with internal secretion, nutrition and metabolism (29 %), followed by eye disorders (refractive anomalies). Elevated arterial pressure was observed in 3 workers without a previous diagnosis of hypertension, 3 *de novo* thyroid dysfunction and pulmonary dysfunction were registered, and in 11 elevated glycemia. The analysis shows a significant presence of risk factors for the development of cardiovascular diseases, which is in line with a large number of studies that study the effects of ionizing radiation on the cardiovascular system when exposed to small doses. However, a more serious conclusion requires well-planned epidemiological studies on a larger number of subjects, which will exclude the influences of confounding factors for the development of circulatory diseases.

## ZNAČAJ REDOVNIH PERIODIČNIH PREGLEDA I CITOGENETIČKIH ANALIZA U RADIOLOŠKOJ ZDRAVSTVENOJ ZAŠTITI

**Jelena PAJIC, Slađana VUKOVIĆ, Milenko ĐUKIĆ, Boban RAKIĆ,  
Zoran MIRKOV i Vedrana PROKIĆ**

*Institut za medicinu rada Srbije „Dr Dragomira Karajović“, Beograd, Srbija,  
[jelena.pajic@institutkarajovic.rs](mailto:jelena.pajic@institutkarajovic.rs), [sladjana.vukovic@institutkarajovic.rs](mailto:sladjana.vukovic@institutkarajovic.rs),  
[djukicmilenko@gmail.com](mailto:djukicmilenko@gmail.com), [rakicboban@yahoo.co.uk](mailto:rakicboban@yahoo.co.uk),  
[zoran.mirkov@institutkarajovic.rs](mailto:zoran.mirkov@institutkarajovic.rs), [vedrana.prokic@institutkarajovic.rs](mailto:vedrana.prokic@institutkarajovic.rs)*

### SADRŽAJ

*Najveći izvor profesionalne izloženosti u medicini su fluoroskopske procedure, uključujući interventne procedure, zbog čega se posebna pažnja poklanja praćenju zdravstvenog stanja ovih zaposlenih. U preventivnim pregledima akcenat se stavlja na ispitivanje radiosenzitivnih tkiva i organa (hematopoezni sistem, genetički materijal). Cilj rada je da ukaže na značaj redovnog obavljanja periodičnih pregleda zaposlenih u angiosali. Za studiju retrospektivne prirode analizirani su rezultati periodičnih pregleda zaposlenih u angiosali tercijarne zdravstvene ustanove, u periodu 2018-2020. godine. Na prvom pregledu uočen je kod jednog broja zaposlenih povećan broj mikronukleusa u binuklearnim limfocitima periferne krvi, kao indirektnih pokazatelja učestalosti nestabilnih hromozomskih aberacija i ekspozicije jonizujućim zračenjima. U navedenom periodu došlo je do smanjenja broja raspoloživih angiosala, što se odrazilo na organizacionom nivou. Nakon obavljenog prvog ciklusa pregleda, organizaciona situacija se poboljšala, te kasnije na periodičnim pregledima nisu uočeni poremećaji zdravstvenog stanja zaposlenih. Navedeni rezultati nameću potrebu kontinuiranog zdravstvenog nadzora, naročito zaposlenih koji obavljaju interventne radiološke procedure.*

### 1. Uvod

Savremena medicina ne može se zamisliti bez primene jonizujućih zračenja u dijagnostičke i terapijske svrhe. Zbog ubrzanog tehnološkog razvoja, primene visokodoznih rendgen tehnologija i sve većeg broja interventnih procedura, procenjen broj radnika izloženih jonizujućim zračenjima u zdravstvu u 2002. godini iznosi 7,4 miliona. Smatra se da je 0,1 % radnika u dijagnostičkoj radiologiji uključen u interventne procedure [1, 2]. Koronarna angiografija je najčešća interventna procedura koja se primenjuje kod osoba starijih od 45 godina, a radnici uključeni u interventne procedure primaju znatno veće efektivne doze, pri čemu doze za ekstremitete mogu doseći regulatorne granice doza [1, 3]. Zato se posebna pažnja poklanja redovnim preventivnim pregledima i praćenju zdravstvenog stanja lica zaposlenih u ovoj grani medicine. Periodicitet i elementi preventivnih (prethodnih i periodičnih) pregleda su zakonom definisani, a akcenat se stavlja na ispitivanje radiosenzitivnih tkiva i organa, kao što su hematopoezni sistem, genetički materijal (DNK-dezoksiribonukleinska kiselina) i očno sočivo [4, 5, 6, 7, 8].

### 2. Cilj rada

Cilj rada je da ukaže na značaj redovnog obavljanja periodičnih pregleda i citogenetičkih analiza u radiološkoj zdravstvenoj zaštiti zaposlenih u angiosali.

### 3. Materijal i metode

Za studiju retrospektivne prirode analizirani su rezultati dobijeni iz kartona periodičnih medicinskih pregleda zaposlenih u angiosali zdravstvene ustanove tercijarnog nivoa zdravstvene zaštite, u periodu 2018-2020. godine u skladu sa etičkim načelima Helsinške deklaracije i načelima Etičkog komiteta Instituta za medicinu rada Srbije „Dr Dragomir Karajović“. Pregledano je ukupno 58 radnika u skladu sa elementima pregleda koji su definisani Pravilnikom o prethodnim i periodičnim lekarskim pregledima zaposlenih na radnim mstima sa povećanim rizikom [9] i Pravilnikom o uslovima za dobijanje licence za obavljanje radijacione delatnosti [10]. Analizom je obuhvaćeno 35 radnika čije su radne aktivnosti vezane za angiosalu. Oni su podeljeni u tri grupe. Prvu grupu čine medicinski tehničari instrumentari (N=17), drugu grupu čine interventni kardiolozi i lekari na specijalizaciji iz interne medicine (N=15) i treću grupu čini rukovodeći kadar angiosale (N=3). Statistička analiza je sprovedena upotrebom softverskog paketa SPSS, verzija 17 (SPSS for Windows software package, version 17.0; SPSS Inc, Chicago, Illinois, USA).

### 4. Rezultati i diskusija

Od 35 pregledanih, 18 su bile osobe ženskog pola, a 17 muškog pola, bez razlike u prosečnim godinama života i izloženosti jonizujućim zračenjima. Iz literature je poznato da na bazalnu frekvencu mikronukleusa mogu uticati pol i starost, zbog čega je ispitana distribucija ispitanika u odnosu na ove parametre. Najveći broj pregledanih pripada životnoj dobi 36 - 45 godina (40 %), a slede oni u dobnoj grupi od 46 - 55 godina (22,85 %), do 35 godina (20 %) i 56 i više godina (17,14 %). Prosečna dužina radnog staža iznosi 20 godina (u intervalu 3-36 godina), a u zoni jonizujućih zračenja pregledani radnici rade u proseku 12 godina (u intervalu 1-33 godine). Karakteristike ispitanika prikazane su u tabelama 1 i 2.

**Tabela 1. Osnovne karakteristike ispitanika.**

	N	Minimum	Maximum	Prosečna vrednost	SD
Godine života	35	30	60	44,74	8,87
Ukupni radni staž (godine)	35	3	36	20,29	9,63
Ekspozicioni radni staž (godine)	35	1	33	11,63	9,51

**Tabela 2. Distribucija ispitanika u odnosu na starosnu strukturu.**

Godine	N	%
do 35	7	20
36-45	14	40
46-55	8	22,85
56 i više	6	17,14



## Биолошки ефекти јонизујућих зрачења

Nakon obavljenog prvog pregleda, uočen je povećan broj mikronukleusa kod 7 naših ispitanika, dok je kod 11 ispitanika broj bio veći u odnosu na opštu populaciju na teritoriji Srbije. Ovi rezultati prikazani su u tabeli 3.

**Tabela 3. Rezultati mikronukleus testa na prvom pregledu.**

Broj mikronukleusa na 1000 analiziranih binukleranih limfocita periferne krvi	N	%
0-16	17	48,57
17-25	11	31,42
Više od 25	7	20
Ukupno	35	100

Nakon obavljenih periodičnih pregleda zbog uočenog poremećaja zdravstvenog stanja privremenu zabranu za rad u zoni jonizujućih zračenja imalo je 3 ispitanika, dok je za 6 ispitanika zahtevan kontrolni pregled bez zabrane rada (tabela 4).

**Tabela 4. Ocena radne sposobnosti.**

Ocena radne sposobnosti	N	%
Sposoban za rad u zoni jonizujućih zračenja	26	74,28
Sposoban za rad u zoni jonizujućih zračenja uz kontrolu	6	17,14
Nije sposoban za rad u zoni jonizujućih zračenja	3	8,57
Ukupno	35	100

Od lica odgovornog za zaštitu od jonizujućih zračenja tercijarne zdravstvene ustanove dobili smo informaciju da zaposleni rade u manjem broju angiosala od predviđenih (u 3 od postojeće 4 sale), što je dovelo do dužeg rada i pojačane ekspozicije zaposlenih. Nakon obavljenih pregleda, aktivirana je četvrta angiosala. Na sledećim periodičnim pregledima koji su obavljani tokom 2019. i 2020. godine nisu uočeni ovi poremećaji zdravstvenog stanja zaposlenih što je prikazano u tabeli 5. Većina zaposlenih imala je broj mikronukleusa na nivou opšte populacije. Nakon periodičnih pregleda svi ispitanici su proglašeni sposobnim za rad u zoni jonizujućih zračenja.

**Tabela 5. Rezultati mikronukleus testa na drugom pregledu.**

Broj mikronukleusa na 1000 analiziranih binukleranih limfocita periferne krvi	N	%
0-16	34	97,14
17-25	1	2,85
Vise od 25	/	0
Ukupno	35	100

Kod 27 ispitanika zabeležen je pad broja mikronukleusa u odnosu na prvi periodični pregled, a kod većine smanjenje broja je bilo na nivou statističke značajnosti. Ispitanici kod kojih nije uočeno smanjenje broja pripadali su rukovodećem osoblju, ili su bili sa kratkim ekspozicionim radnim stažom. Ovi rezultati prikazani su u tabeli 6.

Važno je znati da čak i veoma male doze zračenja mogu izazvati radiobiološke efekte u tkivima, a izloženost procedurama koje koriste jonizujuća zračenja tokom dužeg vremena može izazvati ozbiljne posledice po zdravlje zaposlenih, koje se mogu objasniti bystander efektom i individualnom radisenzibilnošću [11, 12]. Nesumnjivo je dokazano da je DNK biološki makromolekul najosetljiviji na delovanje jonizujućih zračenja. Jonizujuća zračenja su potentni genotoksični agensi, jaki klastogeni, sposobni da indukuju širok spektar oštećenja molekula DNK. Poznato je u radijacionoj citogenetici da je učestalost mikronukleusa indirektni pokazatelj učestalosti nestabilnih hromozomskih aberacija i ekspozicije jonizujućim zračenjima [4, 7, 8, 12].

**Tabela 6. Uporedne vrednosti mikronukleusa na sprovedenim pregledima.**

	Srednja vrednost	N	SD
<b>Broj mikronukleusa 1</b>	19,46	35	13,019
<b>Broj mikronukleusa 2</b>	9,86	35	3,874

### 5. Zaključak

Zaposleni u interventnoj kardiologiji i drugim granama medicine sprovode postupke koji koriste fluoroskopiju i tokom radnog veka mogu da prime značajne doze x-zraka. Zdravstveni rizik povezan sa profesionalnom ekspozicijom jonizujućim zračenjima uključuje promene u genomu. Praćenje ovih radiobioloških efekata, poput broja mikronukleusa u binuklearnim limfocitima, pruža dodatne informacije koje upotpunjuju fizičku dozimetriju. Biodozimetrija, kao metod procene apsorbovane doze zračenja, posebno je značajna jer, za razliku od fizičke dozimetrije, u obzir uzima i interindividualnu varijabilnost u odgovoru na zračenje [13]. To nameće potrebu za kontinuiranim zdravstvenim nadzorom svih profesionalno izloženih grupa jonizujućim zračenjima, posebno zaposlenih koje obavljaju interventne radiološke procedure, što je pokazano i u našem radu.

### 6. Literatura

- [1] Sources And Effects Of Ionizing Radiation. UNSCAER 2008 Report, United Nations, New York, 2010.
- [2] K.P. Kim, D.L. Miller, S. Balter, et al. Occupational radiation doses to operators performing cardiac catheterization procedures. *Health Phys.* 94, 2008, 211-227.
- [3] M. Delichas, K. Psarrakos, E. Molyvda-Athanassopoulou et al. Radiation exposure to cardiologists performing interventional cardiology procedures. *Eur. J. Radiol.* 48, 2003, 268-273.
- [4] E.J. Hall, A.J. Giaccia. Radiobiology for the Radiologist. Lippincot Williams and Wilkins. New York, 2012.
- [5] D. Panov, P. Čremošnik-Pajić. Zdravstveni nadzor lica koja rade u zoni jonizujućih zračenja. Seminar Jugoslovesnkog društva za zaštitu od zračenja, Cavtat 1988, 88-93.
- [6] S. Milačić. Bolesti izazvane jonizujućim zračenjima. U: Vidaković A, ur. Medicina rada II. Beograd: Udruženje za medicinu rada Jugoslavije, 1997, 621-643.
- [7] Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103, 2007.

- [8] BEIR VII. Report of the Advisory Committee on the Biological Effects of Ionising Radiations. National Academy of Sciences, National Research Council, Washington DC, USA, 2006.
- [9] Pravilnik o prethodnim i periodičnim lekarskim pregledima zaposlenih na radnim mestima sa povećanim rizikom, Službeni glasnik Republike Srbije br. 53, 2017.
- [10] Pravilnik o uslovima za dobijanje licence za obavljanje radijacione delatnosti, Beograd: Službeni glasnik Republike Srbije br.50, 2018.
- [11] Occupational Exposure to Ionizing Radiation in Interventional Fluoroscopy: Severity of Adverse Effects of a Growing Health Problem. ORSIF, Washington: 2015.
- [12] J. Pajić, B. Rakić, D. Jovičić. Interindividualna varijabilnost u evaluaciji genotoksičnih efekata jonizujućih zračenja. Društvo za zaštitu od jonizujućih zračenja Srbije i Crne Gore, Zbornik, Vrnjačka banja 2013, 304-308.

**SIGNIFICANCE OF PERIODIC HEALTH CHECK-UPS AND CYTOGENETIC ANALYZES IN RADIATION PROTECTION HEALTHCARE**

**Jelena PAJIĆ, Slađana VUKOVIĆ, Milenko ĐUKIĆ, Boban RAKIĆ,  
Zoran MIRKOV and Vedrana PROKIĆ**

*Serbian Institute of Occupational Health „Dr Dragomira Karajović“, Belgrade, Serbia,  
[jelena.pajic@institutkarajovic.rs](mailto:jelena.pajic@institutkarajovic.rs), [sladjana.vukovic@institutkarajovic.rs](mailto:sladjana.vukovic@institutkarajovic.rs),  
[djukicmilenko@gmail.com](mailto:djukicmilenko@gmail.com), [rakicboban@yahoo.co.uk](mailto:rakicboban@yahoo.co.uk),  
[zoran.mirkov@institutkarajovic.rs](mailto:zoran.mirkov@institutkarajovic.rs), [vedrana.prokic@institutkarajovic.rs](mailto:vedrana.prokic@institutkarajovic.rs)*

**ABSTRACT**

The most of workers exposed to ionizing radiation are workers employed in health care (75 %), and the greatest source of occupational exposure in medicine are fluoroscopic procedures, including interventional procedures. Therefore, special attention is paid to preventive healthcare of persons employed in this branch of medicine. The periodicity and elements of preventive (previous and periodic) examinations are defined by law, with the emphasis on the examination of radiosensitive tissues and organs, such as the hematopoietic system, genetic material (deoxyribonucleic acid) and the lens of the eye. The aim of this paper is to point out the importance of regular periodic examinations of employees performing interventional procedures. For retrospective study results were obtained from the employees' health records from 2018-2020. In 2018, an increased number of micronuclei in peripheral blood binuclear lymphocytes was observed in several employees. It is well known in radiation cytogenetics that the frequency of micronuclei is an indirect indicator of the frequency of unstable chromosomal aberrations and exposure to ionizing radiation. From the radiation protection officer, we received information that employees work in a reduced number of operation rooms than planned (in 3 of the existing 4), which was reflected at the organizational level. After the first cycle of examinations, the fourth operation room was activated. Health checkups performed later (during 2019 and 2020) did not reveal any disturbances in the health condition of employees. These results indicate the need for continuous health surveillance of all occupational groups exposed to ionizing radiation, especially employees who perform interventional radiological procedures.

**РАДИОАКТИВНИ ОТПАД И  
ДЕКОНТАМИНАЦИЈА**

## UTICAJ ORGANSKIH KOMPLEKSANATA NA SEPARACIJU JONA SR IZ VODENIH RASTVORA ODABRANIM ZEOLITIMA

Ivana SMIČIKLAS<sup>1</sup>, Maria-Alexandra STAMATOVIĆ<sup>2</sup>, Mihajlo JOVIĆ<sup>1</sup>, Ivana COHA<sup>3</sup>, Ana MRAKOVIĆ<sup>1</sup> i Marija ŠLJIVIĆ-IVANOVIĆ<sup>1</sup>

1) Univerzitet u Beogradu, Institut za nuklearne nauke „Vinča” - Institut od nacionalnog značaja za Republiku Srbiju, Beograd, Srbija, [ivanat@vin.bg.ac.rs](mailto:ivanat@vin.bg.ac.rs), [mjovic@vin.bg.ac.rs](mailto:mjovic@vin.bg.ac.rs), [amrakovic@vin.bg.ac.rs](mailto:amrakovic@vin.bg.ac.rs), [marijasljivic@vin.bg.ac.rs](mailto:marijasljivic@vin.bg.ac.rs)

2) Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd, Srbija, [aleksandra.ali97@gmail.com](mailto:aleksandra.ali97@gmail.com)

3) Institut „Ruđer Bošković”, Zagreb, Hrvatska, [ivana.coha@irb.hr](mailto:ivana.coha@irb.hr)

### SADRŽAJ

*Kao sredstva za hemijsku dekontaminaciju često se koriste organske supstance koje grade rastvorne komplekse sa jonima radionuklida poboljšavajući njihovo uklanjanje sa kontaminiranih površina, ali u isto vreme otežavajući tretman nastalog tečnog radioaktivnog otpada i povećavajući mobilnost radionuklida u životnoj sredini. U ovom radu izučavan je uticaj etilendiamintetrasirćetne kiseline (EDTA) i dietilentriaminpentasirćetne kiseline (DTPA) na uklanjanje radionuklida Sr iz simuliranog tečnog radioaktivnog otpada primenom sintetičkog (zeolit 4A) i prirodnog zeolita (klinoptilolit). Efikasnost uklanjanja jona Sr ispitivana je u šaržnim uslovima, u funkciji vrste i koncentracije kompleksanata, i tipa zeolita, korišćenjem neaktivnog stroncijuma kao hemijskog analoga <sup>90</sup>Sr. Rezultati dobijeni pri različitim molskim odnosima Sr/kompleksant (1:0, 10:1, 1:1 i 1:10) pokazuju da rastuća koncentracija DTPA u rastvoru inhibira separaciju Sr jona značajnije nego EDTA na oba zeolita, kao i da se Sr u prisustvu oba kompleksanta efikasnije vezuje sintetičkim nego prirodnim zeolitom.*

### 1. Uvod

Radiološka dekontaminacija predstavlja skup aktivnosti/procesa koji se sprovode u cilju uklanjanja radionuklida sa površina ili lokacija kontaminiranih tokom redovnog rada nuklearnih postrojenja i drugih korisnika izvora zračenja (industrija, medicina, istraživački centri, itd.), kao i nakon akcidenata ili pri dekomisiji. Postupci dekontaminacije se zasnivaju na principima efikasnosti, sigurnosti i proizvodnje što manje količine sekundarnog otpada [1]. Sav otpad nastao tokom dekontaminacije mora se tretirati, a zatim pravilno upakovati za skladištenje, transport i odlaganje.

Poređenjem tri glavne kategorije postupaka dekontaminacije, hemijske, mehaničke i elektrohemijske, glavni nedostatak hemijskih postupaka je generisanje većih količina sekundarnog otpada. Hemijska dekontaminacija, u zavisnosti od svojstava površine ili lokacije koja se tretira (metal, beton, sintetički materijali, obojene površine, drvo, zemljište, i dr.) uključuje primenu jakih mineralnih kiselina (azotna, sumporna, fosforna kiselina), rastvora soli (npr. natrijum-fosfat, natrijum-sulfat), organskih kiselina (mravlja, oksalna, limunska kiselina), baza (kalijum hidroksid, natrijum hidroksid), kompleksirajućih agenasa (pikolinska kiselina, etilendiamin tetra-sirćetna kiselina (EDTA)), deterdženata, surfakanata i organskih rastvarača (kerozin, tetrahloretan) [2].

EDTA i njeni homolozi (nitrilosirćetna kiselina (NTA), dietilentriamin-pentasilirćetna kiselina (DPTA), hidroksietilendiamintri sirćetne kiseline (HEDTA)) grade komplekse na di- i trovalentnim jonima metala, povećavajući njihovu rastvorljivost i efikasnost

uklanjanja sa površina, iz naslaga ili korozivnih filmova [3]. Sa druge strane, prisustvo kompleksnih jedinjenja u nastalom tečnom otpadu otežava njegov dalji tretman u cilju smanjenja zapremine i prevođenja u oblik pogodan za skladištenje i odlaganje.

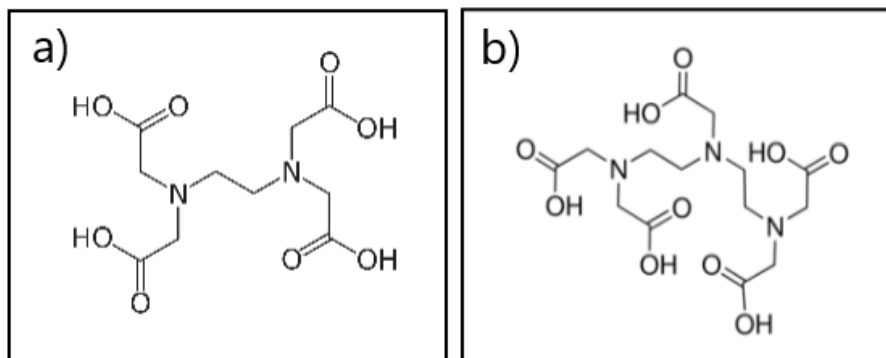
Zeoliti, prirodni i sintetički, imaju veliku primenu u tretmanu tečnog radioaktivnog otpada, zbog niske cene, velikog kapaciteta razmene jona, selektivnosti, kao i stabilnosti strukture pri povišenim temperaturama i u polju zračenja, te mogućnosti solidifikacije nakon upotrebe [4]. Glavni mehanizam za uklanjanje radionuklida je zamena katjona u strukturi zeolita sa katjonima radionuklida prisutnih u vodenom rastvoru.

Glavni ciljevi ovog rada bili su ispitivanje uticaja kompleksirajućih agenasa (EDTA i DTPA) na sorpciju jona Sr iz vodenih rastvora prirodnim i sintetičkim zeolitom i poređenje efikasnosti sorpcije u zavisnosti od molskog odnosa Sr/kompleksant, vrste kompleksanta i vrste zeolita.

### 2. Eksperimentalni deo

U radu su kao sorbenti korišćeni prirodni zeolit iz depozita Zalau (Rumunija) označen kao ZZ i sintetički zeolit 4A, proizvod fabrike „Alumina” iz Zvornika (Bosna i Hercegovina), označen kao Z4A. Morfologija čestica zeolita posmatrana je skenirajućim elektronskim mikroskopom (FE-SEM, model JSM-7000F), pri uvećanju od 2000 puta.

Rastvaranjem kompleksanata EDTA ( $[\text{CH}_2\text{N}(\text{CH}_2\text{CO}_2\text{H})_2]_2$ ) i DTPA ( $[(\text{HOOCCH}_2)_2\text{NCH}_2\text{CH}_2]_2\text{NCH}_2\text{COOH}$ ) (slika 1) i neaktivne soli Sr ( $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$ ), pripremljeno je više rastvora koji su simulirali tečni otpad iz postupka hemijske dekontaminacije. Koncentracija jona Sr je bila konstantna ( $10^{-4}$  mol/L), dok su koncentracije kompleksanata varirale ( $10^{-5}$  mol/L,  $10^{-4}$  mol/L i  $10^{-3}$  mol/L), tako da je varirao i molski odnos Sr/kompleksant (1:0, 10:1, 1:1 i 1:10).



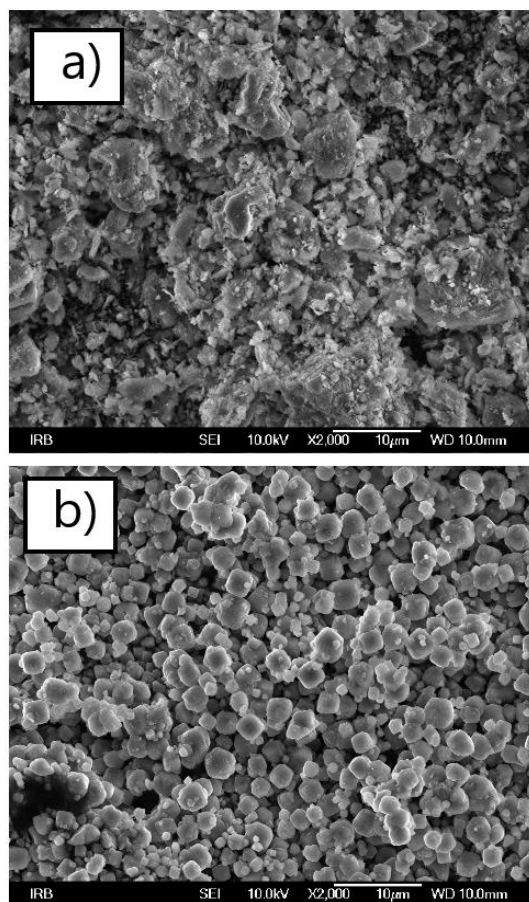
Slika 1. Struktura kompleksanata EDTA (a) i DTPA (b).

Sorpcija jona Sr je ispitivana šaržnom metodom, uravnotežavanjem odmerene mase zeolita (0,100 g) i zapremine rastvora (20 mL), na laboratorijskom šejkeru tokom 2 h. Nakon razdvajanja čvrste i tečne faze centrifugiranjem i ceđenjem kroz membranske mikrofiltere (0,45  $\mu\text{m}$ ), izmerene su pH vrednosti rastvora. Tačne koncentracije jona Sr, pre i nakon kontakta pripremljenih rastvora sa odabranim zeolitima, određene su metodom optičke emisije spektrometrije sa induktivno kuplovanom plazmom (ICP-OES), na instrumentu Perkin Elmer Avio 200. Za kalibraciju instrumenta, standardni rastvori Sr su pripremani u odgovarajućem matriksu (dejonizovana voda ili rastvori kompleksanata različitih koncentracija).

### 3. Rezultati i diskusija

Prirodni ZZ predstavlja heterogenu smešu minerala sa visokim sadržajem klinoptololita (> 65 %) i primesama albita, hidromuskovita, kvarca i kalcita [5], dok je sintetički Z4A visoko-kristalni zeolit tipa 4A (prečnik pora od 4 Å) hemijskog sastava 36 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 22 %  $\text{Na}_2\text{O}$ , 42 %  $\text{SiO}_2$  [6].

Pored razlika u hemijskom i mineraloškom sastavu, očigledna je i razlika u morfologiji čestica ispitivanih zeolita (slika 2). Uzorak ZZ je sastavljen od čestica i agregata nepravilnog oblika i heterogen je u pogledu njihove veličine. Sa druge strane, čestice sintetičkog Z4A su karakterističnog oblike kocke, veličine < 4  $\mu\text{m}$ .

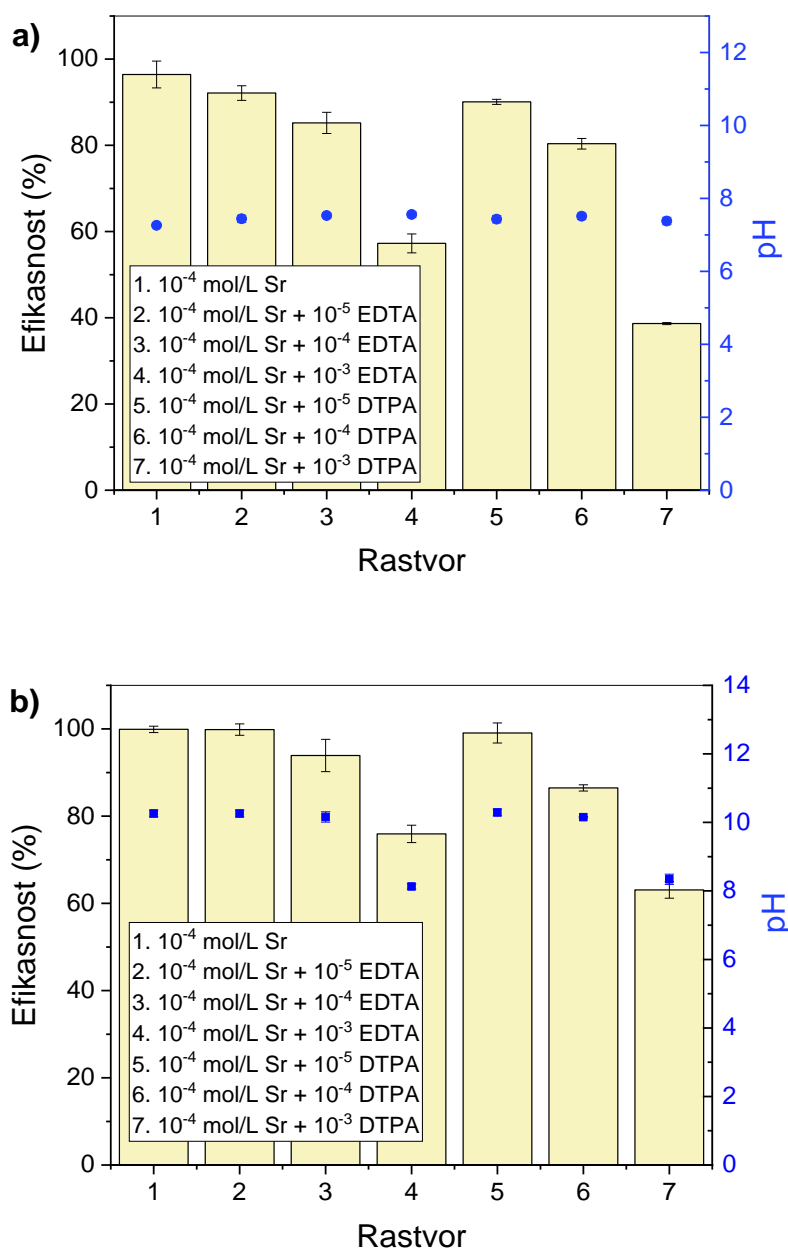


**Slika 2. SEM fotografije prirodnog zeolita ZZ (a) i sintetičkog zeolita Z4A (b).**

Na slici 3 je prikazana efikasnost uklanjanja jona Sr iz simuliranog tečnog radioaktivnog otpada primenom prirodnog i sintetičkog zeolita. Iz rastvora slobodnih jona Sr polazne koncentracije  $10^{-4}$  mol/L, uklonjeno je 96,4 % Sr prirodnim, odnosno 100 % sintetičkim zeolitom. Prethodna istraživanja su pokazala da Z4A ima veći sorpcioni kapacitet prema jonima Sr u odnosu na druge tipove zeolita, i veću selektivnost prema Sr u prisustvu visokih koncentracija drugih katjona u rastvoru [6].

Prisustvo kompleksirajućih agenasa i njihova rastuća koncentracija u rastvoru prouzrokovali su smanjenje efikasnosti uklanjanja jona Sr, a efekat je u apsolutnom iznosu zavisio kako od vrste kompleksanta, tako i od vrste zeolita (slika 3).





**Slika 3. Efikasnost separacije jona Sr iz simuliranog tečnog radioaktivnog otpada različitog sastava i pH vrednosti nakon primene prirodnog (a) i sintetičkog zeolita Z4A (b).**

Sa porastom koncentracije EDTA od  $10^{-5}$  mol/L do  $10^{-3}$  mol/L, separacija jona Sr opala je sa 92,1 % na 57,2 % primenom ZZ, odnosno sa 99,8 % na 75,9 % primenom Z4A.

Efekat DTPA na sorpciju jona Sr je bio veći u odnosu na EDTA. Sa porastom koncentracije DTPA od  $10^{-5}$  mol/L do  $10^{-3}$  mol/L, efikasnost je smanjena sa 90,1 % na 38,6 % primenom ZZ i sa 99,1 % na 63,1 % primenom Z4A.

Formiranje organometalnih kompleksa značajno menja karakteristike sorbata, uključujući naelektrisanje, veličinu i stereohemijsku konfiguraciju, te utiče na efikasnost i mehanizam sorpcije. Takođe, slobodni kompleksanti, prisutni u višku, mogu biti

sorbovani i time doprineti smanjenju reaktivne površine sorbenta [7]. Prema dostupnoj literaturi, uticaj organske materije (natrijum-oleata, limunske i oksalne kiseline, u koncentracijama do 100 mg/L), na sorpciju jona Sr (polazne koncentracije 1 mg/L) sintetičkim zeolitom 4A je bio zanemarljiv ili veoma mali [8]. Sa druge strane, prisustvo EDTA u rastvoru uticalo je na smanjenje efikasnosti sorpcije Sr aktivnim ugljem, a pri koncentracijama EDTA  $>10^{-3}$  mol/L, sorpcija Sr je bila potpuno onemogućena [9]. pH vrednosti rastvora su bile u opsegu 7,2-7,6 nakon kontakta sa ZZ, odnosno 8,1-10,3 nakon primene zeolita Z4A (slika 3). Usled alkalnih uslova sinteze, Z4A pokazuje baznu reakciju sa vodom [6]. Studije sorpcije radionuklida različitim materijalima u prisustvu kompleksanata generalno su pokazale smanjenje sorpcije pri višim pH vrednostima [10]. U ovakvim uslovima raste broj negativno naelektrisanih (deprotonovanih) funkcionalnih grupa na površini sorbenta, što otežava sorpciju negativno naelektrisanih kompleksnih jona metala.

#### 4. Zaključak

Pri ispitivanim uslovima eksperimenta, sintetički Z4A efikasnije vezuje Sr u prisustvu kompleksanta u poređenju sa prirodnim ZZ. Rastuća koncentracija DTPA u rastvoru inhibira sorpciju Sr jona na oba zeolita značajnije nego EDTA. Uticaj formiranja organo-metalnih kompleksa na efikasnost sorpcije jona radionuklida je teško generalizovati, s obzirom da on može biti bez značaja, pozitivan ili negativan, u zavisnosti od odnosa metal/kompleksant, kompeticije sa drugim jonima, pH rastvora i sorpcije slobodnog kompleksanta. Preliminarni rezultati ukazuju na potrebu daljeg istraživanja ovih složenih sistema pri različitim uslovima i utvrđivanje mehanizama sorpcije Sr zeolitima u prisustvu organskih kompleksanata, kao važnog faktora mobilnosti vezanog Sr.

#### 5. Zahvalnica

Rad je podržan od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

#### 6. Literatura

- [1] New methods and techniques for decontamination in maintenance or decommissioning operations, No. 1022, IAEA, Vienna, 1998.
- [2] M. I. Ojovan, W. E. Lee, *An Introduction to Nuclear Waste Immobilisation*, Second Edition, Elsevier, 2014.
- [3] J. L. Nelson, *Decontamination processes for restorative operations and as a precursor to decommissioning: A literature review*, University of Michigan Library, 1981.
- [4] A. E. Osmanlioglu. Decontamination and solidification of liquid radioactive waste using natural zeolite. *J. Mater. Cycles Waste Manag.* 17, 2015, 690–694.
- [5] S. Neagoe, O. Pântea, E. Trâmbinașu, D. Popovici, D. Bomboș, F. Bacalum, D. Matei, C. Neagoe, T. Jugănar, M. Hotinceanu. Conditioning of zeolite stone from Zalau. Physical-chemical study. *Analele Universitatii Bucuresti: Chimie.* 1-2, 2004, 255-262.
- [6] I. Smičiklas, I. Cocha, M. Jović, M. Nodilo, M. Šljivić-Ivanović, S. Smiljanić, Ž. Grahek. Efficient separation of strontium radionuclides from high-salinity wastewater by zeolite 4A synthesized from Bayer process liquids. *Sci. Rep.* 11, 2021, 1738.

- [7] X. You, S. Liu, C. Dai, G. Zhong, Y. Duan, Y. Guo, A. N. Makhinov, J. T. A. Júnior, Y. Tu, K. H. Leong. Effects of EDTA on adsorption of Cd(II) and Pb(II) by soil minerals in low-permeability layers: batch experiments and microscopic characterization. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 27, 2020, 41623- 41638.
- [8] X.-H. Fang, F. Fang, C.-H. Lu, L. Zheng. Removal of Cs<sup>+</sup>, Sr<sup>2+</sup>, and Co<sup>2+</sup> ions from the mixture of organics and suspended solids aqueous solutions by zeolites. *Nucl. Eng. Technol.* 49, 2017, 556-561.
- [9] N. S. Awwad, A. A. M. Daifuallah, M. M. S. Ali. Removal of Pb<sup>2+</sup>, Cd<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup>, and Sr<sup>2+</sup> from aqueous solution by selected activated carbons derived from date pits. *Solvent Extr. Ion Exch.* 26, 2008, 764-782.
- [10] Effects of complexing compounds on sorption of metal ions to cement, No. R-05-72, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co, Stockholm, 2005.

**INFLUENCE OF ORGANIC COMPLEXANTS ON SR ION SEPARATION  
FROM AQUEOUS SOLUTIONS BY SELECTED ZEOLITES**

**Ivana SMIČIKLAS<sup>1</sup>, Maria-Alexandra STAMATOVIĆ<sup>2</sup>, Mihajlo JOVIĆ<sup>1</sup>,  
Ana MRAKOVIĆ<sup>1</sup>, Ivana COHA<sup>3</sup> and Marija ŠLJIVIĆ-IVANOVIĆ<sup>1</sup>**

1) *University of Belgrade, Vinča Institute of Nuclear Sciences - National Institute of the  
Republic of Serbia, University of Belgrade, Belgrade, Serbia, [ivanat@vin.bg.ac.rs](mailto:ivanat@vin.bg.ac.rs),  
[mjovic@vin.bg.ac.rs](mailto:mjovic@vin.bg.ac.rs), [amrakovic@vin.bg.ac.rs](mailto:amrakovic@vin.bg.ac.rs), [marijasljivic@vin.bg.ac.rs](mailto:marijasljivic@vin.bg.ac.rs)*

2) *University of Belgrade, Faculty of Technology and Metallurgy, Belgrade, Serbia,  
[aleksandra.ali97@gmail.com](mailto:aleksandra.ali97@gmail.com)*

3) *Ruđer Bošković Institute, Zagreb, Croatia, [ivana.coha@irb.hr](mailto:ivana.coha@irb.hr)*

**ABSTRACT**

Organic substances that form soluble complexes with radionuclide ions are often used as chemical decontamination agents, improving their removal from contaminated surfaces, but at the same time complicating the treatment of liquid radioactive waste and increasing the mobility of radionuclides in the environment. In this paper, the influence of ethylenediaminetetraacetic acid (EDTA) and diethylenetriaminepentacetic acid (DTPA) on the removal of Sr radionuclides from simulated liquid radioactive waste using synthetic (zeolite 4A) and natural zeolite (clinoptilolite) was studied. The efficiency of Sr ion removal was investigated in batch conditions, as a function of the type and concentration of complexants, and the type of zeolite, using inactive strontium as a chemical analogue of <sup>90</sup>Sr. The results obtained at different molar ratios Sr/complexant (1:0, 10:1, 1:1 and 1:10) show that the increasing concentration of DTPA in the solution inhibits the sorption of Sr ions more significantly than EDTA on both zeolites, and that Sr is sorbed more efficiently in the presence of both complexants using synthetic than natural zeolite.

## DEKONTAMINACIJA CEVNOG MATERIJALA TEHNOLOŠKI OBOGAĆENOG PRIMORDIJALNIM RADIONUKLIDIMA

Mihajlo JOVIĆ, Ivana SMIČIKLAS, Nenad ŠIPKA,  
Živojin STOJANOVIĆ i Predrag BOŽOVIĆ

*Institut od nacionalnog značaja za Republiku Srbiju, Institut za nuklearne nauke  
„Vinča“, Univerzitet u Beogradu, Laboratorija za zaštitu od zračenja i zaštitu životne  
sredine, Beograd, Srbija, [mjovic@vin.bg.ac.rs](mailto:mjovic@vin.bg.ac.rs), [ivanat@vin.bg.ac.rs](mailto:ivanat@vin.bg.ac.rs),  
[bozovic@vin.bg.ac.rs](mailto:bozovic@vin.bg.ac.rs)*

### SADRŽAJ

Naftna industrija je jedan od najvećih proizvođača TENORM materijala u Srbiji, kao i u svetu. Usled značajnih promena temperature i pritiska, transport nafte i gasa iz geoloških rezervoara izaziva taloženje primordijalnih radionuklida i drugih materija unutar transportnih cevi do nivoa povećane radioaktivnosti, koja zahteva sprovođenje mera bezbednosti i zaštite od zračenja. Najveća aktivnost u depozitu-kamencu i mulju potiče od  $^{226}\text{Ra}$ , sa vremenom poluraspada od 1600 godina. U ovom radu razmatrane su prednosti i nedostaci postojećih hemijskih i fizičko/mehaničkih metoda dekontaminacije, u svetlu iskustava iz prakse. Unapređenje tehnologija za dekontaminaciju cevni materijala sa povišenom radioaktivnošću i dalje predstavlja izazov, a glavni cilj je razvoj efikasnih, ekonomičnih i ekološki prihvatljivih rešenja, bez ili sa generisanjem što manje količine sekundarnog otpada. U tom smislu, razvoj i optimizacija metoda baziranih na primeni peleta suvog leda u kombinaciji sa komprimovanim vazduhom, zaslužuju posebnu pažnju.

### 1. Uvod

Primordijalni radionuklidi, prirodno prisutni u Zemljinoj kori, su generalno dugoživeći, sa vremenom poluraspada od nekoliko stotina miliona godina, dok produkti njihovog radioaktivnog raspada imaju znatno kraće vreme poluraspada [1]. Iako je njihova koncentracija obično zanemarljiva, tehnološkim postupcima prerade i korišćenjem materijala koji sadrže prirodne radionuklide (*NORM - Naturally-Occurring Radioactive Materials*) dobijaju se materijali povećane prirodne radioaktivnosti (*TENORM - Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Material*).

*TENORM* materijali uglavnom predstavljaju otpadne produkte i rezultat su industrijskih aktivnosti vezanih za: obradu minerala, eksploataciju i hemijsku preradu ruda, proizvodnju fosfata, proizvodnju i upotrebu đubriva, korišćenje fosilnih goriva za proizvodnju električne energije, eksploataciju i proizvodnju nafte i gasa. U svetu, pa tako i u Srbiji, jedan od najvećih generatora *TENORM* materijala je naftna industrija. Transportom nafte i gasa iz geoloških rezervoara, usled značajnih promena temperature i pritiska, dolazi do taloženja primordijalnih radionuklida i drugih materija na unutrašnjosti transportnih cevi do nivoa povišene radioaktivnosti koja ugrožava životnu sredinu i zahteva sprovođenje mera radijacione sigurnosti i bezbednosti.

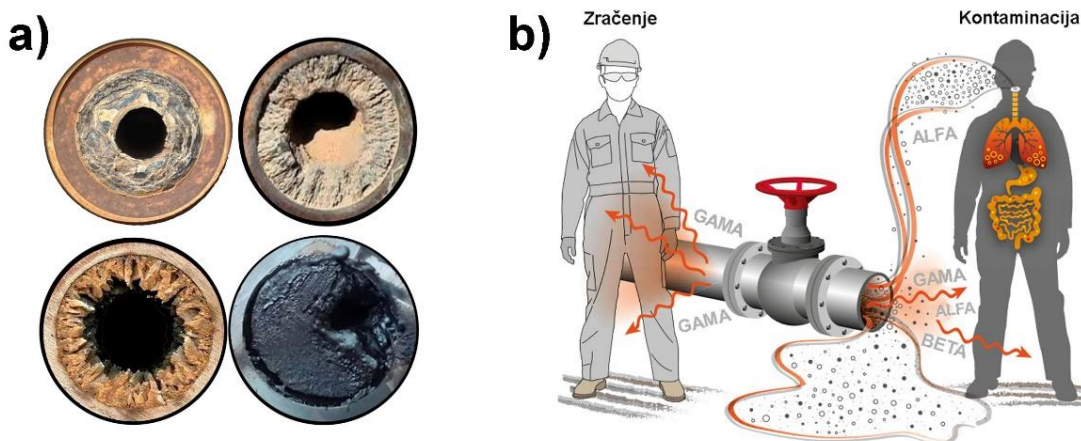
Analiza nafte i gasa iz različitih bušotina [2] pokazala je da dugoživeći izotopi uranijuma i torijuma nisu prisutni, odnosno da se ne mobilišu iz matičnih stena. Međutim, njihovi potomci kao što su radijum ( $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{224}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$ ) i olovo ( $^{210}\text{Pb}$ ) značajno su mobilniji i njihovo prisustvo je detektovano u procesnoj vodi nastaloj tokom eksploatacije nafte i gasa, tabela 1.

**Tabela 1. Koncentracije radionuklida (*NORM*) proizvedenih tokom eksploatacije nafte i gasa [2].**

Radionuklid	Prirodni gas Bq/m <sup>3</sup>	Procesna voda Bq/L	Kamenac Bq/kg	Mulj Bq/kg
<sup>238</sup> U		tragovi	1 - 500	5 - 10
<sup>226</sup> Ra		0,002 - 1 200	100 - 15 mil	50 - 800 000
<sup>210</sup> Po	0,002 - 0,08		20 - 1 500	4 - 160 000
<sup>210</sup> Pb	0,005 - 0,02	0,05-190	20 - 75 000	10 - 1,3 mil
<sup>222</sup> Rn	5 - 200 000			
<sup>232</sup> Th		tragovi	1 - 2	2 - 10
<sup>228</sup> Ra		0,3 - 180	50 - 2,8 mil	500 - 50 000
<sup>224</sup> Ra		0,05 - 40		

Pod određenim uslovima, *NORM* se može deponovati ili akumulirati unutar instalacija proizvodnog postrojenja u obliku naslaga/kamenca ili mulja, čineći nusproizvode i otpadne materijale procesa proizvodnje nafte ili gasa radioaktivnim. Iz tabele 1, uočava se da je *NORM* upravo i najviše prisutan u depozitu-kamencu i mulju, kao i da je glavni radionuklid u otpadu iz industrije nafte i gasa <sup>226</sup>Ra, sa vremenom poluraspada od 1600 godina. Formiranje naslaga kamenca je složena pojava, a promene u uslovima rada kao što su: varijacija temperature i pritiska, ubrizgavanje vode, promenljiv tok, širenje gasa usled promene prečnika cevovoda, varijacija pH i prisustvo kristalnih komadića na unutrašnjoj površini opreme, dovode do njegove značajnije akumulacije. Glavni tipovi depozita koji se sreću u naftnim i gasnim postrojenjima su sulfatne naslage poput barita (BaSO<sub>4</sub>). Depoziti su uobičajeno bezbojni ili mlečno beli, ali mogu imati i druge boje, u zavisnosti od nečistoća zarobljenih u kristalima tokom formiranja. Barit karakteriše velika gustina, ali i hemijska inertnost i izuzetno mala rastvorljivost. Zbog velike hemijske sličnosti radijuma (Ra) sa barijumom (Ba), stroncijumom (Sr) i kalcijumom (Ca), Ra se taloži zajedno sa ovim elementima stvarajući radijum sulfat, radijum karbonat, a u pojedinim slučajevima radijum silikat [3]. Radon (Rn) je neposredni proizvod raspadanja Ra i prvenstveno prati gasovode. On se kroz nekoliko brzih koraka raspada do <sup>210</sup>Pb koji se taloži u obliku tankog filma na procesnoj opremi za eksploataciju [4]. Koncentracije Ra u cevnom depozitu i otpadnom mulju zavise od više faktora: količine Ra koja je prisutna u matičnom tlu, primenjenog procesa proizvodnje nafte ili gasa i sastava vode. Svaka promena pritiska, temperature i/ili kiselosti, ali i mešanje morske vode bogate sulfatima sa procesnom vodom bogatom hloridima, povećava tendenciju taloženja, i upravo je jedan od glavnih razloga većih nivoa aktivnosti u izdvojenom mulju i u čvrstim naslagama, nego u procesnoj vodi [3]. Stvoreni depoziti, kamenac i mulj, u unutrašnjosti cevi prikazani su na slici 1a.

Prisutni radionuklidi predstavljaju problem za radnike tokom procesa eksploatacije, održavanja, transporta i prerade otpada, kao i gašenja, odnosno stavljanja postrojenja van upotrebe. Radnici su izloženi zračenju koje emituje *NORM*, a potencijalno i unutrašnjoj kontaminaciji, slika 1b. Rizici se drastično povećavaju ukoliko postoji mogućnost izloženosti ljudi sadržaju iz unutrašnjosti cevi. Na osnovu dostupnih podataka, nivoi izloženosti u naftnoj industriji kretali su se u rasponima od 10-300 μSv/h u Velikoj Britaniji, 50-100 μSv/h u Egiptu, i do 300 μSv/h u SAD. Izloženost je dovedena u vezu sa spoljašnjim zračenjem radionuklida <sup>226</sup>Ra i njegovih potomaka <sup>214</sup>Pb i <sup>214</sup>Bi, ali i inhalacijom α-emitera <sup>222</sup>Rn, kao i njegovih potomaka <sup>214</sup>Po i <sup>218</sup>Po [3].



**Slika 1. Nagomilavanje depozita-kamenca i mulja u unutrašnjosti cevi (a) i primer moguće izloženosti radnika (b).**

Do danas, nacionalni pristupi upravljanju *NORM* i *TENORM* materijalima još uvek nisu potpuno usklađeni, iako potreba za tim neprestano raste. Ujedno, tehnologije za dekontaminaciju materijala sa povišenom radioaktivnošću predstavljaju izazov i težnju da se razvije efikasna, ekonomična i ekološki što prihvatljivija tehnologija, bez, ili sa što je moguće manje sekundarnog otpada. U daljem tekstu opisani su neki od postojećih tehnoloških postupaka za dekontaminaciju cevnog materijala kontaminiranog primordijalnim radionuklidima.

## 2. Hemijska dekontaminacija

Hemijska dekontaminacija koristi koncentrovane i/ili razblažene hemijske reagense koji, u dodiru sa kontaminiranim materijalom, vrše rastvaranje sloja kontaminacije koji pokriva osnovni materijal ili deo osnovnog materijala. U većini slučajeva, potrebni nivo dekontaminacije može se postići ponavljanjem procesa/postupka. Blagi procesi hemijske dekontaminacije rastvaraju sloj kontaminacije, ali se proces vodi tako da ne dolazi do oštećenja osnovnog materijala, u većini slučajeva metala, i uopšteno se ovaj vid koristi i preporučuje u pogonima kod redovnog održavanja i remonta. Agresivna hemijska tehnika, pored prisutnog sloja kontaminacije, razara i površinu materijala koji se dekontaminira, pa se ovaj vid dekontaminacije koristi kod dekomisije postrojenja i opreme koja se stavlja van upotrebe.

Glavni oblik Ra u cevnom depozitu je talog  $[^{226}\text{Ra}]\text{BaSO}_4$ , nerastvoran u vodi, vodenim rastvorima mineralnih kiselina, alkalnim i organskim rastvaračima, rastvorljiv u koncentrovanoj sumpornoj i perhlornoj kiselini [5]. Upotreba koncentrovane sumporne kiseline u praksi nije dala zadovoljavajuće rezultate, odnosno dovela je do delimičnog rastvaranja sloja kontaminacije uz značajno nagrizenje i koroziju osnovnog materijala. Variranje parametara (koncentracije kiseline, vremena kontakta, ponavljanje ciklusa) nije dalo zadovoljavajuće efekte i u svim ispitanim varijantama nije postignuta potpuna dekontaminacija cevnog materijala. Takođe, kao veliki problem pokazao se tečni radioaktivni otpad, kao nusproizvod primenjene tehnike. Separacione tehnike, kao što su kompleksiranje, upotreba kreča i reverzne osmoze, nisu adekvatne za uklanjanje Ra iz rastvora. Kompleksiranje jona  $\text{Ra}^{2+}$  u prisustvu drugih zemnoalkalnih katjona ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Sr}^{2+}$  i  $\text{Ba}^{2+}$ ) je takođe problematično, jer jon  $\text{Ra}^{2+}$  pokazuje najmanju tendenciju stvaranja kompleksa, pa primenjeni kompleksanti nisu selektivni prema Ra. Na tržištu postoje preparati za selektivno uklanjanje Ra, ali je u ovom slučaju cena

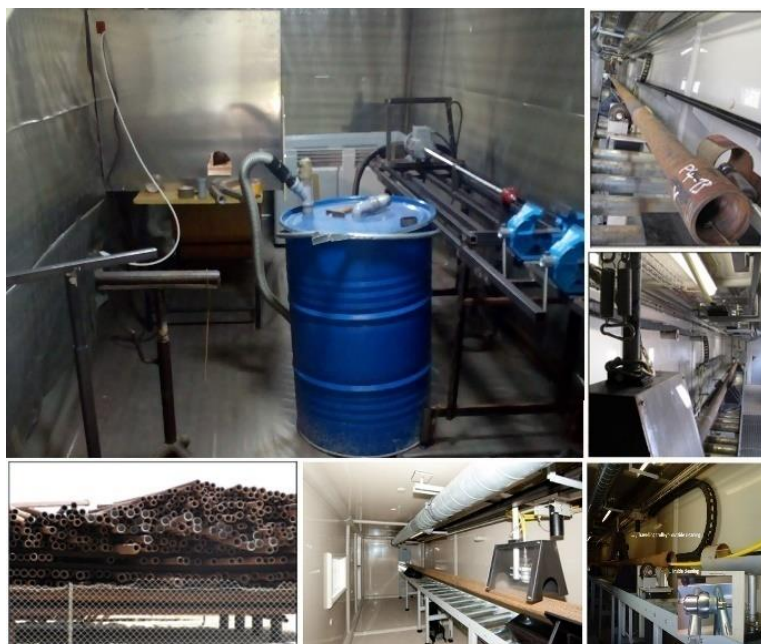
limitirajući parametar tretmana. Većina publikovanih metoda za rastvaranje Ra-taloga su teško izvodljive u praksi, a ujedno su skupe i dugotrajne i zahtevaju čitav niz hemijskih koraka, uključujući i visoko rizične, kao što je upotreba visokih temperatura za karbonizaciju [5].

### 3. Mehanička dekontaminacija

Mehanička dekontaminacija podrazumeva korišćenje mehaničkih tehnika za čišćenje ili uklanjanje površina kao što su usisavanje, brisanje, ribanje (uz opciono korišćenje abraziva), bušenje, mlevenje, ultrazvučno čišćenje, uklanjanje površinskih slojeva, peskarenje, ljuštenje, itd. Često se koriste jer su jeftine, široko dostupne i jednostavne, uz mogućnost kombinovanja sa hemijskim i elektrohemijskim metodama. Osnovna mana mehaničke dekontaminacije je mogućnost širenja kontaminacije vazduhom.

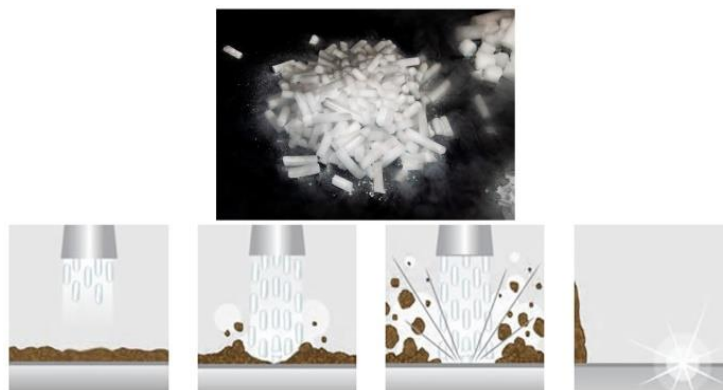
Jedna od standardnih industrijski prihvaćenih tehnika za fizičko/mehaničko uklanjanje depozita *NORM*-a je korišćenje vodenog mlaza pod visokim pritiskom i ultra visokim pritiskom (do 40 000 psi). Proces je dugotrajan i zahteva veliko angažovanje ljudi, uz efikasnu tehnologiju razdvajanja i zadržavanja odstranjenog depozita. Pored čvrstog sekundarnog otpada ova tehnika proizvodi i značajnu količinu otpadne vode. Upotreba peska i/ili drugih abrazivnih sredstava takođe su jedne od korišćenih metoda za dekontaminaciju i uklanjanje cevnog depozita. Ovim postupcima se generiše značajna količina sekundarnog čvrstog otpada, koji zahteva adekvatno rukovanje, kontrolu i tretman.

Fizičko/mehaničko uklanjanje depozita uz pomoć specijalnih noževa, brusnog alata i alata sa metalnim četkama kojima se struže, brusi i/ili četka depozit sa unutrašnjosti cevi, pokazalo se kao efikasna metoda dekontaminacije (slika 2). Međutim, sama metoda zahteva veliko angažovanje ljudi, proces je dugotrajan i često zahteva ponavljanje pojedinih operacija i po nekoliko puta. Takođe, jedna od mana je i velika potrošnja korišćenog alata, kao i stvaranje čvrstog sekundarnog otpada (metalni opiljci cevi, delovi korišćenog alata, i dr.).



Slika 2. Izgled postrojenja za mehaničko uklanjanje depozita.





**Slika 3. Dekontaminacija suvim ledom.**

Osnovna mana svih pomenutih metoda/tehnika je stvaranje velike količine sekundarnog otpada. Efikasna dekontaminacija površina bez stvaranja sekundarnog otpada predstavlja izazov u procesima dekontaminacije materijala, a upotreba suvog leda jedna je od mogućnosti na koju se sve više stavlja akcenat. Upotrebom peleta suvog leda (ugljen-dioksid u čvrstom agregatnom stanju) u kombinaciji sa komprimovanim vazduhom dobija se mlaz u kojem se čestice kreću velikom brzinom i kojim se vrši bombardovanje površina koje se čiste.

Bombardovanje površina peletima CO<sub>2</sub> slično je procesu peskarenja (slika 3), ali je dinamika čišćenja drugačija i superiornija. CO<sub>2</sub> peleti prodiru u sloj kontaminanta gde nakon udara prelaze u gasovito stanje (proces sublimacije) i povećavaju svoju zapreminu i do 750 puta noseći sa sobom i deo kontaminacije. Kontaminacija nošena ugljen-dioksidom uvodi se u sistem za filtriranje (HEPA filtere) u kojima se kontaminacija zadržava, a CO<sub>2</sub> oslobađa u atmosferu. Proces čišćenja primenjuje tri osnovna fenomena: kinetičku energiju (brzina udara peleta suvog leda na zagađenu površinu može biti bliska ili čak i premašiti brzinu zvuka), termički šok (sloj kontaminacije postaje krt nakon brzog hlađenja i postepeno se odvaja od površine) i sublimacija (peleti menjaju svoje fizičko stanje i prelaze u gas). Samo neke od prednosti ove metode su efikasna dekontaminacija bez oštećenja materijala koji se dekontaminira i bez sekundarnog otpada, izuzetna mobilnost i pristupačnost opreme, mogućnost upotrebe i oko električne opreme (proces je potpuno suv), primenljivost na sve površine (metal, drvo, beton, staklo, tekstil).

#### **4. Zaključak**

Razvoj tehnologija za dekontaminaciju cevnog materijala sa povišenom radioaktivnošću predstavlja poseban izazov sa aspekta efikasnosti, ekonomičnosti i ekološke prihvatljivosti, uz generisanje što manje količine sekundarnog otpada. Postojeće tehnologije se zasnivaju na mehaničkom uklanjanju depozita upotrebom vode, peska i drugih abrazivnih sredstava, u kombinaciji sa komprimovanim vazduhom, ali i na tehnikama fizičko/mehaničkog uklanjanja depozita uz pomoć specijalnih noževa i različitog brusnog alata. Sve ove tehnike proizvode značajne količine sekundarnog radioaktivnog otpada, koji je potrebno tretirati. Sa druge strane, primena suvog leda predstavlja relativno novu i visoko efikasnu tehniku za uklanjanje kontaminiranih depozita. Za razliku od svih drugih primenjivanih tehnika, upotrebom peleta suvog leda i variranjem procesnih uslova (dimenzija peleta i pritisak vazduha) postiže se efikasno uklanjanje depozita, bez oštećenja osnovnog materijala i bez stvaranja sekundarnog otpada.

### 5. Zahvalnica

Rad je podržan od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

### 6. Literatura

- [1] K. Froehlich, *Environmental radionuclides: tracers and timers of terrestrial processes*, Elsevier, 2010.
- [2] Radiation protection and the management of radioactive waste in the oil and gas industry, Safety Report Series No. 419, STI/PUB/1171, IAEA, Vienna, 2003.
- [3] N.S. Awwad, M.F. Attallah, E.M. El-Afifi, H.A. Ibrahim, H.F. Aly, *Overview about different approaches of chemical treatment of NORM and TE-NORM produced from oil exploitation*, In: *Advances in Petrochemicals*, V. Patel Ed., Intechopen, 2015.
- [4] World Nuclear Association, *Naturally-occurring radioactive materials (NORM)*, 2020.
- [5] J.A. Abdullah, M.S.A. Masri, Y. Amin. Dissolution of [ $^{226}\text{Ra}$ ]BaSO<sub>4</sub> and partial separation of  $^{226}\text{Ra}$  from radium/barium sulfate: A new treatment method for NORM waste from petroleum industry. *Appl. Radiat. Isot.* 107, 2016, 377-381.

**DECONTAMINATION OF PIPE MATERIAL TECHNOLOGICALLY  
ENRICHED WITH PRIMORDIAL RADIONUCLIDES**

**Mihajlo JOVIĆ, Ivana SMIČIKLAS, Nenad ŠIPKA,  
Živojin STOJANOVIĆ and Predrag BOŽOVIĆ**

*„Vinča” Institute of Nuclear Sciences, University of Belgrade,  
National Institute of the Republic of Serbia, Radiation and Environmental Protection  
Department, Belgrade, Serbia, [mjovic@vin.bg.ac.rs](mailto:mjovic@vin.bg.ac.rs), [ivanat@vin.bg.ac.rs](mailto:ivanat@vin.bg.ac.rs),  
[bozovic@vin.bg.ac.rs](mailto:bozovic@vin.bg.ac.rs)*

**ABSTRACT**

The oil industry is one of the largest producers of *TENORM* materials in Serbia and on a global level. Due to significant changes in temperature and pressure, the transport of oil and gas from geological reservoirs causes the deposition of primordial radionuclides and other substances within the transport pipes to the level of increased radioactivity that requires the implementation of safety and radiation protection measures. The highest activity in scale and sludge deposits originates from  $^{226}\text{Ra}$ , with a half-life of 1600 years. This paper discusses the advantages and disadvantages of existing chemical and physical/mechanical decontamination methods in the light of practical experience. Improving technologies for decontamination of pipe materials with increased radioactivity remains a challenge, and the main goal is to develop efficient, economical, and environmentally friendly solutions without or with the generation of as little secondary waste as possible. In this sense, the development and optimization of methods based on the application of dry ice pellets in combination with compressed air deserve special attention.

## MODELI IZOTERMI SORPCIJE JONA SR(II) I CO(II) NA OTPADNIM CEMENTNIM MATERIJALIMA

Ivana JELIĆ, Marija ŠLJIVIĆ-IVANOVIĆ, Slavko DIMOVIĆ,  
Mihajlo JOVIĆ i Ivana SMIČIKLAS

Univerzitet u Beogradu, Institut za nuklearne nauke Vinča - Institut od nacionalnog značaja za Republiku Srbiju, Laboratorija za zaštitu od zračenja i zaštitu životne sredine, Beograd, Srbija, [ivana.jelic@vin.bg.ac.rs](mailto:ivana.jelic@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), [mjovic@vin.bg.ac.rs](mailto:mjovic@vin.bg.ac.rs), [ivanat@vin.bg.ac.rs](mailto:ivanat@vin.bg.ac.rs)

### SADRŽAJ

*Sastav otpadnih cementnih materijala (OCM), kao što su beton i fasadni materijal, baziran je na kvarcu i kalcitu. Zahvaljujući kalcitu i baznom karakteru, ovakvi matriksi pokazali su zadovoljavajući afinitet sorpcije Sr(II) i Co(II) jona. Ispitivanjem uticaja početne koncentracije jona u rastvoru na sorbovanu količinu omogućeno je definisanje sorpcionih izoterma. U ovom radu prikazani su rezultati matematičkog modelovanja izoterma Langmuir-ovim, Freundlich-ovim i linearnim modelom. Ustanovljeno je da Langmuir-ov model znatno bolje opisuje eksperimentalne podatke dobijene za sorpciju Co(II) jona na fasadnom materijalu, dok je sorpcija na uzorku otpadnog betona bolje opisana Freundlich-ovom izotermom. Sorpcija Sr(II) jona na OCM pokazala je praktično linearnu zavisnost.*

### 1. Uvod

Studije o korišćenju otpadnih cementnih materijala (OCM) u svrhu sorpcije teških metala i radionuklida uključuju širok spektar otpadnog betona, fasadnih materijala, maltera ili njihovih smesa. Osnova za ovakva naučna istraživanja predstavlja činjenicu da navedeni otpadni materijali imaju značajne sličnosti sa uobičajenim kompozitnim materijalima, odnosno matriksima za imobilizaciju (solidifikaciju) tečnog radioaktivnog otpada (RAO), kao što su betoni i malteri [1-4].

Istraživanja su pokazala da bi upotreba otpadnih cementnih materijala u procesu sorpcije mogla da bude vrlo efikasna, ali i ekonomski isplativa alternativa za standardno korišćene metode. Pošto su radioaktivni izotopi stroncijuma i kobalta značajne komponente tečnog RAO, u sistemima šaržne sorpcije proučavana je imobilizacija njihovih jona iz vodenih rastvora. U ovom radu prikazani su rezultati modelovanja sorpcionih izoterma jona Sr(II) i Co(II) otpadnim betonom i fasadnim materijalom Langmuir-ovim, Freundlich-ovim i linearnim matematičkim modelom.

### 2. Eksperimentalni deo

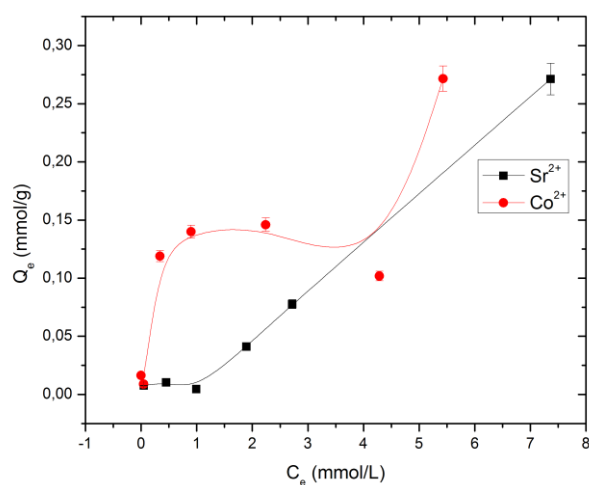
Prikupljeni su uzorci otpadnog betona i fasadnog materijala, eksploatisanog duži vremenski period (minimum 40 godina) [2]. Fizičko-hemijskom karakterizacijom ustanovljeno je da su, usled starenja materijala, u ovim uzorcima najviše zastupljeni kalcit i kvarc kao kristalne faze [5]. Određivanjem pH vrednosti i ispitivanjem aktivnosti gama-emitera, utvrđeno je da korišćenje ispitivanih materijala ne predstavlja opasnost po životnu sredinu i zdravlje ljudi [2].

U cilju definisanja sorpcionog kapaciteta ispitanih materijala prema jonima stroncijuma i kobalta, konstruisane su sorpcione izoterme na osnovu rezultata eksperimenata u kojima je varirana početna koncentracija vodenog rastvora oba jona od  $5 \cdot 10^{-4}$  mol/L do  $3 \cdot 10^{-3}$  mol/L tokom 24 h na sobnoj temperaturi [2].

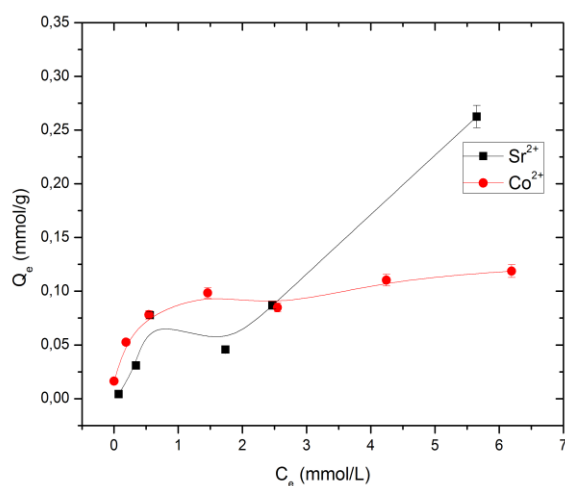
Grafik zavisnosti sorbovanih ravnotežnih količina ( $Q_e$ ) od rezidualne koncentracije jona metala u rastvoru ( $C_e$ ) predstavlja sorpcionu izotermu. Dobijene krive su fitovane najčešće korišćenim modelima, *Langmuir*-ovim i *Freundlich*-ovim modelom.

### 3. Rezultati i diskusija

Kapaciteti sorpcije određeni su u šaržnim uslovima, u jednodimenzionalnim rastvorima. Afinitet OCM prema Sr(II) i Co(II) jonima u rastvoru definisana je na osnovu sorpcionih izoterma. Odnosi između količine jona sorbovanih na čvrstoj fazi,  $Q_e$  otpadnih materijala i rezidualne koncentracije u tečnoj fazi,  $C_e$  pri ravnotežnim uslovima prikazani su na slikama 1 i 2.



**Slika 1. Izoterme sorpcije Sr(II) i Co(II) jona na uzorku betona.**



**Slika 2. Izoterme sorpcije Sr(II) i Co(II) jona na uzorku fasadnog materijala.**

Za uzorke betona i fasade dobija se praktično linearna zavisnost. OCM pokazuju značajan afinitet prema sorpciji Sr(II) katjona, sa ekvivalentnim kapacitetom od oko 0,25 mmol/g za maksimalne rezidualne koncentracije u tečnoj fazi. Dobijeni rezultati se dobro slažu sa sorpcionim kapacitetom Sr(II) jona na C-S-H komponentama, koje su

glavni sastojci cementa [6]. S obzirom da proces sorpcije prati linearnu zavisnost, maksimalni sorpcioni kapacitet nije postignut i može se očekivati da dostigne i višu vrednost sa povećanjem početnih koncentracija datog katjona.

Veća efikasnost vezivanja Co(II) dostignuta je pri korišćenju uzorka betona. Maksimalni sorpcioni kapacitet eksperimentalno određen za uzorak fasade je 0,12 mmol/g, dok je na uzorku betona 0,27 mmol/g.

Za opisivanje izoterme L-tipa najviše se koriste hipotetički *Langmuir*-ov i empirijski *Freundlich*-ov model [7], predstavljeni jednačinama (1), odnosno (2):

$$Q_e = \frac{q_m \cdot K_L \cdot C_e}{1 + K_L \cdot C_e} \quad (1)$$

$$Q_e = K_F \cdot C_e^n \quad (2)$$

Matematički, ovi modeli mogu da se predstave i linearnim formulama. *Langmuir*-ova linearna jednačina [8]:

$$\frac{C_e}{Q_e} = \frac{C_e}{q_m} + \frac{1}{q_m \cdot K_L} \quad (3)$$

gde je:

$C_e$ - 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].

*Freundlich*-ova linearna jednačina [9]:

$$\ln Q_e = \ln K_F + n \cdot \ln C_e \quad (4)$$

gde je:

$Q_e$ - ravnotežna koncentracija jona na čvrstoj -fazi [mmol/g];

$K_F$ ,  $n$  – parametri *Freundlich*-ove izoterme;  $K_F$  [(mmol<sup>1-n</sup>·dm<sup>3n</sup>/g)], parametar  $n$  nema jedinicu;

$C_e$ - ravnotežna koncentracija jona u tečnoj fazi [mmol/L].

Na osnovu dobijenih rezultata određene su konstante u jednačinama (3) i (4) sorpcionih izoterme za *Langmuir*-ov i *Freundlich*-ov model (tabela 1). Primenom ANOVA testa mogu da se izračunaju tzv. koeficijenti određenosti ( $R^2$ ). Određeni model dobro se slaže sa eksperimentalnim podacima kada je  $R^2 > 0,9$ .

Imajući u vidu izračunate vrednosti  $R^2$  koje su veće od 0,9 može da se smatra da postoji posebno dobro slaganje sa *Langmuir*-ovim modelom pri sorpciji Co(II) jona na uzorku fasade. Sorpcija Co(II) jona na betonu bolje se opisuje *Freundlich*-ovim modelom.

Kako se iz tabele 1 vidi, najniže vrednosti za  $K_F$  u *Freundlich*-ovom modelu dobijene su za Sr(II) jon, što je u saglasnosti sa njegovim relativno niskim sorpcionim kapacitetima, dok su sorpcioni kapaciteti Co(II) jona na ispitivanim otpadnim materijalima značajno bolji, što je i u skladu sa višim vrednostima  $K_F$ .

Tabela 1. Konstante za Langmuir-ov i Freundlich-ov model izotermei.

<b>Sr(II) jon</b>			
<b>Langmuir-ov model</b>			
	$q_m$	$K_L$	$R^2$
beton	NP*	NP*	0,0476
fasada	0,4935	0,1201	0,1390
<b>Freundlich-ov model</b>			
	$n$	$K_F$	$R^2$
beton	0,7029	0,0264	0,6001
fasada	0,8107	0,0544	0,8496
<b>Co(II) jon</b>			
<b>Langmuir-ov model</b>			
	$q_m$	$K_L$	$R^2$
beton	0,1837	1,9199	0,6672
fasada	0,1191	3,1736	0,9787
<b>Freundlich-ov model</b>			
	$n$	$K_F$	$R^2$
beton	0,5678	0,0944	0,7368
fasada	0,2094	0,0808	0,8839

\*NP –nije primenljivo

Odstupanja od L-tipa izoterme pokazuje i sorpcija Sr(II) jona, koja pokazuje nešto raznovrsnije karakteristike. Naime, proces sorpcije Sr(II) jona na većini komponenata građevinskog otpada, opisuje se linearnim izotermama prema jednačini linearnog oblika (5):

$$Q_s = k \cdot C_s \quad (5)$$

gde je  $Q_s$  koncentracija jona sorbovanih na čvrstoj fazi,  $C_s$  rezidualna koncentracija u tečnoj fazi, a  $k$  nagib prave (koeficijent pravca prave).

Koeficijenti određenosti ( $R^2$ ) sa odgovarajućim koeficijentima pravca za odgovarajuće linearne jednačine procesa sorpcije Sr(II) jona navedeni su u tabeli 2. Kako je moguće zapaziti,  $R^2$  vrednosti su veće od 0,9 što ukazuje da se navedeni linearni modeli dobro slažu sa eksperimentalnim podacima.

Tabela 2. Proces sorpcije Sr(II) jona na OCM uzorcima opisan linearnim izotermama.

<b>Uzorak</b>	<b><math>k(L/g)</math></b>	<b><math>R^2</math></b>
beton	0,03458	0,9744
fasada	0,04417	0,9454

Proces sorpcije ispitanih jona iz rastvora pri ravnotežnim uslovima najbolje je opisan Langmuir-ovim ili Freundlich-ovim modelom sorpcionih izotermei kod većine ispitanih komponenti građevinskog otpada, osim pri sorpciji Sr(II) jona na kompozitima na bazi cementa, gde je zavisnost skoro linearna.

### 4. Zaključak

Ispitivanjem sorpcije Sr(II) i Co(II) jona na uzorcima betona i fasadnog materijala, pokazano je da ispitane čvrste matrice poseduju zadovoljavajući 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 izotermi. Sorpcija Sr(II) jona na uzorcima OCM pokazuje skoro linearnu zavisnost. S druge strane, sorpcija Co(II) jona na otpadnom fasadnom materijalu bolje se opisuje *Langmuir*-ovim modelom, dok je sorpcija na betonu bolje opisana *Freundlich*-ovim modelom.

### 5. Zahvalnica

Istraživanje predstavljeno u ovom radu urađeno je uz finansijsku podršku Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije, u okviru finansiranja naučno istraživačkog rada Univerziteta u Beogradu, Institut za nuklearne nauke Vinča (Ugovor br. 451-03-9/2021-14/200017).

### 6. Literatura

- [1] I. Jelic, M. Sljivic-Ivanovic, S. Dimovic, D. Antonijevic, M. Jovic, M. Mirkovic, I. Smiciklas. The Applicability of Construction and Demolition Waste Components for Radionuclide Sorption. *J. Clean. Prod.* 171, 2018, 322–332.
- [2] M. Sljivic-Ivanovic, I. Jelic, S. Dimovic, D. Antonijevic, M. Jovic, A. Mrakovic, I. Smiciklas. Exploring innovative solutions for aged concrete utilization: treatment of liquid radioactive waste. *Clean Technol. Environ. Policy* 20 (6), 2018, 1343–1354.
- [3] I. Jelic, M. Sljivic-Ivanovic, S. Dimovic, D. Antonijevic, M. Jovic, R. Serovic, I. Smiciklas. Utilization of Waste Ceramic and Roof Tiles for Radionuclide Sorption. *Process Saf. Environ. Prot.* 105, 2016, 348–360.
- [4] S. Kubilay, R. Gürkan, A. Savran, T. Sahan. Removal of Cu(II), Zn(II) and Co(II) ions from aqueous solutions by adsorption onto natural bentonite. *Adsorption*. 13, 2007, 41–51.
- [5] M. El-Gohary, M. Al-Naddaf. Characterization of bricks used in the external casing of Roman bath walls “Gadara-Jordan”. *Mediterr. Archaeol. Archaeom.* 9, 2009, 29–46.
- [6] J. Tits, E. Wieland, C. Müller, C. Landesman, M. Bradbury. Strontium binding by calcium silicate hydrates. *J. Colloid Interface Sci.* 300, 2006, 78–87.
- [7] G. Limousin, J. Gaudet, L. Charlet, S. Szenknect, V. Barthes, M. Krimissa. Review sorption isotherms: A review on physical bases, modeling and measurement. *Appl. Geochem.* 22, 2007, 249–275.
- [8] I. Langmuir. The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica, and platinum, *J. Am. Chem. Soc.* 40, 1918, 1361–1403.
- [9] H. Freundlich, *Kapillarchemie*, Akademische Verlagsgesellschaft, Leipzig, Germany, 1909.



**MODELS OF SR(II) AND CO(II) IONS SORPTION ISOTHERMS ON WASTE CEMENT MATERIALS**

**Ivana JELIĆ, Marija ŠLJIVIĆ-IVANOVIĆ, Slavko DIMOVIĆ,  
Mihajlo JOVIĆ and Ivana SMIČIKLAS**

*University of Belgrade, Vinča Institute of Nuclear Sciences - National Institute for the Republic of Serbia, Radiation and Environmental Protection Department, Belgrade, Serbia, [ivana.jelic@vin.bg.ac.rs](mailto:ivana.jelic@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), [mjovic@vin.bg.ac.rs](mailto:mjovic@vin.bg.ac.rs), [ivanat@vin.bg.ac.rs](mailto:ivanat@vin.bg.ac.rs)*

**ABSTRACT**

The composition of waste cementitious materials (OCM), such as concrete and facade material, is based on quartz and calcite. Due to calcite and base character, these matrices showed a satisfactory sorption affinity for Sr(II) and Co(II) ions. By examining the influence of the initial concentration of ions in the solution on the sorbed amount, it is possible to define sorption isotherms. In this paper, the results of mathematical modeling of isotherms by Langmuir, Freundlich, and linear models were presented. It was found that Langmuir's model significantly better describes the experimental data obtained for the sorption of Co(II) ions on the facade material, while the sorption on the waste concrete sample is better described by the Freundlich isotherm. Sorption of Sr(II) ions on OCM showed practically linear dependence.

## PRIMENA *LANGMUIR-OVIH* I *FREUNDLICH-OVIH* IZOTERMI NA SORPCIJU CO(II) I NI(II) JONA NA OTPADNIM OPEKAMA

**Marija ŠLJIVIĆ-IVANOVIĆ, Ivana JELIĆ, Slavko DIMOVIĆ,  
Mihajlo JOVIĆ i Ivana SMIČIKLAS**

*Univerzitet u Beogradu, Institut za nuklearne nauke Vinča - Institut od nacionalnog značaja za Republiku Srbiju, Laboratorija za zaštitu od zračenja i zaštitu životne sredine, Beograd, Srbija, [marijasljivic@vin.bg.ac.rs](mailto:marijasljivic@vin.bg.ac.rs), [ivana.jelic@vin.bg.ac.rs](mailto:ivana.jelic@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), [ivanat@vin.bg.ac.rs](mailto:ivanat@vin.bg.ac.rs)*

### SADRŽAJ

*Opekarski i keramički materijali čine oko 54 % ukupne količine građevinskog otpada. Tokom poslednje decenije, interesovanje za upotrebu ovakvih otpadnih materijala i njihovih nusproizvoda kao sorbenata za prečišćavanje kontaminiranih voda i vodenih rastvora, znatno je povećano. Istraživanja su pokazala da bi upotreba otpadnih opeka u procesu sorpcije mogla da bude vrlo efikasna i ekonomski isplativa alternativa za imobilizaciju (solidifikaciju) tečnog radioaktivnog otpada. U ovom radu prikazani su rezultati matematičkog modelovanja izotermi Langmuir-ovim i Freundlich-ovim modelom. Langmuir-ov model znatno bolje opisuje eksperimentalne podatke dobijene za sorpciju Co(II) i Ni(II) jona na uzorcima pune opeke, dok je sorpcija oba jona na uzorku šuplje opeke bolje opisana Freundlich-ovim izotermama.*

### 1. Uvod

Dosadašnja istraživanja pokazala su da su kvarc i kalcit, pored minerala gline, najčešće primese u opekarskim i keramičkim proizvodima [1]. Opeka je najmasovniji proizvod keramičke industrije. Opekarska, sa ostalim građevinskim keramičkim materijalima, čini oko 54 % ukupne količine građevinskog otpada [2]. Predominantna opcija zbrinjavanja ove vrste otpada je odlaganje na deponijama [2].

Jedno od potencijalno prosperitetnih polja u korišćenju opekarskog otpada je mogućnost korišćenja njegovih sorpcionih svojstava. Tokom poslednje decenije, interesovanje za upotrebu otpadnih opekarskih materijala i nusproizvoda kao sorbenata za prečišćavanje kontaminirane vode znatno je povećano [3]. Istraživanja su pokazala da bi upotreba otpadnih opeka u procesu sorpcije mogla da bude vrlo efikasna i ekonomski isplativa alternativa za imobilizaciju (solidifikaciju) tečnog radioaktivnog otpada (RAO) [4-7]. S obzirom da radioaktivni izotopi kobalta i nikla predstavljaju značajne komponente tečnog RAO, u sistemima šaržne sorpcije proučavana je imobilizacija njihovih jona iz vodenih rastvora na navedenim otpadnim sorbentima. U ovom radu prikazani su rezultati modelovanja sorpcionih izotermi jona Co(II) i Ni(II) na otpadnim opekarskim proizvodima *Langmuir-ovim*, *Freundlich-ovim* i linearnim matematičkim modelom.

### 2. Eksperimentalni deo

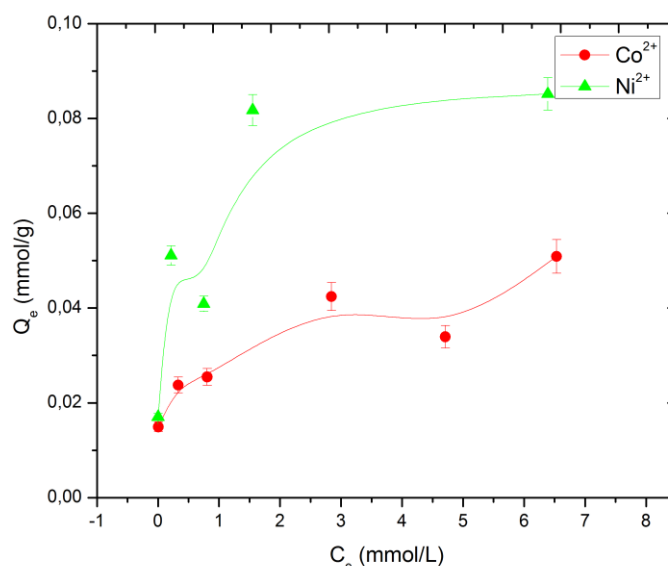
U eksperimentima su korišćena dva uzorka pune opeke, B1 i B2, poreklom iz ruševina zgrada koje su izgrađene oko 1930. (B1) i oko 1970. godine (B2), dok je uzorak šuplje opeke, B3, poznat kao blok, novijeg doba. PUNE opeke iz različitih perioda gradnje su prikupljene sa namerom da bi se ispitala potencijalna razlika u ponašanju za vreme sorpcije usled različitog načina proizvodnje opeke tokom veoma dugačkog perioda proizvodnje ovog tradicionalnog građevinskog materijala.

Analizom XRD pokazano je da u sastavu uzoraka opeke postoje varijacije. Uzorak B1 sastoji se uglavnom od anortita, kalcijum salicida, volastonita, mulita i elementarnog gvožđa. Uzorak B2 sadrži kvarc, sanidin i anortit. Za razliku od prethodna dva uzorka, uzorak B3 sadrži kvarc kao jedinu kristalnu fazu. XRD ispitivanja opeke do sada, takođe, pokazala su da kvarc i kalcit predstavljaju najčešća jedinjenja u njihovom sastavu, sa dodatkom gline i glinenih minerala [1]. Jedno istraživanje, koje razmatra keramičke pločice iz različitih vremenskih perioda (XVI - XX vek), pokazalo je da pločice proizvedene u XX veku najčešće sadrže kvarc kao jedinu kristalnu strukturu [8]. Ovaj fenomen je pripisan napretku obrade keramike. Naime, kroz razne periode menjao se i sastav pune opeke i primenjivale su se različite temperature pečenja što dalje uzrokuje i različiti sastav gotovog proizvoda [8]. Određivanjem pH vrednosti i ispitivanjem aktivnosti gama-emitera, utvrđeno je da korišćenje ispitivanih materijala ne predstavlja opasnost po životnu sredinu i zdravlje ljudi [4].

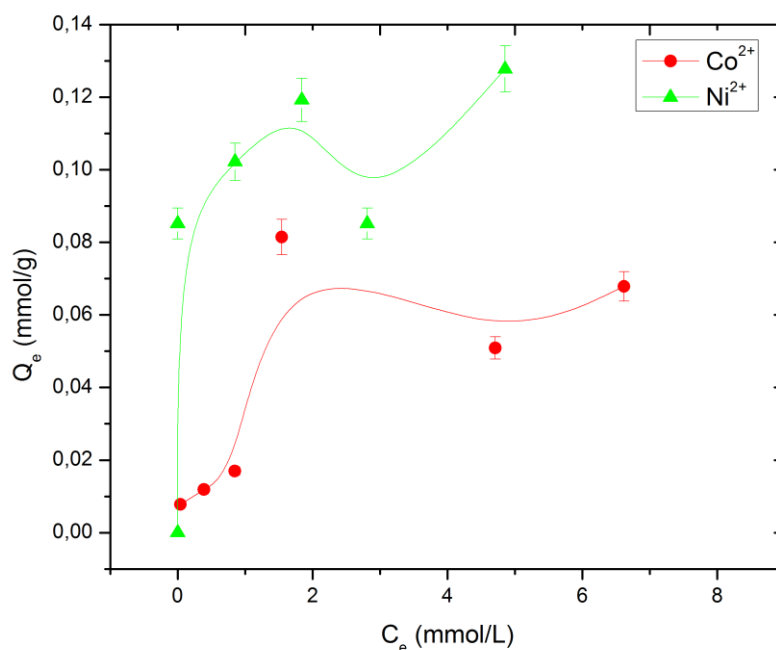
U cilju definisanja sorpcionog kapaciteta ispitanih materijala prema jonima kobalta i nikla, konstruisane su sorpcione izoterme na osnovu rezultata eksperimenata u kojima je varirana početna koncentracija vodenog rastvora oba jona od  $5 \cdot 10^{-4}$  do  $3 \cdot 10^{-3}$  mol/L tokom 24 h na sobnoj temperaturi [4]. 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

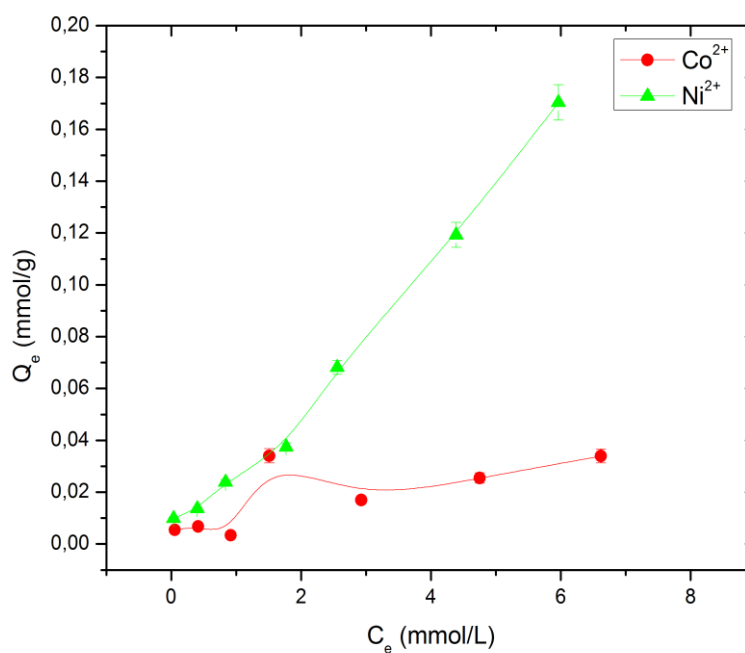
Kapaciteti sorpcije određeni su u šaržnim uslovima, u jednokomponentnim rastvorima. Afinitet otpadnih opeka prema Co(II) i Ni(II) jonima u rastvoru definisan je na osnovu sorpcionih izoterma. Odnosi između količine jona sorbovanih na čvrstoj fazi,  $Q_e$  otpadnih materijala i rezidualne koncentracije u tečnoj fazi,  $C_e$  pri ravnotežnim uslovima prikazani su na slikama 1-3.



**Slika 1. Izoterme sorpcije Co(II) i Ni(II) jona na uzorku pune opeke B1.**



Slika 2. Izoterme sorpcije Co(II) i Ni(II) jona na uzorku pune opeke B2.



Slika 3. Izoterme sorpcije Co(II) i Ni(II) jona na uzorku šuplje opeke B3.

Kako se iz sorpcionih izoterma vidi, uzorci B1, B2 i B3 pokazuju nižu tendenciju vezivanja sa Co(II) jonima, sa maksimalnim sorpcionim kapacitetima od 0,03 mmol/g za uzorak B3, 0,05 mmol/g za uzorak B1 i oko 0,06 mmol/g za uzorak B2.

Najniža maksimalna sorbovana količina Ni(II) jona primećena je kod oba uzorka pune opeke (B1 i B2) sa sorpcionim kapacitetima ispod 0,13 mmol/g. Za razliku od Co(II),

sorpcija Ni(II) jona na uzorku B3 pokazala se efikasnijom u odnosu na ostale uzorke opeke i dostigla je maksimalni kapacitet od oko 0,17 mmol/g. Na slici 3 vidi se da ne postoji „plato“ na izotermi sorpcije Ni(II) jona na uzorku B3, odnosno da sorpcija Ni(II) jona na datom uzorku ima rastući trend, te može da se pretpostavi da bi se sa povećanjem koncentracije ovog jona proces sorpcije nastavio uz povećanje maksimalnog sorpcionog kapaciteta. Dobijeni rezultati u skladu su sa rezultatima drugih istraživanja koja pokazuju da različiti SiO<sub>2</sub> uzorci imaju promenljiv afinitet prema Co(II) i Ni(II) jonima [9].

Za opisivanje izotermi L-tipa u upotrebi su najviše hipotetički *Langmuir*-ov i empirijski *Freundlich*-ov model [10-12], predstavljeni jednačinama (1) i (2):

$$Q_s = \frac{q_m \cdot K_L \cdot C_s}{1 + K_L \cdot C_s} \quad (1)$$

$$Q_s = K_F \cdot C_s^n \quad (2)$$

Matematički, ovi modeli predstavljaju se i linearnim formulama. *Langmuir*-ova linearna jednačina [11]:

$$\frac{C_s}{Q_s} = \frac{C_s}{q_m} + \frac{1}{q_m \cdot K_L} \quad (3)$$

gde je:

$C_s$  - ravnotežna koncentracija jona u tečnoj fazi [mmol/L];

$Q_s$  - 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].

*Freundlich*-ova linearna jednačina [12]:

$$\ln Q_s = \ln K_F + n \cdot \ln C_s \quad (4)$$

gde je:

$Q_s$  - ravnotežna koncentracija jona na čvrstoj fazi [mmol/g];

$K_F$ ,  $n$  - parametri *Freundlich*-ove izoterme;  $K_F$  [(mmol<sup>1-n</sup>·dm<sup>3n</sup>/g)], parametar  $n$  nema jedinicu;

$C_s$  - ravnotežna koncentracija jona u tečnoj fazi [mmol/L].

Na osnovu dobijenih rezultata određuju se konstante u jednačinama (3) i (4) sorpcionih izotermi za *Langmuir*-ov i *Freundlich*-ov model (tabela 1). Primenom ANOVA testa mogu da se izračunaju koeficijenti određenosti ( $R^2$ ), a određeni model dobro se slaže sa eksperimentalnim podacima kada je  $R^2 > 0,9$ .

U tabeli 1 *bold*-ovanim je označen model koji najbolje opisuje proces sorpcije korišćenih jona na datim uzorcima.

Imajući u vidu izračunate vrednosti  $R^2$  koje su veće od 0,9 može da se smatra da postoji posebno dobro slaganje sa *Langmuir*-ovim modelom pri sorpciji Co(II) jona na uzorku starije pune opeke B1, kao i kod procesa sorpcije Ni(II) jona na uzorcima B1 i B2. *Freundlich*-ovim modelom može dobro da se opiše sorpcija oba jona na uzorku B3.

Tabela 1. Konstante za Langmuir-ov i Freundlich-ov model izoterma.

Co <sup>2+</sup> jon			
Langmuir-ov model			
	$q_m$	$K_L$	$R^2$
B1	<b>0,0469</b>	<b>2,3150</b>	<b>0,9205</b>
B2	<b>0,0772</b>	<b>0,6825</b>	<b>0,8238</b>
B3	0,0504	0,2320	0,25698
Freundlich-ov model			
	$n$	$K_F$	$R^2$
B1	0,1621	0,0310	0,8742
B2	0,4687	0,0285	0,7639
<b>B3</b>	<b>0,4124</b>	<b>0,0122</b>	<b>0,5215</b>
Ni <sup>2+</sup> jon			
Langmuir-ov model			
	$q_m$	$K_L$	$R^2$
B1	<b>0,0886</b>	<b>3,5342</b>	<b>0,9917</b>
B2	<b>0,0921</b>	<b>11,157</b>	<b>0,9678</b>
B3	0,3662	0,1056	0,4400
Freundlich-ov model			
	$n$	$K_F$	$R^2$
B1	0,1868	0,0605	0,5443
B2	-0,0384	0,1065	0,0280
<b>B3</b>	<b>0,5613</b>	<b>0,0390</b>	<b>0,8385</b>

#### 4. Zaključak

Ispitivanjem sorpcije Co(II) i Ni(II) jona na uzorcima betona i fasadnog materijala, pokazano je da ispitani čvrsti matriksi poseduju zadovoljavajući 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. Sorpcija oba jona na uzorcima otpadne pune opeke bolje se opisuje Langmuir-ovim modelom izotermom, dok je njihova sorpcija na bloku bolje opisana Freundlich-ovim modelom.

#### 5. Zahvalnica

Istraživanje predstavljeno u ovom radu urađeno je uz finansijsku podršku Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije, u okviru finansiranja naučno istraživačkog rada Univerziteta u Beogradu, Institut za nuklearne nauke Vinča (Ugovor br.451-03-9/2021-14/200017).

#### 6. Literatura

- [1] M. El-Gohary, M. Al-Naddaf. Characterization of bricks used in the external casing of Roman bath walls “Gadara-Jordan”. *Mediterr. Archaeol. Archaeom.* 9, 2009, 29–46.
- [2] O. Zimbili, W. Salim, M. Ndambuki. A Review on the Usage of Ceramic Wastes in Concrete Production. *Inter. J. Civil Architect. Structural Constructi. Engineer.* 8 (1), 2014, 91–95.

- [3] M. Ahmaruzzaman. Industrial wastes as low-cost potential adsorbents for the treatment of wastewater laden with heavy metals. *Adv. Colloid Interface Sci.* 166, 011, 36–59.
- [4] I. Jelic, I., M. Sljivic-Ivanovic, S. Dimovic, D. Antonijevic, M. Jovic, R. Serovic, I. Smiciklas. Utilization of Waste Ceramic and Roof Tiles for Radionuclide Sorption. *Process Saf. Environ. Prot.* 105, 2016, 348–360.
- [5] I. Jelic, M. Sljivic-Ivanovic, S. Dimovic, D. Antonijevic, M. Jovic, M. Mirkovic, I. Smiciklas. The Applicability of Construction and Demolition Waste Components for Radionuclide Sorption. *J. Clean. Prod.* 171, 2018, 322–332.
- [6] M. Sljivic-Ivanovic, I. Jelic, S. Dimovic, D. Antonijevic, M. Jovic, A. Mrakovic, A. I. Smiciklas. Exploring innovative solutions for aged concrete utilization: treatment of liquid radioactive waste. *Clean Technol. Environ. Policy* 20 (6), 2018, 1343–1354.
- [7] J. Tits, E. Wieland, C. Müller, C. Landesman, M. Bradbury. Strontium binding by calcium silicate hydrates. *J. Colloid Interface Sci.* 300, 2006, 78–87.
- [8] A. Carvalho, F. Vaz, M. Samora, J. Pires. Characterisation of Ceramic Pastes of Portuguese Ancient Tiles. *Mater. Sci. Forum* 514-516, 2006, 1648–1652.
- [9] G. Limousin, J. Gaudet, L. Charlet, S. Szenknect, V. Barthes, M. Krimissa. Review sorption isotherms: A review on physical bases, modeling and measurement. *Appl. Geochem.* 22, 2007, 249–275.
- [10] G. Brown, G. Parks. Sorption of trace elements on mineral surfaces: modern perspectives from spectroscopic studies, and comments on sorption in the marine environment. *Int. Geol. Rev.* 43, 2001, 963–1073.
- [11] I. Langmuir. The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica, and platinum, *J. Am. Chem. Soc.* 40, 1918, 1361–1403.
- [12] H. Freundlich, *Kapillarchemie*, Akademische Verlagsgesellschaft, Leipzig, Germany, 1909.

**APPLICATION OF LANGMUIR AND FREUNDLICH ISOTHERMS TO  
SORPTION OF CO (II) AND NI (II) IONS ONTO WASTE BRICKS**

**Marija ŠLJIVIĆ-IVANOVIĆ, Ivana JELIĆ, Slavko DIMOVIĆ,  
Mihajlo JOVIĆ and Ivana SMIČIKLAS**

*University of Belgrade, Vinča Institute of Nuclear Sciences - National Institute for the  
Republic of Serbia, Radiation and Environmental Protection Department, Belgrade,  
Serbia, [marijasljivic@vin.bg.ac.rs](mailto:marijasljivic@vin.bg.ac.rs), [ivana.jelic@vin.bg.ac.rs](mailto:ivana.jelic@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), [ivanat@vin.bg.ac.rs](mailto:ivanat@vin.bg.ac.rs)*

**ABSTRACT**

Brick and ceramic materials represent about 54 % of the total amount of construction and demolition waste. Over the last decade, interest in the use of these waste materials and their by-products as sorbents for the treatment of contaminated water and water solutions has increased significantly. Research has shown that the use of waste bricks in the sorption process could also be a very efficient and economically viable alternative for immobilization (solidification) of liquid radioactive waste. In this paper, the results of mathematical modeling of isotherms by Langmuir and Freundlich models were presented. The Langmuir model productively describes the experimental data obtained for the sorption of Co (II) and Ni (II) ions onto solid brick samples, while the sorption of both ions onto the hollow brick sample was better described by the Freundlich isotherm.



## MODELOVANJE IZOTERMI SORPCIJE SR(II) JONA NA OTPADNIM OPEKAMA

Ivana JELIĆ, Marija ŠLJIVIĆ-IVANOVIĆ, Slavko DIMOVIĆ,  
Mihajlo JOVIĆ i Ivana SMIČIKLAS

Univerzitet u Beogradu, Institut za nuklearne nauke Vinča - Institut od nacionalnog značaja za Republiku Srbiju, Laboratorija za zaštitu od zračenja i zaštitu životne sredine, Beograd, Srbija, [ivana.jelic@vin.bg.ac.rs](mailto:ivana.jelic@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), [mjovic@vin.bg.ac.rs](mailto:mjovic@vin.bg.ac.rs), [ivanat@vin.bg.ac.rs](mailto:ivanat@vin.bg.ac.rs)

### SADRŽAJ

Ispitivanje uticaja početne koncentracije Sr(II) jona u vodenom rastvoru na sorbovanu količinu omogućava definisanje sorpcionih izotermi. U ovom radu prikazani su rezultati matematičkog modelovanja izotermi Langmuir-ovim i Freundlich-ovim modelom, kao i linearnim modelom. ANOVA testom utvrđeni su koeficijenti određenosti ( $R^2$ ) za Langmuir-ov i Freundlich-ov model. Izračunate vrednosti bile su manje od 0,9 što znači da se dati modeli ne slažu dobro sa eksperimentalnim podacima. Međutim, sorpcija Sr(II) jona na uzorcima otpadne opeke pokazala je skoro linearnu zavisnost, odnosno vrednosti koeficijenta određenosti većih od 0,9 na datom modelu.

### 1. Uvod

Građevinski otpad se sastoji od različitih materijala kao što su beton, razne vrste keramičkih, odnosno glinenih proizvoda, na primer opeka, crep ili keramičke pločice, zatim asfalt, drvo, staklo, čelik i drugi proizvodi od metala, razne plastične mase i slično. Građevinski šut predstavlja heterogenu smesu kompozitnih građevinskih materijala (kompozita) na bazi cementa i gline. Opeka je najmasovniji proizvod keramičke industrije. Dobija se oblikovanjem, sušenjem i pečenjem plastične smese glinenog materijala i vode. Dosadašnja istraživanja pokazuju da su kvarc i kalcit, pored minerala gline, najčešće primese u opekarskim i keramičkim proizvodima [1]. Ovi materijali zajedno čine oko 54 % ukupne količine građevinskog otpada [2].

Ispitivanje upotrebe otpadnih građevinskih glinenih proizvoda, prvenstveno opeke, kao sorbenata za prečišćavanje kontaminiranih voda i imobilizaciju radionuklida iz tečnog radioaktivnog otpada (RAO) poslednjih decenija sve je izraženije [3-7]. Istraživanja su pokazala da ovakvi procesi mogu da budu i ekološki i ekonomski prihvatljivi [3-4].

Radioaktivni izotop stroncijuma predstavlja jednu od značajnih komponenti tečnog RAO, te je u sistemima šaržne sorpcije proučavana imobilizacija ovih jona iz vodenih rastvora. U ovom radu prikazani su rezultati modelovanja sorpcionih izotermi jona Sr(II) na otpadnim opekama Langmuir-ovim i Freundlich-ovim matematičkim modelom.

### 2. Eksperimentalni deo

Sakupljeni su uzorci dve pune opeke (B1 i B2), poreklom iz ruševina zgrada koje su izgrađene oko 1930. (B1) i oko 1970. godine (B2), i jedan uzorak šuplje opeke (B3), koji datira s početka ovog veka. Opeke iz različitih perioda proizvodnje i gradnje prikupljene su u nameri da se ispita potencijalna razlika u ponašanju tokom eksperimenata usled različitog načina njihove proizvodnje tokom veoma dugačkog perioda eksploatacije ovog tradicionalnog građevinskog materijala.

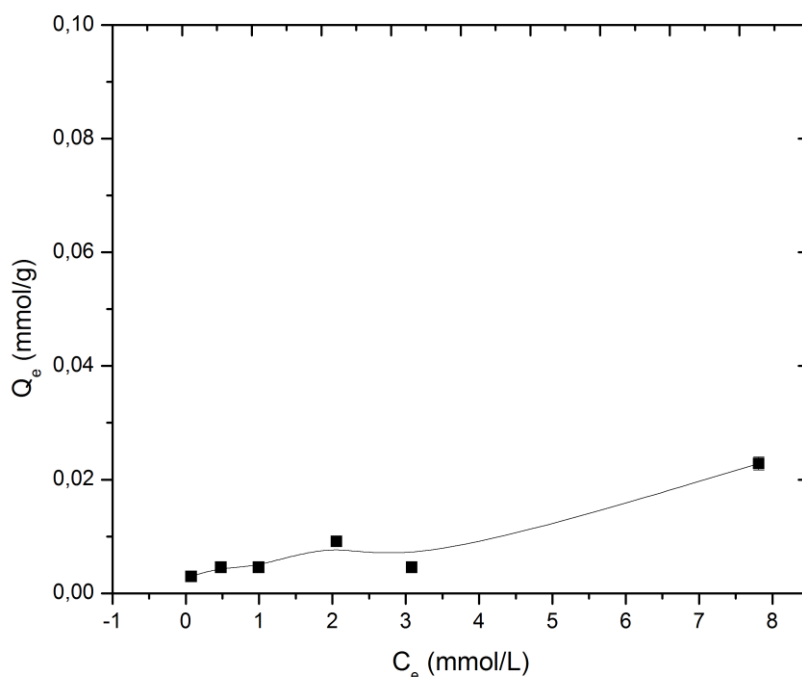
Određivanjem pH vrednosti i ispitivanjem aktivnosti gama-emitera, utvrđeno je da korišćenje ispitivanih materijala ne predstavlja opasnost po životnu sredinu i zdravlje ljudi [4].

U cilju definisanja sorpcionog kapaciteta ispitanih materijala prema jonima stroncijuma, konstruisane su sorpcione izoterme na osnovu rezultata eksperimenata u kojima je varirana početna koncentracija vodenog rastvora jona od  $5 \cdot 10^{-4}$  do  $3 \cdot 10^{-3}$  mol/L tokom 24 h na sobnoj temperaturi [2]. 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.

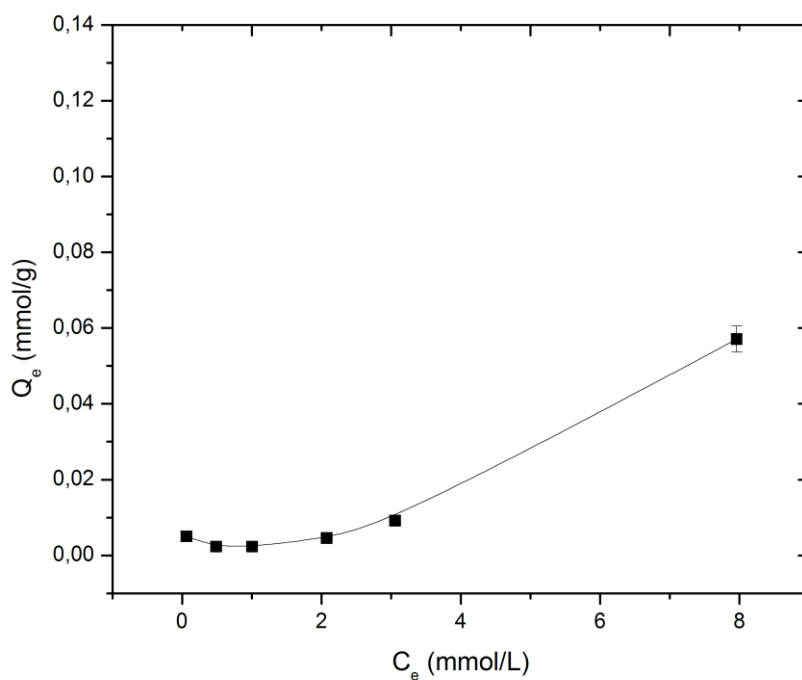
### 3. Rezultati i diskusija

XRD analiza pokazala je varijacije u sastavu uzoraka opeke. Uzorak B1 sastojao se uglavnom od anortita, pripadnika feldspar grupe, kalcijum salicida volastonita, mulita i elementarnog gvožđa. Uzorak B2 sadržao je kvarc, sanidin i anortit. Međutim, uzorak B3 je kao jedinu kristalnu fazu sadržao kvarc.

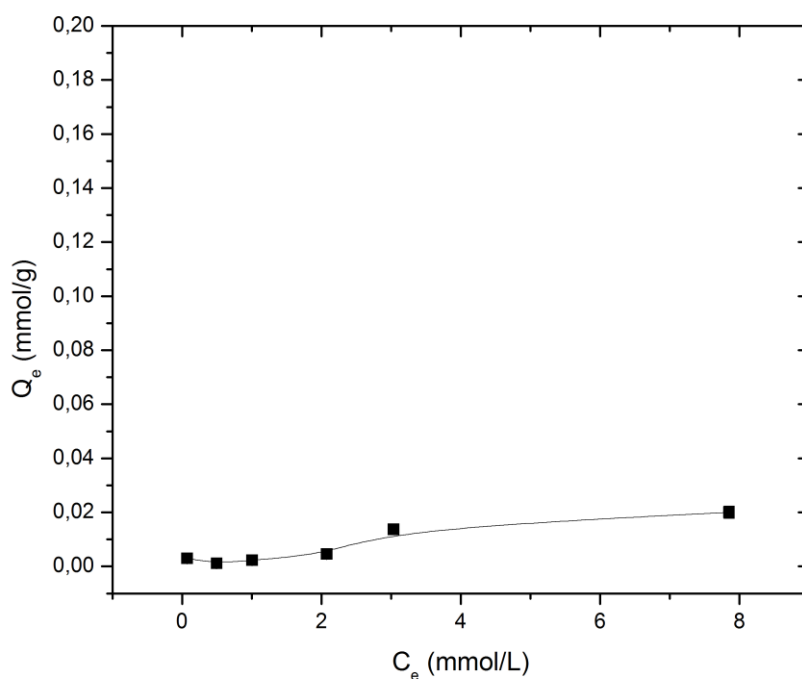
Kapaciteti sorpcije određeni su u šaržnim uslovima, u jednokomponentnom rastvoru. Afinitet otpadnih opeka prema Sr(II) jonima u rastvoru definisan je na osnovu sorpcionih izoterma. Odnos između količine jona sorbovanih na čvrstoj fazi  $Q_e$  otpadnih materijala i rezidualne koncentracije u tečnoj fazi  $C_e$  pri ravnotežnim uslovima, prikazan je na slikama od 1 do 3.



Slika 1. Izoterma sorpcije Sr(II) jona na uzorku pune opeke B1.



**Slika 2. Izoterma sorpcije Sr(II) jona na uzorku pune opeke B2.**



**Slika 3. Izoterma sorpcije Sr(II) jona na uzorku šuplje opeke B3.**

Proces sorpcije Sr(II) jona na B1, B2 i B3 uzorcima za početne koncentracije do  $5 \cdot 10^{-3}$  mol/L je zanemarljiva. Na slikama od 1 do 3, može da se zapazi da dalje povećanje inicijalnih koncentracija izaziva povećanje sorbovane količine. Međutim, i

ova količina ostaje niska od oko 0,05 mmol/g, 0,02 mmol/g i 0,01 mmol/g za B2, B1 i B3 uzorke, redom. Naime, katjoni stroncijuma i kalcijuma imaju sličnu reaktivnost i hemijsko ponašanje [8-9], što uzrokuje da je selektivnost sorbenta prema Sr(II) jonima niska u prisustvu Ca(II) jona. Prethodna istraživanja sorpcije katjona na kalcitu pokazala su da se katjoni Ba(II) i Sr(II), sa većim jonskim radijusom od Ca(II) slabo sorbuju, dok se manji katjoni (Cd, Mn, Zn, Co i Ni) vezuju više [8-9].

Za opisivanje izoterme L-tipa u upotrebi su najviše hipotetički *Langmuir*-ov i empirijski *Freundlich*-ov model. Matematički ovi modeli predstavljaju se i linearnim formulama. *Langmuir*-ova linearna jednačina [10]:

$$\frac{C_e}{Q_e} = \frac{C_e}{Q_m} + \frac{1}{q_m \cdot K_L} \quad (1)$$

gde je:

$C_e$  - 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].

*Freundlich*-ova linearna jednačina [11]:

$$\ln Q_e = \ln K_F + n \cdot \ln C_e \quad (2)$$

gde je:

$Q_e$  - ravnotežna koncentracija jona na čvrstoj fazi [mmol/g];

$K_F$ ,  $n$  - parametri *Freundlich*-ove izoterme;  $K_F$  [(mmol<sup>1-n</sup>·dm<sup>3n</sup>/g)], parametar  $n$  nema jedinicu;

$C_e$  - ravnotežna koncentracija jona u tečnoj fazi [mmol/L].

Na osnovu dobijenih rezultata određuju se konstante u jednačinama (1) i (2) sorpcionih izoterme za *Langmuir*-ov i *Freundlich*-ov model (tabela 1). Primenom ANOVA testa računaju se koeficijenti određenosti, gde  $R^2 > 0,9$  znači da se određeni model dobro slaže sa eksperimentalnim podacima.

**Tabela 1. Konstante za Langmuir-ov i Freundlich-ov model izoterme za Sr(II) jon.**

<i>Langmuir</i> -ov model			
	$q_m$	$K_L$	$R^2$
B1	0,0249	0,2392	0,2530
B2	NP*	NP*	0,0112
B3	0,0699	0,0487	0,2388
<i>Freundlich</i> -ov model			
	$n$	$K_F$	$R^2$
B1	0,3570	0,0060	0,6366
B2	0,4286	0,0061	0,3624
B3	0,4779	0,0044	0,5079

\*NP - nije primenljivo

Kako se iz tabele 1 vidi, koeficijenti određenosti imaju vrednosti  $R^2 < 0,9$ , te ni jedan navedeni model ne može dovoljno precizno da opiše proces sorpcije na datim uzorcima. Takođe, najniže vrednosti za  $K_F$  u *Freundlich*-ovom modelu dobijene su upravo za Sr(II) jon, što je u saglasnosti sa njegovim relativno niskim sorpcionim kapacitetima. Sorpcija Sr(II) jona na uzorcima otpadne opeke može najbolje da se opiše linearnim modelom izoterme (tabela 2), prema jednačini (3):

$$Q_s = k \cdot C_s \quad (3)$$

gde je  $Q_s$  koncentracija jona sorbovanih na čvrstoj fazi,  $C_s$  rezidualna koncentracija u tečnoj fazi, a  $k$  nagib prave (koeficijent pravca prave).

**Tabela 2. Proces sorpcije Sr(II) jona na uzorcima opeke opisan linearnim izotermama.**

Uzorak	$k(L/g)$	$R^2$
B1	0,00287	0,9265
B2	0,00633	0,9230
B3	0,00276	0,9353

#### 4. Zaključak

Ispitivanje sorpcije Sr(II) na uzorcima otpadne opeke, pokazalo je da ispitani čvrsti matriksi ne pokazuju zadovoljavajući sorpcioni kapacitet u oblasti koncentracija vodenih rastvora jona od  $5 \cdot 10^{-4}$  do  $3 \cdot 10^{-3}$  mol/L. Međutim, kako sorpcija Sr(II) jona na uzorcima otpadne opeke pokazuje skoro linearnu zavisnost, sledi da će se sorpcioni kapacitet ovih otpadnih materijala povećavati sa porastom koncentracije primenjenog jona.

#### 5. Zahvalnica

Istraživanje predstavljeno u ovom radu urađeno je uz finansijsku podršku Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije, u okviru finansiranja naučno istraživačkog rada Univerziteta u Beogradu, Institut za nuklearne nauke Vinča (Ugovor br.451-03-9/2021-14/200017).

#### 6. Literatura

- [1] M. El-Gohary, M. Al-Naddaf. Characterization of bricks used in the external casing of Roman bath walls “Gadara-Jordan”. *Mediterr. Archaeol. Archaeom.* 9, 2009, 29–46.
- [2] O. Zimbili, W. Salim, M. Ndambuki. A Review on the Usage of Ceramic Wastes in Concrete Production. *Inter. J. Civil Architect. Structur. Construct. Engineer.* 8 (1), 2014, 91–95.
- [3] M. Ahmaruzzaman. Industrial wastes as low-cost potential adsorbents for the treatment of wastewater laden with heavy metals. *Adv. Colloid Interface Sci.* 166, 2011, 36–59.
- [4] I. Jelic, M. Sljivic-Ivanovic, S. Dimovic, D. Antonijevic, M. Jovic, R. Serovic, I. Smiciklas. Utilization of Waste Ceramic and Roof Tiles for Radionuclide Sorption. *Process Saf. Environ. Prot.* 105, 2016, 348–360.
- [5] I. Jelic, M. Sljivic-Ivanovic, S. Dimovic, D. Antonijevic, M. Jovic, M. Mirkovic, I. Smiciklas. The Applicability of Construction and Demolition Waste Components for Radionuclide Sorption. *J. Clean. Prod.* 171, 2018, 322–332.

- [6] M. Sljivic-Ivanovic, I. Jelic, S. Dimovic, D. Antonijevic, M. Jovic, A. Mrakovic, I. Smiciklas. Exploring innovative solutions for aged concrete utilization: treatment of liquid radioactive waste. *Clean Technol. Environ. Policy* 20 (6), 2018, 1343–1354.
- [7] J. Tits, E. Wieland, C. Müller, C. Landesman, M. Bradbury. Strontium binding by calcium silicate hydrates. *J. Colloid Interface Sci.* 300, 2006, 78–87.
- [8] I. Smičiklas, A. Onjia, S. Raičević, Đ. Janačković, M. Mitrić. Factors influencing the removal of divalent cations by hydroxyapatite. *J. Hazard. Mater.* 152, 2008, 876–884.
- [9] Z. Park, W. Sik Shin, S. Choi. Sorptive removal of cobalt, strontium and cesium onto manganese and iron oxide-coated montmorillonite from ground water. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 292, 2012, 837–852.
- [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, *Kapillarchemie*, Akademische Verlagsgesellschaft, Leipzig, Germany, 1909.

**MODELING OF SR(II) ION SORPTION ISOTHERMS ONTO WASTE BRIKS**

**Ivana JELIĆ, Marija ŠLJIVIĆ-IVANOVIĆ, Slavko DIMOVIĆ,  
Mihajlo JOVIĆ and Ivana SMIČIKLAS**

*University of Belgrade, Vinča Institute of Nuclear Sciences - National Institute for the  
Republic of Serbia, Radiation and Environmental Protection Department, Belgrade,  
Serbia, [ivana.jelic@vin.bg.ac.rs](mailto:ivana.jelic@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),  
[mjovic@vin.bg.ac.rs](mailto:mjovic@vin.bg.ac.rs), [ivanat@vin.bg.ac.rs](mailto:ivanat@vin.bg.ac.rs)*

**ABSTRACT**

Investigation of the influence of the initial concentration of Sr(II) ions in an aqueous solution on the sorbed amount enables the definition of sorption isotherms. This paper presents the results of mathematical modeling of isotherms by the Langmuir and Freundlich models, as well as by the linear model. The coefficients of determination ( $R^2$ ) for the Langmuir and Freundlich models were determined by the ANOVA test. The calculated values were less than 0.9, which means that the given models do not agree well with the experimental data. However, the sorption of Sr(II) ions on waste brick samples showed an almost linear dependence, i.e. values of the coefficient of determination greater than 0.9 on a given model.

## MOBILE SYSTEM FOR CONDITIONING OF DISUSED SEALED RADIOACTIVE SOURCES (MSC DSRS)

**Milutin JEVREMOVIĆ, Dalibor ARBUTINA and Nenad MIHAJLOVIĆ**

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

[milutin.jevremovic@nuklearniobjekti.rs](mailto:milutin.jevremovic@nuklearniobjekti.rs), [dalibor.arbutina@nuklearniobjekti.rs](mailto:dalibor.arbutina@nuklearniobjekti.rs),

[nenad.mihajlovic@nuklearniobjekti.rs](mailto:nenad.mihajlovic@nuklearniobjekti.rs)

### ABSTRACT

*Typically, technologies for disused sealed radioactive sources (DSRS) conditioning are deployed either as permanently installed stationary systems in centralized or mobile on-site waste processing facilities, or in a mobile configuration. Centralized stationary facilities provide a single processing location for multiple users that requires transport of the waste to the facility. On the other hand, mobile systems may be provided for the selection and application of the optimum technology for a specific waste stream (such as DSRS) by bringing the process to the point where the waste is generated. In addition, mobile systems could offer additional flexibility by sharing equipment among multiple waste generating sites for processing campaigns. The mobile system for conditioning of DSRS (MSC DSRS) is developed in the Public Company Nuclear Facilities of Serbia. Based on the generic safety assessment and defined technologies and procedures, the acceptance criteria and operational limits and conditions are established. Developed mobile system for conditioning of disused sealed radioactive sources (MSC DSRS) described in the paper could be used in all situations when it is feasible to perform conditioning of DSRS on the spot in the county and worldwide. Development of the mobile unit was just the first step to establish the Reference Center for Radioactive Waste Treatment and Disused Radioactive Sources Conditioning for Small Facilities which can become a regional training center in the future, and/or as a tool for comprehensive national search and secure programmes. In the next phases development of e-learning platforms and blended learning packages as well as application for the IAEA Qualified Technical Centre (QTC) for the management of DSRS is foreseen.*

### 1. Introduction

Sealed radioactive sources (SRS) are being used worldwide in the field of medicine, agriculture, industry and research. They can be found in mobile as well as stationary devices. The Ref. [1] defines an SRS as a “radioactive source in which the radioactive material is (a) permanently sealed in a capsule or (b) closely bonded and in a solid form”. The capsule or material of an SRS should be strong enough to maintain leak tightness under the conditions of use and purpose for which the source was designed, also in case of accidents. In this case only emitted radiation is utilized. Firstly, the hazard from external radiation has to be considered, but the possibility of contamination due to fracture of the capsule should not be disregarded. The radioactive sources are composed of the radiating isotope contained in the filling medium, the single or double isotope holder that partially or totally surrounds the filling medium, the outer cover that contains the parts mentioned above and the capsule closed airtightly by welding or using some other method. The capsule must be tested for leakage periodically. If the SRS is no longer needed (e.g. replaced by a different technique) or it becomes useless for the intended application (e.g. the activity becomes too weak, the equipment containing the source works poorly or becomes obsolete, the source is damaged or

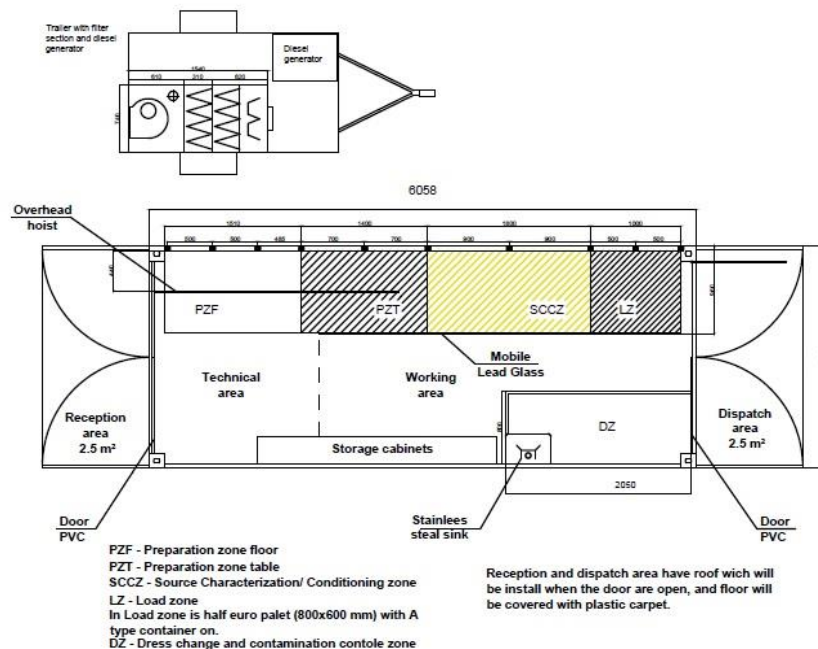


leaking) it is considered disused. Disused sealed radioactive sources (DSRS) are typically conditioned and disposed if a facility is available. If the disposal option is not available, conditioned DSRS should be stored under proper conditions. In some cases, the radionuclide(s) in DSRS can be recovered/recycled or the DSRS can be repurposed for other applications. Conditioning of DSRS ensures containment of the radioactive material, provides confinement for leaking sources, provides sufficient radiation shielding, reduces storage/disposal volume by allowing consolidation of multiple sources into a single storage/disposal container, facilitates transport operations and contributes to safety and security as well [2]. Typically, conditioning technologies are deployed either as permanently installed stationary systems in centralized or mobile on-site waste processing facilities, or in a mobile configuration. Centralized stationary facilities provide a single processing location for multiple users that requires transport of the waste to the facility. On the other hand, mobile systems may be provided for the selection and application of the optimum technology for a specific waste stream (such as DSRS) by bringing the process to the point where the waste is generated. In addition, mobile systems could offer additional flexibility by sharing equipment among multiple waste generating sites for processing campaigns that vary in duration, from very short periods to several years. The term ‘mobile processing system’ refers to any radioactive waste processing system or component which is designed to be transportable and which is not considered permanently installed [3, 4]. The mobile system for conditioning of disused sealed radioactive sources (MSC DSRS) is developed in the Public Company Nuclear Facilities of Serbia. Development of the mobile systems was supported by SRB9005 national project via Technical Cooperation of the International Atomic Energy Agency (IAEA). The mobile system, built inside the 20 feet ISO container, will be used for conditioning of DSRS category 3 to 5. The basic idea was (i) to establish additional workplace for conditioning of DSRS and dismantling of ISD (extension of Waste Processing Facility), (ii) to build something flexible and movable for training of operators and conditioning of DSRS, (iii) to perform DSRS conditioning in other countries (by renting or selling), (iv) to be in the line with very limited budget. During the development the mobile system, operational procedure and generic safety assessment was established in parallel with construction works and installation. Based on safety assessment, the acceptance criteria and operational limits and conditions are established. Operational procedures include: (a) equipment and material requirements, (b) assembling procedure of the mobile unit, (c) procedure for acceptance of devices for dismantling and conditioning, (d) dismantling procedure for devices to recover the DSRS, (e) characterization of DSRS, (f) encapsulation procedure of DSRS, (g) disassembling procedure of the mobile unit, and (h) keeping records, identification and traceability. In addition, radiation safety, health safety, security and emergency preparedness plans are prepared. The generic safety assessment and operational procedures could be updated with site specific requirements, DSRS inventory, and different needs for radioactive waste generators or future customers.

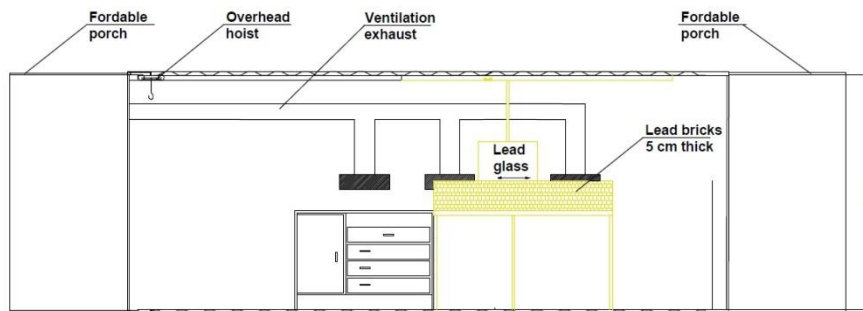
### **2. Designing and installation of the MSC DSRS**

The mobile system for conditioning of disused sealed radioactive sources (MSC DSRS) consists of custom-designed and standard items and devices that are installed in 20 feet long ISO container. The container used for the MSC DSS is provided with doors at both ends of the container (it is a “double-door container”). The insides of the container are covered with stainless steel plates, smooth and easy-to-clean material, at the walls and

the ceiling. The panels are fixed on a supporting steel structure remaining independent from the 20 feet container body. The reason of this “box in box” solution is that the 20 feet container will be provided with a shipping license allowing international transportation subject to full integrity of the container body. To ensure such full integrity neither welds nor bolt or rivets can be fixed onto/into the container body. Everything inside the container is fixed to/installed on the supporting structure. For providing comfortable working condition, the container is provided with heat insulation using fibre glass panels. The layout (with the arrangements of working spaces) and longitudinal section of the MSC DSRS are shown in Figures 1 and 2, respectively. The MSC DSRS is divided to four main areas: (i) Reception area, (ii) Technical area, (iii) Working area, and (iv) Dispatch area. Total surface of areas where the mobile system is enabled to be in operational mode is about 20.2 m<sup>2</sup> (8.4 × 2.4 m). In accordance with organization of the elements, available working space and defined activity during the management of DSRS a mobile team for conditioning of DSRS in the MSC DSRS consist of a team leader, radiation protection officer (RPO), and 1 or 2 operators.



**Figure 1. Arrangements of working spaces in the MSC DSRS.**



**Figure 2. Longitudinal section of the MSC DSRS.**

Reception and dispatch areas will be used for receiving of incoming items (source batches, devices, gauges, containers, etc.) and dispatching of storage packages with conditioned DSRS. These areas exist only in operational mode only when doors are opened. Apart from the tools and equipment used in the mobile system during operations, some additional equipment, belonging to the mobile system and to be used outside and around the mobile system, will be also transported inside the container. Therefore, the mobile system shall provide proper and safe location for the items during transport. For this purpose, there are dedicated area at entrance of the container called technical area where such items can be placed and fixed during transportation. Also, technical area is the location where the operators will prepare the incoming items (radioactive gauges, containers etc.) before source removal. Working area is area where the work involving radioactive material will be carried out. Operators will work there using protective equipment. This area incorporates a dedicated (but technically not separated) part called “dress change and contamination control zone”. Operators will enter and leave the working area through this dress change and contamination control area where their overcoats and personal protection devices will be checked for contamination and their gloves and shoe covers will be removed and stored. There will be proper means for hand-washing too. The working area in the mobile system is divided in the following zones (Figure 1): (i) Preparation Zone Table (PZT); (ii) Source Characterization/Conditioning Zone (SCCZ); (iii) Loading Zone (LZ); (iv) Dress change and contamination control zone (DZ).

It is very important to carefully calculate the construction and perform adequate fixing for the container in order to avoid damage during transport. Working table installed in PZT is heavy duty table fixed to the floor of the container. It is mainly fabricated from steel and desktop has covered with a stainless-steel plate. The table is provided with several drawers built in frame. Overhead hoist with loading capacity of 250 kg is installed in PZ, as shown in Fig. 1. The basic element in the Source Characterization/Conditioning Zone is heavy duty bench with all main part made from steel. The lead wall with 50 mm of shielding will be installed between operator and work table. Two tong manipulators with different extensions and 120 mm of the movable lead glass window will be installed onto the lead wall. There is also the possibility of protection with high density polyethylene (HDPE) in case that beta and neutron sources are being manipulated in the SCCZ. Additional items are installed in SCCZ as equipment for gamma rate measurement, identification of the radionuclide and activity estimation, cameras and tablet/notebook with holders for them, tungsten inert gas (TIG) welding station, leak testing equipment (in accordance with Ref. [5]). The loading zone is on right side of the SCCZ. The lead transport container (type A in accordance with Ref. [6]) is placed in this zone. The DZ is equipped with sanitary block with water supplying system. The personnel will manipulate at the mobile system corroded or dirty items that cannot be cleaned in full extend. Moreover, because of the safety requirement at radioactive working areas, the container has adequate sanitary utilities available. Therefore, the container is provided with a sanitary block including wash basin for hand cleaning and connecting items e.g., soap distributor, paper tissue holder etc. The tank and the sink are made of stainless steel. In addition to the ISO container, the car trailer is planned to use for other purposes (field work activities, mobile system for sorting and packaging of radioactive waste, mobile system for smoke detector dismantling or mobile laboratory). The car trailer contains the following elements: (i) Mobile ventilation unit/filter section with fan, and (ii) Diesel generator. Position of the elements

in the trailer is shown in Figures 1. In addition to the diesel generator and the mobile ventilation unit, there is also empty space of the trailer packages where protective equipment and other supplies and tools could be transported. Figure 3 shows some photos taken during the installation of construction elements in the MSC DSRs.



**Figure 3. Installation of the MSC DSRs.**

### 3. Conclusion

Developed mobile systems for conditioning of disused sealed radioactive sources (MSC DSRS) described in the paper could be used in all situations when it is feasible to perform conditioning of DSRS on the spot in the county and worldwide. Development of these mobile units was just the first step to establish the Reference Center for Radioactive Waste Treatment and Disused Radioactive Sources Conditioning for Small Facilities which can become a regional training center in the future, and/or as a tool for comprehensive national search and secure programmes. In the next phases development of e-learning platforms and blended learning packages as well as application for the IAEA Qualified Technical Centre (QTC) for the management of DSRS is foreseen.

### 4. References

- [1] Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards, IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 3, IAEA, Vienna, 2014.
- [2] Handling, Conditioning and Storage of Spent Sealed Radioactive Sources, No. IAEA-TECDOC-1145, IAEA, Vienna, 2000.
- [3] Modular Design of Processing and Storage Facilities for Small Volumes of Low and Intermediate Level Radioactive Waste including Disused Sealed Sources, Nuclear Energy Series No. NW-T-1.4, IAEA, Vienna, 2014.
- [4] Mobile Processing Systems for Radioactive Waste Management, Nuclear Energy Series No. NW-T-1.8, IAEA, Vienna, 2014.
- [5] Radiation Protection - Sealed Radioactive Sources - Leakage Test Methods, No. 9978, ISO, Geneva, 1992.
- [6] Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material, Safety Standards Series No. SSR-6 (Rev. 1), IAEA, Vienna, 2018.

**MOBILNI SISTEM ZA KONDICIONIRANJE ISLUŽENIH ZATVORENIH  
IZVORA JONIZUJUĆIH ZRAČENJA**

**Milutin JEVREMOVIĆ, Dalibor ARBUTINA i Nenad MIHAJLOVIĆ**

*Javno preduzeće Nuklearni objekti Srbije, Beograd, Srbija*

[milutin.jevremovic@nuklearniobjekti.rs](mailto:milutin.jevremovic@nuklearniobjekti.rs), [dalibor.arbutina@nuklearniobjekti.rs](mailto:dalibor.arbutina@nuklearniobjekti.rs),

[nenad.mihajlovic@nuklearniobjekti.rs](mailto:nenad.mihajlovic@nuklearniobjekti.rs)

**SADRŽAJ**

Tehnologije za kondicioniranje isluženih zatvorenih izvora jonizujućih zračenja (IZIJZ) se obično razvijaju kao stacionarne instalacije u centralizovanim ili mobilnim postrojenjima za obradu radioaktivnog otpada, ili kao potpuno posebna mobilna konfiguracija. Centralizovani stacionarni sistem obezbeđuje jedinstvenu lokaciju za obradu radioaktivnog otpada poreklom od različitih generatora što zahteva transport otpada od lokacije generatora do pogona za obradu. S druge strane, za specifične tokove radioaktivnog otpada, kao što su IZIJZ, mogu se odabrati i koristiti potpuno mobilni sistemi sa optimalnom tehnologijom prilagođenom korisniku, koji podrazumevaju dovođenje procesa obrade do lokacije gde se sam otpad generiše. Dodatno, potpuno mobilni sistemi mogu ponuditi dodatnu fleksibilnost raspodelom opreme za pojedinačne kampanje obrade među više različitih lokacija gde se otpad generiše. U Javnom preduzeću „Nuklearni objekti Srbije” je razvijen mobilni sistem za kondicioniranje IZIJZ. Na osnovu generičke analize sigurnosti i definisane tehnologije i procedura, uspostavljeni su kriterijumi za prijem IZIJZ i pogonski uslovi i ograničenja za proces kondicioniranja u ovom mobilnom sistemu. Razvijeni mobilni sistem za kondicioniranje IZIJZ, opisan u ovom članku, se može koristiti u svim situacijama kada je moguće sprovesti kondicioniranje IZIJZ na licu mesta, na teritoriji Republike Srbije ili u inostranstvu. Razvoj ove mobilne jedinice je samo prvi korak u uspostavljanju Referentnog centra za obradu radioaktivnog otpada i kondicioniranje IZIJZ za „male” korisnike, koji bi u budućnosti mogao postati regionalni centar za obuku i/ili dodatno služiti kao tehnički alat za sveobuhvatni nacionalni program pretrage i obezbeđenja napuštenih izvora zračenja. U sledećim fazama je predviđen i razvoj platformi za e-učenje i paketa kombinovanog treninga i edukacije, kao i prijava za kvalifikovani tehnički centar za upravljanje IZIJZ kod Međunarodne agencije za atomsku energiju.

**РЕГУЛАТИВА, ЕДУКАЦИЈА И  
ЈАВНО ИНФОРМИСАЊЕ**

## MERNA NESIGURNOST GAMA INDEKSA ZA GRAĐEVINSKI MATERIJAL – ZAKONSKA REGULATIVA U PRAKSI

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

*Univerzitet u Beogradu, Institut za nuklearne nauke Vinča, Institut od nacionalnog značaja za Republiku Srbiju, Beograd, Srbija, [jnikolic@vinca.rs](mailto:jnikolic@vinca.rs), [milica100@vinca.rs](mailto:milica100@vinca.rs), [vukanac@vinca.rs](mailto:vukanac@vinca.rs), [beba@vinca.rs](mailto:beba@vinca.rs), [pantelic@vinca.rs](mailto:pantelic@vinca.rs), [natasas@vinca.rs](mailto:natasas@vinca.rs), [marijam@vinca.rs](mailto:marijam@vinca.rs)*

### SADRŽAJ

*Na osnovu člana 15 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 (Sl. glasnik 36/18), da bi se obezbedilo da izlaganje stanovništva zračenju koje potiče od građevinskog materijala ne pređe referentni nivo od 1 mSv godišnje, propisano je određivanje gama indeksa I. Ovaj gama indeks se računa tako što se izmerene koncentracije prirodnih radionuklida  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  i  $^{40}\text{K}$  podele odgovarajućim izvedenim koncentracijama. Zbir ovih količnika ne sme da bude veći od 1. S obzirom na to da se izmerene koncentracije radionuklida definišu sa pripadajućom mernom nesigurnošću, i gama indeks treba da bude iskazan sa svojom pripadajućom mernom nesigurnosti.*

*U ovom radu biće definisana merna nesigurnost gama indeksa I i diskutovano pravilo odlučivanja koje bi trebalo primeniti kako bi se ustanovilo da li ovako određen gama indeks zadovoljava zahteve pomenutog Pravilnika.*

### 1. Uvod

Pravilnikom 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 36/18), propisan je referentni nivo od 1 mSv godišnje za spoljašnje zračenje u zatvorenom prostoru, koje potiče od radionuklida gama emitera iz građevinskog materijala [1]. Da bi ovaj uslov bio ispunjen, potrebno je da koncentracije prirodnih radionuklida  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  i  $^{40}\text{K}$  budu niže od izvedenih koncentracija. Dodatno, provera zadovoljenosti ovog uslova vrši se izračunavanjem gama indeksa I po sledećoj jednačini [1]:

$$I = \frac{A_{Ra}}{300\text{Bq/kg}} + \frac{A_{Th}}{200\text{Bq/kg}} + \frac{A_K}{3000\text{Bq/kg}} \quad (1)$$

gde su  $A_{Ra}$ ,  $A_{Th}$  i  $A_K$ , izmerene koncentracije aktivnosti  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  i  $^{40}\text{K}$  u građevinskom materijalu, a 300 Bq/kg, 200 Bq/kg i 3000 Bq/kg su njihove respektivne izvedene koncentracije. Da bi građevinski materijal zadovoljavao uslov, definisan u Pravilniku, da ne prelazi referentni nivo spoljašnjeg zračenja od 1 mSv godišnje, potrebno je da gama indeks I bude manji od 1.

Očigledno je iz jednačine (1) da se odluka o usklađenosti merenog uzorka sa Pravilnikom procenjuje na osnovu rezultata merenja. Kako svaki rezultat merenja ima pridruženu adekvatnu mernu nesigurnost, i gama indeks I bi trebalo da bude izražen sa



mernom nesigurnošću i na osnovu ovako izraženog rezultata vršiti procenu usklađenosti sa kriterijumom definisanim u Pravilniku.

Takođe, po zahtevu Standarda ISO 17025 [2], u izveštaju o ispitivanju sadržaja radionuklida u uzorku treba da bude definisano pravilo odlučivanja po kojem uzorak jeste ili nije u skladu sa Pravilnikom [1]. U zavisnosti od izbora pravila odlučivanja, merna nesigurnost sa kojom se određuje gama indeks  $I$ , može da bude od presudne važnosti.

U ovom radu biće definisani svi doprinosi mernoj nesigurnosti gama indeksa  $I$  i diskutovano pravilo odlučivanja koje bi trebalo primeniti kako bi se ustanovilo da li ovako određen gama indeks zadovoljava zahteve Pravilnika [1].

### 2. Rezultati i diskusija

Na osnovu jednačine (1) i na osnovu pravila propagacije merne nesigurnosti, može se definisati opšta formula za izračunavanje merne nesigurnosti gama indeksa  $I$  [3].

$$U(I) = \frac{U(A_{Ra})}{300} + \frac{U(A_{Th})}{200} + \frac{U(A_K)}{3000} \quad (2)$$

gde su  $U(A_{Ra})$ ,  $U(A_{Th})$  i  $U(A_K)$  redom apsolutne merne nesigurnosti izmerenih koncentracija aktivnosti  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  i  $^{40}\text{K}$ .

Kako se može uočiti, merna nesigurnost gama indeksa  $I$  se dobija kao prvi izvod funkcije zavisnosti gama indeksa od pojedinačnih koncentracija aktivnosti. Sa druge strane, svaka od izmerenih koncentracija aktivnosti ima svoj budžet merne nesigurnosti.

U ovaj budžet merne nesigurnosti ulaze svi doprinosi veličina koje utiču na merni rezultat i zajedno daju kombinovanu mernu nesigurnost koncentracije aktivnosti za svaki detektovani radionuklid po formuli [3]:

$$U(A_i) = A_i \sqrt{u^2(N) + u^2(\varepsilon) + u^2(M)} \quad (3)$$

gde je  $A_i$  je koncentracija aktivnosti  $i$ -tog radionuklida,  $u(N)$  relativna statistička greška,  $u(\varepsilon)$  je relativna nesigurnost određivanja efikasnosti detekcije (koja se takođe računa kao kombinovana merna nesigurnost, računavajući sve doprinose koji utiču na rezultat merenja prilikom kalibracije detektora), dok je  $u(M)$  relativna merna nesigurnost koja nastaje prilikom pripreme uzoraka za merenje: merenja mase, vremena merenja, homogenosti uzorka itd.

Kombinovana merna nesigurnost se množi brojem 2 da bi se dobila proširena merna nesigurnost na nivou poverenja od 95 %. To praktično znači da je i apsolutna merna nesigurnost gama indeksa  $I$  određena na istom nivou poverenja kao i koncentracije aktivnosti koje ulaze u njen obračun. Dakle, tačna vrednost gama indeksa se nalazi u intervalu  $I \pm 2U(I)$  sa verovatnoćom od 95 %. Na osnovu ovog podatka sada možemo pristupiti ocenjivanju da li je tako određen gama indeks u skladu sa Pravilnikom [1].

Postoji nekoliko načina na koje je moguće oceniti da li rezultat zadovoljava neki određeni kriterijum.

Tačka 7.1.3 ISO 17025 standarda zahteva da, kada je potrebno dati izjavu o usaglašenosti rezultata merenja sa nekim standardom ili propisom (zadovoljava/ne zadovoljava ili u okviru tolerancije/van okvira tolerancije), pravilo odlučivanja mora

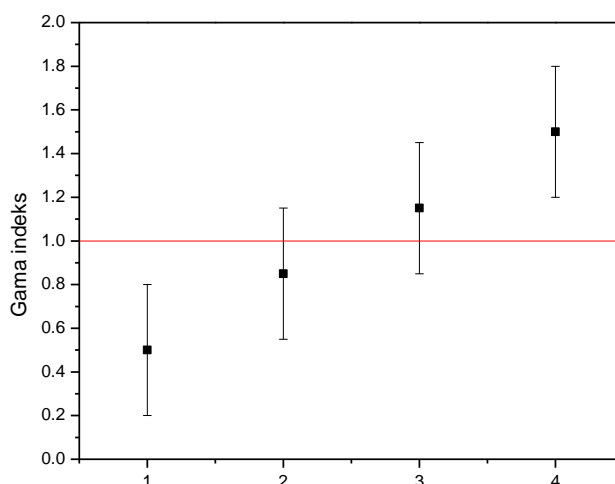
biti jasno definisano. Takođe, ovo pravilo odlučivanja mora biti predočeno i korisniku, koji se sa time mora složiti [2].

U Laboratoriji za zaštitu od zračenja i zaštitu životne sredine primenjuje se dokument ILAC G8:09/2019 Guidelines on Decision Rules and Statements of Conformity [4]. Pravilo odlučivanja koje se koristi je „jednostavno pravilo“. Ako bismo ovo pravilo primenjivali ne obraćajući pažnju na mernu nesigurnost gama indeksa, i ako vrednost merene veličine ima normalnu raspodelu verovatnoće, rizik da je vrednost, koja je ocenjena kao prihvatljiva, zapravo van granica prihvatljivosti (u ovom slučaju  $I > I$ ) je do 50 %. Takođe, isti stepen rizika postoji da se odbaci vrednost koja je zapravo u granicama prihvatljivosti (u ovom slučaju  $I < I$ ) [4].

Ako se u obzir uzme merna nesigurnost, rezultat se tretira kao interval koji treba da se uklopi u propisani kriterijum. Merna nesigurnost postaje tada tzv. „*guard band*“ i rezultat se razmatra sa granicom tolerancije. Ako pretpostavimo opet da merena vrednost ima normalnu distribuciju verovatnoće, prema jednostavnom pravilu odlučivanja, imamo 4 specifična slučaja:

1. Izmerena vrednost i ceo opseg merne nesigurnosti su ispod granice, odnosno  $I < I$ . Rizik da je rezultat “lažno” prihvatljiv je 2,5 %. Zaključak je da je gama indeks u skladu sa zahtevima Pravilnika.
2. Izmerena vrednost je ispod granice ali je deo opsega merne nesigurnosti iznad. Ako je merena vrednost blizu granice prihvatljivosti, rizik da je rezultat “lažno” prihvatljiv može biti do 50 %. Zaključak je da je gama indeks u skladu sa zahtevima Pravilnika.
3. Izmerena vrednost je uznad granice, ali je deo opsega merne nesigurnosti ispod. Ako je merena vrednost blizu granice prihvatljivosti, rizik da je rezultat “lažno” neprihvatljiv može biti do 50 %. Zaključak je da gama indeks nije u skladu sa zahtevima Pravilnika.
4. Izmerena vrednost i ceo opseg merne nesigurnosti su iznad granice, odnosno  $I > I$ . Rizik da je rezultat “lažno” neprihvatljiv je 2,5 %. Zaključak je da gama indeks nije u skladu sa zahtevima Pravilnika.

Grafički prikaz ove četiri mogućnosti dat je na Slici 1. Kao primer, uzete su četiri hipotetičke vrednosti gama indeksa:  $I_1=(0,5 \pm 0,3)$ ,  $I_2=(0,85 \pm 0,30)$ ,  $I_3=(1,15 \pm 0,30)$  i  $I_4=(1,5 \pm 0,3)$ .



**Slika 1. Četiri primera vrednosti gama indeksa  $I$  sa pridruženom mernom nesigurnošću. Prva dva slučaja se ocenjuju kao  $I < 1$ , dok se druga dva ocenjuju kao  $I > 1$ .**

### 3. Zaključak

U ovom radu definisana je merna nesigurnosti gama indeksa  $I$  i diskutovano pravilo odlučivanja koje bi trebalo primeniti kako bi se ustanovilo da li ovako određen gama indeks zadovoljava zahteve Pravilnika [1]. Ukoliko se gama indeks definiše bez pripadajuće merne nesigurnosti, postoji značajan rizik da je vrednost indeksa „lažno“ ocenjena kao iznad ili ispod propisane granice. Ukoliko se pak definiše i izračuna merna nesigurnost gama indeksa i on se zajedno sa tom mernom nesigurnošću ocenjuje, razlikujemo 4 situacije koje su diskutovane i pravilo odlučivanja može biti preciznije definisano. U tom slučaju rizik da se dobijeni gama indeks pogrešno oceni pada na do 2,5 %.

### 4. Zahvalnica

Istraživanje je finansirano od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije na osnovu Aneks ugovora, čiji je evidencioni broj: 451-03-9/2021-14/200017.

### 5. Literatura

- [1] 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. 38/18, 2018.
- [2] ISO/IEC 17025 General requirements for the competence of testing and calibration laboratories, ISO 2017.
- [3] IAEA-TECDOC-1401 Quantifying uncertainty in nuclear analytical measurements IAEA, Vienna, 2004.
- [4] ILAC G8:09/2019 Guidelines on Decision Rules and Statements of Conformity, ILAC, Australia 2019 .

**MEASUREMENT UNCERTAINTY OF GAMMA INDEX FOR BUILDING MATERIALS – APPLICATION OF THE LEGISLATIVE IN PRACTICE**

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

*University of Belgrade, Institute of Nuclear Sciences "Vinča", National Institute of the Republic of Serbia, Radiation and Environmental Protection Department, Mike Petrovića Alasa 12-14, Belgrade, Serbia, [jnikolic@vinca.rs](mailto:jnikolic@vinca.rs), [milical00@vinca.rs](mailto:milical00@vinca.rs), [vukanac@vinca.rs](mailto:vukanac@vinca.rs), [beba@vinca.rs](mailto:beba@vinca.rs), [pantelic@vinca.rs](mailto:pantelic@vinca.rs), [natasas@vinca.rs](mailto:natasas@vinca.rs), [marijam@vinca.rs](mailto:marijam@vinca.rs)*

**ABSTRACT**

Based on the Article 15 of the Rulebook on the limits of the radionuclide content in drinking water, foodstuffs, feedstuffs, medicines, objects of general use, building materials and other goods that are put on market (Official Gazette RS. 36/18), to ensure that the exposure of the general population, originating from the building material do not exceed 1 mSv per year, the calculation of the gamma index  $I$  is required. This index is obtained by dividing measured activity concentrations of naturally occurring radionuclides  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  and  $^{40}\text{K}$  with the appropriate derived concentrations. The sum of these quotients should not exceed 1. Taking into account that the activity concentrations are defined with the appropriate measurement uncertainty, gamma index  $I$  should also be stated with its appropriate measurement uncertainty.

In this paper, the measurement uncertainty of the gamma index  $I$  will be defined and the decision rule for compliance of thus obtained gamma index with the Rulebook 36/18 discussed.

## УСКЛАЂИВАЊЕ НАЦИОНАЛНИХ ПРОПИСА СА ЗАХТЕВИМА ЕВРОПСКЕ УНИЈЕ ЗА МОНИТОРИНГ РАДИОАКТИВНОСТИ У ВОДИ ЗА ПИЋЕ

**Ведрана ВУЛЕТИЋ и Маја ЕРЕМИЋ-САВКОВИЋ**

*Директорат за радијациону и нуклеарну сигурност и безбедност Србије, Београд,  
Србија, [vuletic@srbatom.gov.rs](mailto:vuletic@srbatom.gov.rs), [eremic.savkovic@srbatom.gov.rs](mailto:eremic.savkovic@srbatom.gov.rs)*

### САДРЖАЈ

*Директива Европског савета 2013/51/Euratom утврђује захтеве за заштиту здравља становништва од радиоактивних супстанци у води за пиће. Мониторинг радиоактивности у води за пиће у Србији који се спроводи према Правилнику о утврђивању програма систематског испитивања радиоактивности у животној средини и Правилнику 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 великим делом је у сагласности са захтевима Директиве Европског савета, али је неопходно извршити ревизију домаћих прописа како би се постигла потпуна усклађеност са захтевима Европске уније.*

### 1. Увод

Контрола квалитета воде за пиће, поред испитивања физичких, физичко-хемијских, хемијских, микробиолошких и биолошких параметара обухвата и испитивање садржаја радиоактивних супстанци.

Вода за пиће садржи радионуклиде природног порекла, од којих су најзначајнији уранијум и радијум, као и радон као део уранијумовог низа, а њихова концентрација у води за пиће пре свега зависи од геолошких карактеристика подручја кроз које пролази вода пре саме експлоатације. У води за пиће могу да буду присутни и вештачки радионуклиди, као последица акцидента са испуштањем радиоактивности у животну средину или злонамерног акта. Контрола радиоактивности воде за пиће заснива се одређивању укупне алфа и укупне бета активности и на идентификацији присутних радионуклида и одређивању њихових активности.

Директива Савета 98/83/ЕЗ од 3. новембра 1998. о квалитету воде намењене за људску потрошњу [1] је до измена 2013. године садржавала и параметре који се испитују како би се установила радиолошка исправност воде за пиће. Од 2013. године, захтеви који се односе на садржај радиоактивних супстанци у води за пиће су издвојени у посебан пропис, Директиву Савета 2013/51/Еуратом од 22. октобра 2013. којом се утврђују захтеви за заштиту здравља становништва од радиоактивних супстанци у води намењеној за људску потрошњу [2] јер су параметри који се одређују део обима основних стандарда како је дефинисано чланом 30. Еуратом уговора. Због тога је донет нови пропис који обезбеђује униформност, повезаност и потпуност легислативе у области заштите од зрачења под Еуратом уговором.

Као и друге европске директиве, и ова директива земљама чланицама даје могућност да уведу и строже захтеве у односу на захтеве дате одредбама Директиве, све док такви строжи захтеви не угрожавају слободан проток добара на тржишту Европске уније.

### 2. Захтеви Европске уније за контролу радиоактивности у води за пиће

Директива Савета 2013/51/Еуратом од 22. октобра 2013. којом се утврђују захтеви за заштиту здравља становништва од радиоактивних супстанци у води намењеној за људску потрошњу (Директива 2013/51) донета је да сви прописи којима се уређује област заштите од зрачења буду под Еуратом уговором, једним од оснивачких уговора Европске уније који данас обухвата области повезане са применом нуклеарне енергије и јонизујућег зрачења.

У односу на претходну директиву којом су, између осталих захтева за хигијенску исправност воде за пиће, били дати и захтеви за радиолошке параметре, Директива 2013/51 опширније дефинише захтеве за контролу исправности воде за пиће у односу на садржај радиоактивних супстанци. Овде је потребно нагласити да се Директива 2013/51 не односи на природне минералне воде и воде које се сматрају медицинским производима за које су захтеви за исправност дати у другим прописима.

Контрола радиоактивности воде за пиће, у складу са Директивом 2013/51, заснива се на поређењу резултата испитивања са величинама које се називају параметарске вредности. Међутим, иако директива наводи да је потребно да се прате све три параметарске вредности, концентрација радона у води, концентрација трицијума и индикативна доза, остављена је могућност свакој држави чланици да, уз образложење које мора бити базирано на резултатима испитивања и истраживања, неки од ова три параметра не уврсти у свој програм мониторинга воде за пиће при чему мора показати да је у одређеном дефинисаном временском периоду вредност параметра испод одговарајуће параметарске вредности дате Директивом 2013/51. Параметарске вредности за трицијум, радон и индикативну дозу приказане су у табели 1.

**Табела 1. Параметарске вредности за радон, трицијум и индикативну дозу за воду за пиће.**

Параметар	Параметарска вредност
Радон	100 Вq/l
Трицијум	100 Вq/l
Индикативна доза	0,10 mSv

За праћење индикативне дозе, земљама чланицама које примењују директиву остављена је могућност избора да ли ће индикативну дозу процењивати на основу резултата одређивања специфичних активности једног или неколико радионуклида, при чему се не даје сугестија који радионуклиди да се прате, или на основу резултата одређивања укупне алфа и укупне бета активности.

За процену индикативне дозе на основу специфичних активности појединачних радионуклида користе се вредности изведених концентрација, али како параметарске вредности које укључују и индикативну дозу нису граничне вредности, тако ни изведене концентрације не представљају границе садржаја радионуклида у води за пиће, него вредности изнад којих је потребно спровести даља испитивања да ли је и колико угрожено здравље опште популације те,

уколико јесте, применити адекватне мере за умањење или отклањање узрока прекорачења вредности измерених величина изнад параметарских вредности и евентуалних последица по здравље. Изведене концентрације за појединачне природне и вештачке радионуклиде који се најчешће могу наћи у води за пиће дате у Директиви 2013/51 приказане су у табели 2. Вредности за изведене концентрације израчунате су на основу дозе од 0,1 mSv, просечног годишњег уноса воде од 730 литара и дозног коефицијента за ингестију за дати радионуклид.

**Табела 2. Изведене концентрације појединачних радионуклида у води за пиће.**

	Радионуклид	Изведена концентрација (Bq/l)
Природни радионуклиди	U-238 <sup>1</sup>	3,0
	U-234 <sup>1</sup>	2,8
	Ra-226	0,5
	Ra-228	0,2
	Pb-210	0,2
	Po-210	0,1
Вештачки радионуклиди	C-14	240
	Sr-90	4,9
	Pu-239/Pu-240	0,6
	Am-241	0,7
	Co-60	40
	Cs-134	7,2
	Cs-137	11
	I-131	6,2

<sup>1</sup> Вредности изведених концентрација су добијене на основу радиолошких својстава уранијума, његова хемијска токсичност није узета у обзир.

### 3. Контрола радиоактивности у води за пиће у Србији

Захтеви за контролу радиоактивности у води за пиће у Србији дати су у два правилника у надлежности Директората за радијациону и нуклеарну сигурност и безбедност Србије, у Правилнику о утврђивању програма систематског испитивања радиоактивности у животној средини [3] и у Правилнику 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 [4]. Поред ова два, Правилником о мониторингу радиоактивности [5] дати су захтеви за осетљивост инструмената којима се одређује радиоактивност у води за пиће.

Правилником о утврђивању програма систематског испитивања радиоактивности у животној средини утврђена су места, временски интервали, врсте и начин систематског испитивања радиоактивности у животној средини, укључујући и воду за пиће. Правилник обавезује да се у градовима који имају више од 100.000 становника радиоактивност у води за пиће одређује једном месечно. Контрола радиоактивности у води за пиће подразумева одређивање укупне алфа и укупне бета активности и одређивање садржаја емитера гама зрачења, док се у градовима

који се снабдевају водом за пиће из река које узводно у свом сливу имају нуклеарну електрану одређује и садржај трицијума и стронцијума-90.

Овако дефинисани захтеви су у складу са захтевима Директиве 2013/51 јер иако се директивом захтева или одређивање укупне алфа и укупне бета активности или одређивање активности појединачних радионуклида ради поређења са параметарском вредношћу за индикативну дозу, она не забрањује да се раде обе анализе у узорцима воде за пиће, како прописује домаћа регулатива.

Даље усаглашавање подразумева или укључивање одређивања концентрације радона у програм мониторинга воде за пиће или спровођење испитивања које би показало да је концентрација радона у води за пиће у Србији испод параметарске вредности те да није потребно проширивање програма мониторинга са одређивањем концентрације радона. У ту сврху Директорат је спровео две прелиминарне студије у којима је испитивана концентрација радона у води за пиће на територији Републике Србије. У једној студији [6] у којој је испитивана вода из локалних водоводних мрежа измерене вредности концентрације радона кретале су се у интервалу од 0 до 19 Bq/l, док су другом студијом [7] у којој су биле обухваћене воде са јавних чесама измерене концентрације радона од < 0,67 до 70 Bq/l. Студијом о испитивању вода за пиће са јавних чесама обухваћена је и изворска непрерађена вода са Школске чесме у Нишкој Бањи која је позната као вода са високим садржајем радона. У узорку воде са Школске чесме у Нишкој Бањи измерена концентрација радона је 622 Bq/l. Иако резултати показују да је у свим испитиваним узорцима воде за пиће, осим у узорку са Школске чесме у Нишкој Бањи, концентрација радона испод параметарске вредности за радон од 100 Bq/l, дате у Директиви 2013/51 и Правилнику 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, због малог обима спроведених прелиминарних студија, било би препоручљиво спровести додатна испитивања пре доношења коначне одлуке да ли је оправдано изоставити одређивање концентрације радона у води за пиће из програма мониторинга.

Правилником 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 уведене су одредбе којима се контрола радиоактивности у води за пиће делимично усаглашава са захтевима Директиве 2013/51. Овим правилником су у домаћу легислативу уведени појам параметарске вредности и индикативне дозе. Међутим, за разлику од европског прописа који дефинише параметарске вредности као вредности изнад којих је потребно вршити даља испитивања и процене па тек на основу процена доносити одлуке о даљем поступању, домаћи пропис је оставио вредност изведене концентрације као границу садржаја појединачних радионуклида у води за пиће. При изради нацрта новог подзаконског акта који ће регулисати контролу садржаја радионуклида у производима и другој роби намењеној становништву и чије је доношење планирано у складу са Законом о радијационој и нуклеарној сигурности и безбедности [8] треба узети у обзир захтеве Директиве 2013/51 са којом је Србија у обавези да се усклади, а који изведене концентрације радионуклида не виде као граничне вредности изнад којих вода за пиће није за употребу, али и обавезу усклађивања са другим одредбама ове директиве који захтевају испитивање узрока повећаних вредности испитиваних параметара и



процену утицаја на здравље становништва. За усклађивање одредби које се односе на изведене концентрације са Директивном 2013/51 уместо садашњих одредби које тумаче изведене концентрације као граничне вредности изнад којих се забрањује употреба воде за пиће неопходно је претходно обезбедити испуњавање захтева за испитивање узрока и процену последица промене активности радионуклида у води за пиће, као и примену адекватних мера за заштиту становништва.

За разлику од Директиве 2013/51 која прецизира да се њене одредбе не примењују на контролу радиоактивности у природним минералним водама, национални прописи у Србији који регулишу контролу хигијенске исправности воде за пиће [9] још увек не издвајају природне минералне воде од воде за пиће из система јавног снабдевања што, због често знатно вишег садржаја природних радионуклида у природним минералним водама, може довести до неоправданог ограничења коришћења минералне воде када се она посматра као вода за пиће. Раздвајање тумачења садржаја радиоактивних супстанци у води за пиће од садржаја радиоактивних супстанци у природним минералним водама је још један од неопходних корака ка потпуном усаглашавању домаће регулативе са Директивом 2013/51.

#### 4. Закључак

Одредбе европске Директиве 2013/51 већим делом су пренете у домаћу регулативу, али је за потпуно усклађивање са европским прописима којима се уређује контрола радиоактивности у води за пиће, потребна додатна измена националних прописа. Усаглашавање у правцу препознавања изведених концентрација као податка за израчунавање индикативне дозе уместо садашњег тумачења ових величина као граница садржаја биће дуготрајан и захтеван процес који мора да укључи све заинтересоване стране од предузећа за снабдевање водом, преко стручних лица из установа које врше анализе до органа надлежних за доношење прописа из области хигијенске исправности воде за пиће и радијационе сигурности.

#### 5. Литература

- [1] Council Directive 98/83/EC of 3 November 1998 on the quality of water intended for human consumption, OJ L 330, 5.12.1998, p. 32–54
- [2] Council Directive 2013/51/Euratom of 22 October 2013 laying down requirements for the protection of the health of the general public with regard to radioactive substances in water intended for human consumption, OJ L 296, 7.11.2013, p. 12–21
- [3] Правилник о утврђивању програма систематског испитивања радиоактивности у животној средини, „Службени гласник Републике Србије“, број 100/10, 2010.
- [4] 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, „Службени гласник Републике Србије“, број 36, 2018.
- [5] Правилник о мониторингу радиоактивности, „Службени гласник Републике Србије“, број 97/11, 2011.

- [6] Извештај Одређивање концентрације радона у води за пиће у градовима Републике Србије, ЦДИ доо, Земун, 2016
- [7] Извештај о реализацији Уговора о пружању услуга за прикупљање података о садржају радона у пијаћој води, Универзитет у Новом Саду, Природно-математички факултет, Нови Сад, 2017.
- [8] Закон о радијационој и нуклеарној сигурности и безбедности, „Службени гласник Републике Србије“, број 95/18 и 10/19, 2019
- [9] Правилник о хигијенској исправности воде за пиће, „Службени лист СРЈ“, број 42/98 и 44/99 и „Службени гласник Републике Србије“, број 28/2019, 2019

**HARMONIZATION OF NATIONAL REGULATIONS WITH THE  
REQUIREMENTS OF THE EUROPEAN UNION FOR MONITORING OF  
RADIOACTIVITY IN DRINKING WATER**

**Vedrana VULETIĆ and Maja EREMIĆ-SAVKOVIĆ**

*Serbian Radiation and Nuclear Safety and Security Directorate, Belgrade, Serbia,  
[vuletic@srbatom.gov.rs](mailto:vuletic@srbatom.gov.rs), [eremic.savkovic@srbatom.gov.rs](mailto:eremic.savkovic@srbatom.gov.rs)*

**ABSTRACT**

European Council Directive 2013/51/Euratom sets requirements for the protection of public health against radioactive substances in drinking water. Monitoring of radioactivity in drinking water in Serbia carried out according to the Rulebook for Establishing Programme of Systematic Environmental Radioactivity Examination and the Rulebook on limits of radionuclide content in drinking water, food, animal feed, medicines, general purpose items, construction materials and other goods which is placed on the market is largely in line with the requirements of the European Council Directive, but it is necessary to revise national regulations in order to achieve full compliance with the requirements of the European Union.

A NEW EUROPEAN RADIATION PROTECTION NETWORK DEVELOPED  
BY THE SUPPORT BSS JOINT NETWORK PROJECT

Miloš ŽIVANOVIĆ<sup>1</sup>, Annette RÖTTGER<sup>2</sup>, Attila VERES<sup>3</sup>, Vladimir SOCHOR<sup>4</sup>,  
Massimo PINTO<sup>5</sup>, Michal DERLACINSKI<sup>6</sup>, Mihail-Razvan IOAN<sup>7</sup>,  
Amra ŠABETA<sup>8</sup>, Robert BERNAT<sup>9</sup>, Christelle ADAM-GUILLERMIN<sup>10</sup>,  
João ALVES<sup>11</sup>, Denis GLAVIČ-CINDRO<sup>12</sup>, Steven BELL<sup>13</sup>, Britt WENS<sup>14</sup>,  
Linda PERSSON<sup>15</sup>, Reetta NYLUND<sup>16</sup>, Nikola KRŽANOVIĆ<sup>1</sup>,  
Srboljub STANKOVIĆ<sup>1</sup> and Slavko DIMOVIĆ<sup>1</sup>

- 1) „VINČA” Institute of Nuclear Sciences - National Institute of the Republic of Serbia, University of Belgrade, Belgrade, Serbia, [milosz@vinca.rs](mailto:milosz@vinca.rs), [krzanovic@vinca.rs](mailto:krzanovic@vinca.rs), [srbas@vinca.rs](mailto:srbas@vinca.rs), [sdimovic@vinca.rs](mailto:sdimovic@vinca.rs)
- 2) Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig, Nemačka, [Annette.Roettger@ptb.de](mailto:Annette.Roettger@ptb.de)
- 3) Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives, Francuska, [attila.veres@cea.fr](mailto:attila.veres@cea.fr)
- 4) Cesky Metrologický Institut, Česká republika, [vsochor@cmi.cz](mailto:vsochor@cmi.cz)
- 5) Agenzia Nazionale per le Nuove Tecnologie, l'Energia e lo Sviluppo Economico Sostenibile, Istituto Nazionale di Metrologia delle Radiazioni Ionizzanti, Italija, [massimo.pinto@enea.it](mailto:massimo.pinto@enea.it)
- 6) Główny Urząd Miar, Poljska, [michal.derlacinski@gum.gov.pl](mailto:michal.derlacinski@gum.gov.pl)
- 7) Institutul National de Cercetare-Dezvoltare pentru Fizica si Inginerie Nucleara "Horia Hulubei", Rumunija, [razvan.ioan@nipne.ro](mailto:razvan.ioan@nipne.ro)
- 8) Institut za mjeriteljstvo Bosne i Hercegovine, Bosna i Hercegovina, [amra.sabeta@met.gov.ba](mailto:amra.sabeta@met.gov.ba)
- 9) Institut Ruđer Bošković, Hrvatska, [rbernat@irb.hr](mailto:rbernat@irb.hr)
- 10) Institut de Radioprotection et de Sureté Nucléaire, Francuska, [christelle.adam-guillermin@irsn.fr](mailto:christelle.adam-guillermin@irsn.fr)
- 11) Instituto Superior Técnico, LPSR-LMRI, Portugal, [jgalves@ctn.tecnico.ulisboa.pt](mailto:jgalves@ctn.tecnico.ulisboa.pt)
- 12) Jožef Stefan Institute, Slovenija, [denis.cindro@ijs.si](mailto:denis.cindro@ijs.si)
- 13) National Physical Laboratory, Ujedinjeno kraljevstvo Velike Britanije i Severne Irske, [steven.bell@npl.co.uk](mailto:steven.bell@npl.co.uk)
- 14) SCK CEN, Belgian Nuclear Research Centre, Belgija, [britt.wens@sckcen.be](mailto:britt.wens@sckcen.be)
- 15) Swedish Radiation Safety Authority, Švedska, [linda.persson@ssm.se](mailto:linda.persson@ssm.se)
- 16) STUK – Radiation and Nuclear Safety Authority, Finska, [reetta.nylund@stuk.fi](mailto:reetta.nylund@stuk.fi)

ABSTRACT

European Metrology Networks are organized under the umbrella of EURAMET in order to improve Europe's metrology capabilities based on the high-quality research and metrology service. One of the proposed European Metrology Networks is currently prepared by the EMPIR 19NET03 supportBSS Joint Network Project to address the needs in metrology for radiation protection and radiation protection regulation. The new network EMN for Radiation Protection (short name: RadiationProtect) that was approved by EURAMET in the General Assembly 2021 aims to improve communication between regulatory bodies, metrology institutes, and their stakeholders, promote smart specialization of calibration laboratories, establish a knowledge sharing program, and create roadmaps for future research priorities in the field of radiation protection metrology.

## 1. Introduction

National Metrology Institutes (NMI) and Designated Institutes (DI) in Europe have a long tradition of cooperation in EURAMET, within Technical Committees and metrology research programmes. In 2017, a workshop attended by NMIs and DIs was held to explore possibilities for further collaboration. As a consequence of the workshop, there was a consensus on the need to create new European Metrology Networks (EMN) that would deal with the topics and problems not covered by the existing bodies and organizations. The role of the EMNs is to deal with the wider problems that are not easily addressed by single metrology institutes. The problems will be identified by assessing European and Global metrology needs, and addressed in a coordinated manner by creating common strategies for research, infrastructure, knowledge transfer and development of services. The EMNs will also provide a single point of contact for metrology institutes and their stakeholders. Because of this, EMNs will help Europe to maintain world-leading metrology capabilities, in the time of rapidly changing technology, which causes the constant need to develop new and update existing metrology services. In general, three types of EMNs will be founded: scientific EMNs, with focus on leadership and scientific excellence, EMNs for societal challenges, with goal to underpin standardization and regulation, and EMNs for infrastructure and services, with focus on raising overall level of metrology capability and quality of service in Europe [1].

At the EURAMET General Assembly in 2018, six metrology networks were approved. As of July 2021, a total of nine EMNs were approved, some of them are already operational, and some of them are still forming.

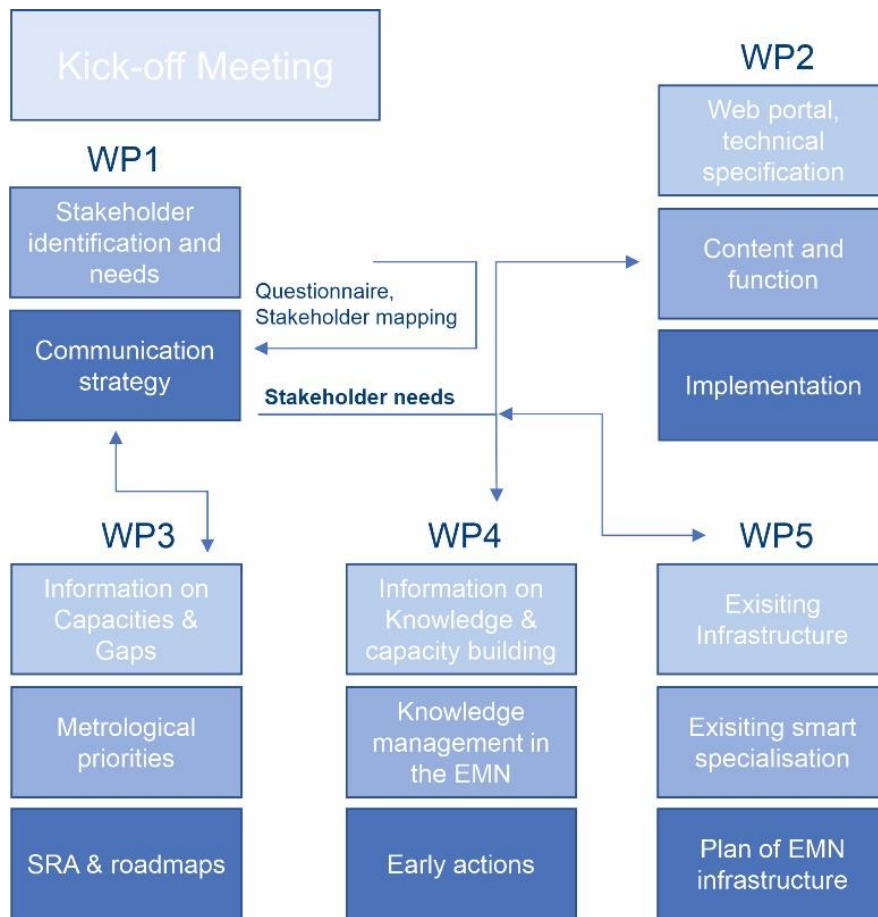
In this paper, a new EMN addressing the needs in metrology for radiation protection and radiation protection regulation will be presented, together with the EMPIR 19NET03 supportBSS Joint Network Project (JNP), which was created to support the forming of the network.

## 2. Supporting the development of the EMN for Radiation Protection: The role of JNP EMPIR 19NET03 supportBSS

In 2014, the new EURATOM directive was published laying down the basic safety standards for protection against the dangers arising from exposure to ionising radiation [2]. The new directive was developed to better protect the citizens, partially as a consequence of the Fukushima accident. The new directive is more comprehensive, covering occupational, medical, public and environmental risks. Due to the broader scope of the directive, new digitalization trends, the fast development of technology, including new modalities in medicine, as well as the increasing needs for measurements in pulsed fields, it is not possible for one institution or one country to address all the future research, calibration and measurement needs. Because of this, a JNP was proposed in 2019 in order to support the creation of an EMN dealing with radiation protection. The network would help with future defining of Strategic Research Agendas (SRA), smart specialization and would facilitate the dialogue between the NMIs and DIs and stakeholders. The network will also involve regulators as stakeholders and provide feedback to regulators from metrology community.

The project was selected for funding and started in June 2020. The project involves NMIs and DIs for ionizing radiation from 16 European countries and will last for four years. The project is organized in 6 work packages (WP), with WP6 dealing with

creating impact and WP7 dealing with administration, see Fig. 1. It is important to note that the stakeholder needs are driving this development.



**Fig.1 The work packages in EMPIR 19NET03 supportBSS. The figure describes the route for the implementation of the EMN for Radiation Protection. The stakeholder needs are central for all work packages**

The goal of WP1 is to establish regular, constructive dialogue and liaison between the project and stakeholders of radiation protection regulation. The stakeholders include regulatory bodies and standards development bodies on one side, and manufacturers, technical services and users of radiation sources on the other side. International organizations dealing with radiation protection, such as HERCA, EURADOS and IAEA are also important stakeholders.

The goal of WP2 is to develop a web-based portal for radiation protection regulation stakeholders. This platform will be developed by the project partners with consideration to the feedback from the stakeholders identified during the project. The web-platform will provide easy access to information regarding the regulatory requirements and metrology capabilities, and will also facilitate the networking between metrology institutes and stakeholders.

WP3 is dealing with the future research and development of metrology capabilities. New EURATOM directive requires establishment of new and improved services. For example, some limits have been significantly reduced, such as the dose limit for the eye lens or the radon activity concentration. These changes require significantly improved

metrology capabilities, which require additional research. In this work package, SRA will be developed, as well as two roadmaps for the metrology needs of the Council Directive (EU-BSS) and the EURATOM treaty.

The goal of WP4 is to improve the knowledge transfer within the metrology community and between the metrology community and stakeholders. This WP will identify the needs for knowledge sharing among the stakeholders, identify the existing opportunities, identify the gaps and finally improve the knowledge sharing by promoting and organizing the activities, such as the exchange of researchers between organizations, metrology workshops, training courses and interlaboratory comparisons.

Finally, WP5 is dealing with European metrology infrastructure underpinning radiation protection regulation. Among other activities, this WP will support smart specialization and promote the development of emerging member states.

### **3. Current progress**

Several activities have already been completed within the project. A virtual workshop was organized in September in order to identify and discuss the gaps in radiation protection metrology. In October 2020, a CCRI (Consultative Committee for Ionizing Radiation) webinar was held on the topic of Metrology for Radiation Protection, and is available on YouTube [3]. Almost 100 stakeholders were identified until now and a stakeholder committee was created in 2021. Several activities concerning the stakeholders have been conducted, such as stakeholder mapping workshops, preparing stakeholder involvement plan or developing communication strategy, in order to improve the engagement of the stakeholders and to improve the impact of the network. A virtual presentation about the project and the future EMN was held at EGU21 conference in April 2021 [4].

Proposal to form EMN RadiationProtect was submitted to EURAMET and it was accepted at the EURAMET General Assembly in June 2021. The network kick-off meeting will be scheduled for the autumn.

Several activities in other WPs are also ongoing, such as identification of the existing training opportunities and overview of regulations. These preparatory activities will provide inputs for the future work in the project and the network.

### **4. Significance of EMN RadiationProtect in Serbia**

Serbia is currently in the process of accession to the European Union. Currently, Serbian legislation is not harmonized with the European Union. The harmonization will occur during the accession in 34 “chapters”, with only 2 of them closed until July 2021. Several of the remaining chapters will deal with radiation protection, among other topics. The most important are Chapter 27 “Environment” and Chapter 28 “Consumer and health protection”. During this process, new laws and bylaws will need to be prepared and adopted, and stakeholders from Serbia will need to comply with the new regulations. The EMN RadiationProtect will be able to offer critical help in this process. Knowledge transfer from the partners from European Union will help during the development phase of new laws and bylaws, but will also help the stakeholders to implement them in their own institutions.

### **5. Conclusion**

European Metrology Networks provide an important platform that helps members and stakeholders to achieve and maintain scientific excellence, to answer to societal

challenges, and to develop and optimize metrology infrastructure. EMN RadiationProtect is a new network that will deal with issues related to radiation protection and radiation protection regulation. The network is supported by JNP EMPIR 19NET03 supportBSS with 16 NMIs and DIs from different European countries and the network kick off meeting will be held in autumn. Besides the significance of the network for the EU countries, the network will have global importance and will address global radiation protection metrology challenges. This network is especially important for countries aspiring to become EU members, due to the know-how already present in the network founding institutions.

### 6. Acknowledgement

19NET03 supportBSS 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. 19NET03 supportBSS denotes the EMPIR Joint Network Project reference. The partners of the project received support from BIPM, IAEA, EURADOS e.V., BfS and PHE so far. It is foreseen that EURADOS e.V., BfS and PHE will join the EMN as partners. They were included as authors to the proposal for the GA of EURAMET in 2021 and intend to sign the memorandum of understanding as well as all supportBSS partners, which are represented here as co-authors of this paper.

### 7. Literature

- [1] Euramet, <https://www.euramet.org/european-metrology-networks/>, accessed on 8 July 2021
- [2] 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.
- [3] CCRI Webinar: “Metrology for Radiation Protection”, <https://www.youtube.com/watch?v=V2B77LyY62I>, accessed on 8 July 2021
- [4] Annette Röttger, Attila Veres, Vladimir Sochor, Massimo Pinto, Michal Derlacinski, Mihail-Razvan Ioan, Amra Sabeta, Robert Bernat, Christelle Adam-Guillermin, João Henrique Gracia Alves, Denis Glavic-Cindro, Steven Bell, Britt Wens, Linda Persson, Miloš Živanović, and Reetta Nylund, Metrology for radiation protection: A new European network in the foundation phase, vEGU21: Gather Online (#vEGU21), 2021, Virtual conference, 19-30 April 2021, EGU21-82



### NOVA EVROPSKA MREŽA IZ OBLASTI ZAŠTITE OD ZRAČENJA RAZVIJENA U OKVIRU SUPPORTBSS JOINT NETWORK PROJECT

Miloš ŽIVANOVIĆ<sup>1</sup>, Annette RÖTTGER<sup>2</sup>, Attila VERES<sup>3</sup>, Vladimir SOCHOR<sup>4</sup>,  
Massimo PINTO<sup>5</sup>, Michal DERLACINSKI<sup>6</sup>, Mihail-Razvan IOAN<sup>7</sup>,  
Amra ŠABETA<sup>8</sup>, Robert BERNAT<sup>9</sup>, Christelle ADAM-GUILLERMIN<sup>10</sup>,  
João ALVES<sup>11</sup>, Denis GLAVIČ-CINDRO<sup>12</sup>, Steven BELL<sup>13</sup>, Britt WENS<sup>14</sup>,  
Linda PERSSON<sup>15</sup>, Reetta NYLUND<sup>16</sup>, Nikola KRŽANOVIĆ<sup>1</sup>,  
Srboљub STANKOVIĆ<sup>1</sup> i Slavko DIMOVIĆ<sup>1</sup>

- 1) Institut za nuklearne nauke Vinča" - Institut od nacionalnog značaja za Republiku Srbiju, Univerzitet u Beogradu, Beograd, Srbija, [milosz@vinca.rs](mailto:milosz@vinca.rs), [krzanovic@vinca.rs](mailto:krzanovic@vinca.rs), [srbas@vinca.rs](mailto:srbas@vinca.rs), [sdimovic@vinca.rs](mailto:sdimovic@vinca.rs)
- 2) Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig, Nemačka, [Annette.Roettger@ptb.de](mailto:Annette.Roettger@ptb.de)
- 3) Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives, Francuska, [attila.veres@cea.fr](mailto:attila.veres@cea.fr)
- 4) Cesky Metrologicky Institut, Češka republika, [vsochor@cmi.cz](mailto:vsochor@cmi.cz)
- 5) Agenzia Nazionale per le Nuove Tecnologie, l'Energia e lo Sviluppo Economico Sostenibile, Istituto Nazionale di Metrologia delle Radiazioni Ionizzanti, Italija, [massimo.pinto@enea.it](mailto:massimo.pinto@enea.it)
- 6) Główny Urząd Miar, Poljska, [michal.derlacinski@gum.gov.pl](mailto:michal.derlacinski@gum.gov.pl)
- 7) Institutul National de Cercetare-Dezvoltare pentru Fizica si Inginerie Nucleara "Horia Hulubei", Rumunija, [razvan.ioan@nipne.ro](mailto:razvan.ioan@nipne.ro)
- 8) Institut za mjeriteljstvo Bosne i Hercegovine, Bosna i Hercegovina, [amra.sabeta@met.gov.ba](mailto:amra.sabeta@met.gov.ba)
- 9) Institut Ruđer Bošković, Hrvatska, [rbernat@irb.hr](mailto:rbernat@irb.hr)
- 10) Institut de Radioprotection et de Sureté Nucléaire, Francuska, [christelle.adam-guillermin@irsn.fr](mailto:christelle.adam-guillermin@irsn.fr)
- 11) Instituto Superior Técnico, LPSR-LMRI, Portugal, [jgalves@ctn.tecnico.ulisboa.pt](mailto:jgalves@ctn.tecnico.ulisboa.pt)
- 12) Jožef Stefan Institute, Slovenija, [denis.cindro@ijs.si](mailto:denis.cindro@ijs.si)
- 13) National Physical Laboratory, Ujedinjeno kraljevstvo Velike Britanije i Severne Irske, [steven.bell@npl.co.uk](mailto:steven.bell@npl.co.uk)
- 14) SCK CEN, Belgian Nuclear Research Centre, Belgija, [britt.wens@sckcen.be](mailto:britt.wens@sckcen.be)
- 15) Swedish Radiation Safety Authority, Švedska, [linda.persson@ssm.se](mailto:linda.persson@ssm.se)
- 16) STUK – Radiation and Nuclear Safety Authority, Finska, [reetta.nylund@stuk.fi](mailto:reetta.nylund@stuk.fi)

#### SADRŽAJ

Evropske metrološke mreže su organizovane pod okriljem EURAMET u cilju poboljšanja evropskih metroloških kapaciteta na osnovu visoko kvalitetnih istraživanja i metroloških servisa. Jedna od predloženih mreža je trenutno u pripremi u okviru međunarodnog projekta EMPIR 19NET03 supportBSS, sa ciljem da se zadovolje potrebe u okviru metrološke zajednice vezane za zaštitu od zračenja i regulativu u oblasti zaštite od zračenja. Nova mreža IRProtect je odobrena na generalnoj skupštini EURAMET u 2021. godini, i po uspostavljanju će težiti da poboljša komunikaciju između regulatornih tela, metroloških instituta i njihovih stejkholdera, zatim da promovise "pametnu" specijalizaciju laboratorija za etaloniranje, uspostavi program razmene znanja i napravi mape puta sa budućim naučnim i razvojnim prioritetima u oblasti metrologije u zaštiti od zračenja.

**REGULATIVA, PREPORUKE I MOGUĆNOSTI SARADNJE U OBLASTI  
RADIJACIONE I NUKLEARNE BEZBEDNOSTI**

**Mirjana RADENKOVIĆ<sup>1</sup>, Stefan RAFAJLOVIĆ<sup>2</sup>,  
Dušan TOPALOVIĆ<sup>1</sup> i Jasminka JOKSIĆ<sup>3</sup>**

- 1) Univerzitet u Beogradu, Institut za nuklearne nauke Vinča, Institut od nacionalnog značaja za Republiku Srbiju, Beograd, Srbija, [mirar@vinca.rs](mailto:mirar@vinca.rs),  
[dusan.topalovic@vinca.rs](mailto:dusan.topalovic@vinca.rs)
- 2) Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, Beograd, Srbija,  
[srafajlovic@gmail.com](mailto:srafajlovic@gmail.com)
- 3) Direktorat za radijacionu i nuklearnu sigurnost i bezbednost Srbije; Beograd, Srbija, [joksic@srbatom.gov.rs](mailto:joksic@srbatom.gov.rs)

**SADRŽAJ**

*U radu je dat prikaz nacionalne regulative, međunarodnih preporuka i obavezujućih dokumenta u oblasti radijacione i nuklearne bezbednosti. Navedene su odabrane publikacije MAAE sa standardima i preporukama na kojima se zasniva i evropska regulativa u ovoj oblasti, kao vodič pri razvoju ili reviziji nacionalne regulative. Poseban akcenat je stavljen na mogućnosti saradnje pri izgradnji i unapređivanju nacionalnog režima nuklearne bezbednosti ili pojedinih njegovih komponenti. Istaknuta je uloga savetodavnih misija kao što je IPPAS, koje nakon odgovarajućih procena i preporuka, na zahtev mogu predložiti i dugoročni program tehničke pomoći, kao i INSSP koji omogućava omogućava jačanje i održivost sistema nuklearne bezbednosti kroz dugoročnu planiranu saradnju.*

**1. Uvod**

Zakonom o radijacionoj i nuklearnoj sigurnosti i bezbednosti [1] (u daljem tekstu Zakon) definisan termin “nuklearna i radijaciona bezbednost“ označava sprečavanje, otkrivanje i odgovor na slučajeve krađe, sabotaze, neovlašćenog pristupa, ilegalnog transporta, zloupotrebe ili drugih krivičnih dela koja uključuju nuklearni ili radioaktivni materijal kao i povezana postrojenja i delatnosti. U međunarodnim okvirima se koristi termin “nuklearna bezbednost” za prevenciju, detekciju i odgovor na krivično delo ili namernu nedozvoljenu radnju koja uključuje ili koja je usmerena na nuklearni materijal, nuklearne objekte, radioaktivni materijal, pridružene objekte i pridružene aktivnosti [2]. U poslednjoj deceniji je došlo do ubrzanog razvoja ove oblasti što je rezultiralo značajno povećanim brojem odgovarajućih publikacija Međunarodne agencije za atomsku energiju (MAAE), kao i pristupanja međunarodnim instrumentima, Konvenciji o fizičkoj zaštiti nuklearnih materijala usvojene 1979. godine i Amandmanu na Konvenciju o fizičkoj zaštiti nuklearnog materijala donetog 2005. godine. Tehnička saradnja sa MAAE omogućava zemljama članicama da kontinuirano unapređuju svoje znanje putem obuka i radionica, kao i da zatraže savetodavnu misiju, koja na osnovu procene implementaciju obaveza iz međunarodnih pravno-obavezujućih instrumenata, preporuka i primera dobre prakse predlaže i preporučuje određene izmene i poboljšanja. Ovaj vid saradnje se ostvaruje putem IPPAS (International Physical Protection Advisory Service) i INSServ (International Nuclear Security Advisory Service) misija MAAE koje se pripremaju i organizuju na zahtev i uz aktivno učešće država članica.

## 2. Regulativa Republike Srbije

Nacionalna regulativa koja se odnosi na radijacionu i nuklearnu bezbednost bi trebalo da obuhvati različite aspekte koji su deo nadležnosti više državnih organa i kao takva mora biti rezultat dobre međuresorne saradnje. Pored odredbi Zakona, radijaciona i nuklearna bezbednost je uređena i Uredbom o merama bezbednosti nuklearnih objekata i nuklearnih materijala [3], a u određenoj meri i pojedinim odredbama podzakonskih propisa kojima se zakon implementira, a koji se mogu naći na internet stranici: <http://www.srbatom.gov.rs/srbatom/zakonska-regulativa/>. Na snazi je i Uredba o utvrđivanju Programa nuklearne sigurnosti i bezbednosti, koja između ostalog definiše i dugoročne planove i ciljeve u oblasti fizičke zaštite nuklearnih materijala i nuklearnih objekata [4]. Zakonom propisana Strategija o radijacionoj i nuklearnoj bezbednosti bi trebalo da sadrži između ostalog i institucionalni okvir i odgovarajući akcioni plan za sprovođenje, što bi mogao biti dobar osnov za dugoročna poboljšanja u ovoj oblasti. S obzirom na stalno usaglašavanje naše regulative sa regulativom Evropske Unije, koja se uglavnom oslanja na preporuke MAAE, od velikog značaja je stalna komunikacija i tehnička pomoć koja se može dobiti iz ove organizacije kako bi se dostigli što viši bezbednosni standarde. Istovremeno je potrebno obezbediti adekvatnu implementaciju Zakona i strateških dokumenata kroz odgovarajuća podzakonska akta, kontinuiranu edukaciju i podizanje bezbednosne kulture korisnika izvora jonizujućeg zračenja, radioaktivnih i nuklearnih materijala i njihovog okruženja. Pored navedenog, nacionalna regulativa koja se odnosi na bezbednost transporta opasne robe, među koju spada i radioaktivni materijal, od najvećeg je značaja i kontinuirano se uskladjuje sa evropskim propisima.

## 3. Preporuke MAAE

Publikacije MAAE u oblasti radijacione i nuklearne i bezbednosti u kojima su date preporuke za izradu nacionalnih režima bezbednosti i pojedinih njihovih komponenata su prikazane u Tabeli 1.

**Tabela 1. Odabrane publikacije MAAE u oblasti radijacione i nuklearne bezbednosti.**

	Naslov	Publikacija
Osnovna dokumenta	The Convention on the Physical Protection of Nuclear Material (CPPNM)	INFCIRC/274
	Ammandment to The Convention on the Physical Protection of Nuclear Material (A/CPPNM)	INFCIRC/274/Rev.1/Mod.1
	The Physical Protection Objectives and Fundamental Principles	IAEA-GOV/2001/41
	Code of Conduct on the Safety and Security of Radioactive Sources	IAEA, 2004
	Objective and Essential Elements of a State's Nuclear Security Regime	IAEA NSS No. 20,
	Nuclear Security Recommendations on Physical Protection of Nuclear Material and Nuclear Facilities	IAEA NSS No. 13 (INFCIRC/225/Rev. 5)
	Nuclear Security Recommendations on Radioactive Material and Associated Facilities	IAEA NSS No. 14

	Naslov	Publikacija
Ostala značajna dokumenta	Nuclear Security Recommendations on Nuclear and Other Radioactive Material out of Regulatory Control	IAEA NSS No. 15
	Engineering Safety Aspects of the Protection of Nuclear Power Plants against Sabotage	IAEA NSS No. 4
	Nuclear Security Culture	IAEA NSS No. 7
	Preventive and Protective Measures against Insider Threats	IAEA NSS No. 8-G (Rev. 1)
	National Nuclear Security Threat Assessment, Design Basis Threats and Representative Threat Statements	IAEA NSS No. 10-G (Rev.1)
	Security of Radioactive Material in Transport	IAEA NSS No. 9-G (Rev.1)
	Security of Radioactive Material in Use and Storage and of Associated Facilities	IAEA NSS No. 11-G (Rev.1)
	Security of Nuclear Material in Transport	IAEA NSS No. 26-G
	Physical Protection of Nuclear Material and Nuclear Facilities (Implementation of INFCIRC/225/Rev.5)	IAEA NSS No. 27-G
	Identification of Vital Areas at Nuclear Facilities	IAEA NSS No. 16
	Computer Security at Nuclear Facilities	IAEA NSS No. 17
	Handbook on the Design of Physical Protection Systems for Nuclear Material and Nuclear Facilities	IAEA NSS No. 40-T
	Categorization of Radioactive Sources	IAEA Safety Standards Series No. RS-G-1.9
	Guidance on the Import and Export of Radioactive Sources	IAEA, 2012
	Handbook on Nuclear Law,	Vol. I (2003), Vol. II (2010)

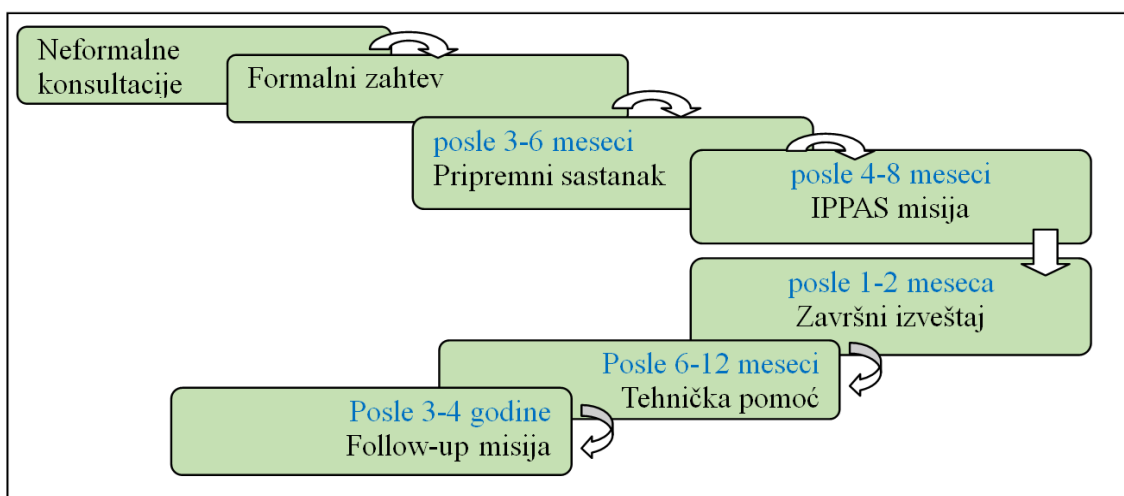
#### 4. Saradnja i tehnička pomoć MAAE

Institut (IPPAS) misije MAAE je nastao 1995 godine sa ciljem da se pomogne državama članicama MAAE u jačanju nacionalnog sistema bezbednosti. Misija ima savetodavnu ulogu u implementaciji medjunarodnih konvencija i preporuka i uputstava MAAE u zaštiti nuklearnog i drugog radioaktivnog materijala, pridruženih objekata i aktivnosti, koji su uglavnom navedeni u tabeli 1. [5] Članovi IPPAS tima su medjunarodni eksperti u oblasti nuklearne bezbednosti koji koriste svoje znanje i široko iskustvo kako bi uporedili uspostavljeni bezbednosni režim ili njegove komponente sa preporukama MAAE, obavezama iz medjunarodnih konvencija i dobrom praksom. Zavisno od zahteva države koja poziva IPPAS misiju, ona se sprovodi u okviru jednog ili više modula prikazanih u tabeli 2. [5]

Nalaz IPPAS tima se u vidu nekoliko nivoa preporuka sumira u Izveštaju koji se pod oznakom „strogo poverljivo“ dostavlja državi. Ceo process se može predstaviti flow-dijagramom na slici 1. [5]

**Tabela 2. Prikaz modula u okviru IPPAS misije MAAE i odgovarajući vidovi pomoći.**

IPPAS moduli	Pregled delova nacionalnog sistema bezbednosti	Vidovi pomoći
Modul 1	Pregled nacionalnog režima nuklearne bezbednosti za nuklearne materijale i nuklearne objekte	Obuke Nacionalne radionice Ciljane procene elemenata sistema bezbednosti Konsultantska pomoć
Modul 2	Pregled bezbednosti nuklearnih objekata	
Modul 3	Pregled bezbednosti transporta	
Modul 4	Bezbednost radioaktivnog materijala i pridruženih objekata i aktivnosti	
Modul 5	Pregled informacione i računarske bezbednosti	



**Slika 1. Prikaz procesa realizacije IPPAS misije.**

Na zahtev, misija može biti nastavljena odnosno dopunjena organizacijom tehničke pomoći MAAE, koja uključuje obuke, tehničke sastanke i radionice, kao i ciljanu procenu određenih elemenata nacionalnog režima bezbednosti. Nekoliko godina nakon toga je moguća organizacija nove follow-up IPPAS misije.

Od nastanka IPPAS misije, MAAE je sproveda 90 ovakvih misija [6]. Pored toga, ustanovila je još jedna vid saradnje i podrške: Intergrated Nuclear Security Support Plan (INSSP) koji omogućava zemljama članicama da ojačaju svoj nacionalni režim nuklearne bezbednosti i učine ga održivim kroz podršku MAAE i potencijalnih donatora, kako je opisano u publikacijama iz tabele 1.

## 5. Osnovne konvencije u oblasti nuklearne bezbednosti

Konvencija o fizičkoj zaštiti nuklearnog materijala [7], zajedno sa izmenama i dopunama [8] je za sada jedini međunarodni pravno-obavezujući instrument koji se odnosi na fizičku zaštitu nuklearnog materijala i nuklearnih objekata u mirnodopske svrhe. Pored odredbi koje se odnose na obaveze članica u pogledu uspostavljanja režima fizičke zaštite nuklearnih objekata i nuklearnih materijala, navedena Konvencija sadrži i niz krivičnih dela za koje su članice Konvencije u obavezi da ih prenesu sa odgovarajućim kaznama u nacionalno krivično zakonodavstvo, kao i odredbe koje se odnose na saradnju između članica Konvencije i MAAE u slučaju zlonamernih dela koja se odnose na nuklearni materijal i nuklearne objekte. Međunarodna konvencija o

sprečavanju akata nuklearnog terorizma [9] obuhvata pored nuklearnog i radioaktivni materijal, kao i radijacione objekte ali ne sadrži odredbe koje se odnose na fizičku zaštitu već takođe uvodi niz krivičnih dela koja se odnose na delokrug Konvencije. Navedena međunarodno obavezujuća pravna akta daju osnovni okvir za uređenje nuklearne bezbednosti a sačinjavaju osnovu koju je potrebno uzeti u obzir prilikom definisanja zakonodavne i regulatorne infrastrukture u oblasti nuklearne bezbednosti. Republika Srbija je država članica Konvencije o fizičkoj zaštiti nuklearnog materijala i njenih izmena i dopuna.

### 6. Zaključak

Razvoj i dosledna implementacija domaće regulative, izvršavanje obaveza iz međunarodnih konvencija kao i primena međunarodnih preporuka objedinjenih u publikacijama МААЕ, sa odgovarajućim mehanizmima savetodavne i tehničke pomoći, omogućavaju stalno unapređivanje našeg nacionalnog režima radijacione i nuklearne bezbednosti i njegovih komponenti. Realizacijom nekoliko projekata tehničke saradnje značajno je poboljšan sistem bezbednosti nuklearnih i radioaktivnih materijala i prioriternih nuklearnih i radijacionih objekata u Republici Srbiji, a u narednom periodu bi se obuhvat ove saradnje mogao proširiti i na druge korisnike i objekte. Primena navedenih vidova tehničke pomoći bi omogućila sveobuhvatnu analizu uspostavljenog nacionalnog režima i pojedinačnih sistema radijacione i nuklearne bezbednosti kao osnovu za dugoročni program saradnje u ovoj oblasti i kontinuirano podizanje bezbednosne kulture.

### 7. Zahvalnica

Rad je finansiran od strane Minsitarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

### 8. Literatura

- [1] Zakon o radijacionoj i nuklearnoj sigurnosti i bezbednosti (Službeni glasnik RS, br. 95/18 i 10/19).
- [2] Objective and Essential Elements of State's Nuclear Security Regime, IAEA NSS No. 20, Vienna, 2013
- [3] Uredba o merama bezbednosti nuklearnih objekata i nuklearnih materijala (Službeni glasnik RS, br. 39/14)
- [4] Uredba o utvrđivanju Programa nuklearne sigurnosti i bezbednosti (Službeni glasnik RS, br. 39/14)
- [5] International Physical Protection Advisory Service (IPPAS) Guidelines, IAEA SVS No. 29, Vienna, 2014
- [6] IAEA Nuclear Security Report 2020, GOV/2020/31-GC(64)/6, Vienna, 2020
- [7] Zakon o ratifikaciji Konvencije o fizičkoj zaštiti nuklearnog materijala (Službeni list SFRJ – Međunarodni ugovori, br. 9/85)
- [8] Zakon o potvrđivanju izmena i dopuna Konvencije o fizičkoj zaštiti nuklearnog materijala (Službeni glasnik RS – Međunarodni ugovori, br. 4/16)
- [9] Međunarodna konvencija o sprečavanju akata nuklearnog terorizma (Službeni list SCG – Međunarodni ugovori, br. 2/06)

**NUCLEAR SECURITY: REGULATIONS, RECCOMENDATIONS AND  
FORMS OF COOPERATION**

**Mirjana RADENKOVIĆ<sup>1</sup>, Stefan RAFAJLOVIĆ<sup>2</sup>,  
Dušan TOPALOVIĆ<sup>1</sup> and Jasminka JOKSIĆ**

*1) University of Belgrade, Vinča Institute of Nuclear Sciences-National Institute of  
Serbia, Belgrade, Serbia, [mirar@vinca.rs](mailto:mirar@vinca.rs), [dusan.topalovic@vinca.rs](mailto:dusan.topalovic@vinca.rs)*

*2) University of Belgrade, School of Electrical Engineering, Belgrade, Serbia,  
[srafajlovic@gmail.com](mailto:srafajlovic@gmail.com)*

*3) Serbian Directorate for Radiation and Nuclear Safety and Security, Belgrade,  
Serbia, [joksic@srbatom.gov.rs](mailto:joksic@srbatom.gov.rs)*

**ABSTRACT**

National regulations, international recommendations and obligations in radiation and nuclear security are presented in the paper. Selected IAEA publications are listed with given standards and recommendations on which the European regulations in nuclear security are based, as a guidance for development or revision of national regulations. Special accent was put on the possibilities of technical cooperation in establishing and enhancement of the national nuclear security regime or its components. The role of the IAEA IPPAS advisory mission was emphasized as the follow-up of the assessment and recommendations, based on the state's request, may be a long-term technical cooperation program as well as the INSSP role, enabling strengthening and sustainability of the nuclear security system in the frame of the long-term partnerships and cooperation.

## УПРАВЉАЊЕ РАДИОАКТИВНИМ ОТПАДОМ У РЕПУБЛИЦИ СРБИЈИ – РЕГУЛАТОРНИ АСПЕКТ

**Ивана АВРАМОВИЋ и Милан ВУЈОВИЋ**

*Директорат за радијациону и нуклеарну сигурност и безбедност, Београд, Србија, [avramovic@srbatom.gov.rs](mailto:avramovic@srbatom.gov.rs), [vujovic@srbatom.gov.rs](mailto:vujovic@srbatom.gov.rs)*

### САДРЖАЈ

*Република Србија је 2017. године приступила Заједничкој конвенцији о сигурности управљања истрошеним горивом и сигурности управљања радиоактивним отпадом чиме је извршено додатно усклађивање са међународним стандардима као и потпуније преношење препорука и захтева Међународне агенције за атомску енергију и ЕУ за јачање и остваривање адекватне сарадње са међународном заједницом. Израда Нацрта Стратегије управљања истрошеним горивом и радиоактивним отпадом је важан корак у планском приступу решавању проблема радиоактивног отпада на територији Републике Србије. Новим Правилником о управљању радиоактивним отпадом се прописује садржај Плана управљања радиоактивним отпадом и истрошеним нуклеарним горивом и дефинишу све фазе управљања. Усвајање правилника о надзору и контроли пошљки радиоактивног отпада и истрошеног горива планирано је за крај 2023. године. Усвајање правилника о одлагању радиоактивног отпада у овом тренутку не представља приоритетан задатак.*

### 1. Увод

Закон о заштити од јонизујућих зрачења [1] донет 1959. године је први закон у области заштите од јонизујућег зрачења на тлу некадашње СФРЈ. По одредбама овог закона под надзор се стављају и „отпадни материјали и смеће као и све материје које могу бити контаминирани радиоактивношћу“.

Област управљања радиоактивним отпадом посебно је издвојена 1965. године када је усвојен „Основни закон о заштити од јонизујућих зрачења“ [2]. Овим законом су радиоактивне отпадне материје дефинисане као извор јонизујућих зрачења и прописана је обавеза израде подзаконских аката којима би се уредили начин и услови смештаја, чувања, обраде и уклањања радиоактивних отпадака. У складу са овим законом усвојен је Правилник о начину и условима смештаја и чувања радиоактивних отпадака (Сл. лист СФРЈ, бр. 1/70).

У „Закону о заштити од јонизујућих зрачења“ [3] који је усвојен 1976. године, чување, обрађивање и коначан смештај радиоактивних отпадних материја се наводи као једна од мера за заштиту од јонизујућег зрачења. Овим законом се прописује и да објекти за чување, обрађивање и коначан смештај радиоактивних отпадних материја „могу бити изграђени само на таквим местима и по таквим техничким нормативима и условима који обезбеђују заштиту човекове средине од јонизујућих зрачења“. Поред тога, прописује се и обавеза доношења прописа о начину и условима испуштања, чувања, обрађивања и коначног смештаја радиоактивних отпадних материја.

Дефиниција нуклеарног објекта је први пут уведена у „Закону о заштити од јонизујућих зрачења и о посебним мерама сигурности при коришћењу нуклеарне енергије“ [4] који је усвојен 1984. године. У овом закону, као и у свим потоњим [5-8], постројење за ускладиштење, прераду и одлагање радиоактивних отпадних



материјала третира се као нуклеарни објекат за који се прописује посебна процедура за лоцирање, изградњу, пуштање у рад, рад и затварање. Одредба којом се прописује обавеза доношења подзаконског акта који уређује управљање радиоактивним отпадом садржана је у свим овим законима.

Република Србија је у процесу приступања Европској унији што подразумева и приступање Европској заједници за атомску енергију (ЕУРАТОМ) као и ратификацију међународних конвенција у области радијационе и нуклеарне сигурности и управљања радиоактивним отпадом и истрошеним горивом. Усклађивање регулаторног оквира са прописима Европске уније довело је до низа промена које су првенствено изражене кроз Закон о радијационој и нуклеарној сигурности и безбедности [8] који је усвојен 2018. године. Овај закон је у потпуности усклађен са Директивом Савета 2011/70/Euratom којом се успоставља заједнички оквир за одговорно и сигурно управљање истрошеним горивом и радиоактивним отпадом [9].

### **2. Усвојена правна акта**

Закон о потврђивању Заједничке конвенције о сигурности управљања истрошеним горивом и о сигурности управљања радиоактивним отпадом [10] усвојен је у Скупштини Републике Србије 2017. године. Инструменти ратификације предати су депозитару, генералном директору Секретаријата Међународне агенције за атомску енергију, 18. децембра 2017. године. Конвенција је на међународном плану за Републику Србију ступила на снагу 18. марта 2018. године када су почели да теку рокови за испуњавање свих обавеза прописаних овим актом.

Конвенција је усвојена 5. септембра 1997. године у Бечу, Аустрија, а на снагу је, у складу са чланом 40.1, ступила 18. јуна 2001. године, тј. деведесетог дана од дана полагања код депозитара двадесет петог инструмента ратификације, прихватања или одобравања, укључујући инструменте петнаест држава од којих свака има бар једну нуклеарну електрану у раду. Према подацима од 15. марта 2021. године, 84 државе су уговорне стране укључујући и све бивше републике СФРЈ и све земље региона.

Конвенција се бави широким спектром питања везаним за управљање истрошеним нуклеарним горивом и за управљање радиоактивним отпадом цивилног карактера. Питања из њеног делокруга се не односе само на земље са нуклеарним енергетским програмима, већ и на оне које у својој примени имају једино изворе зрачења у медицини и индустрији. Фактор недељивости простора у случају евентуалних ванредних ситуација или прекограничног транспорта и других релевантних прекограничних кретања такође наглашава међународни карактер Конвенције и њеног предмета уређивања и чини је значајном за све земље.

Развој и спровођење мера предвиђених одредбама Конвенције доприноси да се област која је у њеном делокругу унапреди на националном плану, да се усклади са међународним стандардима и створе услови за јачање међународне сарадње и адекватнијег међународног приступа управљању истрошеним горивом и радиоактивним отпадом, као и за размену стручних знања и искустава по овим питањима. Приступање Конвенцији пружа и могућност да се домаћа јавност увери да су аранжмани за управљање истрошеним горивом и радиоактивним отпадом наше земље у складу са међународним стандардима, а од утицаја је и на

повећање могућности за коришћење помоћи намењене земљама чија су инфраструктурна развојна средства, као што је то случај и код нас, ограничена. Конвенција не садржи санкције и казнене одредбе, већ се уговорне стране мотивишу на испуњавање захтева путем разматрања националних извештаја на редовним прегледним састанцима, доношењем закључака, као и применом других подстицајних механизма. Прегледни састанци се одржавају на сваке три године. Од ступања на снагу Конвенције 2001. године одржано је укупно шест Прегледних састанака док је Седми прегледни састанак који је требао да буде одржан 2021. због пандемије SARS-Covid-19 вируса одложен за годину дана. Република Србија је до сада учествовала на једном прегледном састанку, шестом по реду, који је одржан 2018. године на коме је успешно представила свој Први национални извештај [11].

### 3. Акта у припреми

Закон о радијационој и нуклеарној сигурности и безбедности [8] прописује усвајање више подзаконских аката међу којима су Стратегија управљања истрошеним горивом и радиоактивним отпадом и скуп правилника којима се уређује управљање радиоактивним отпадом.

Стратегија управљања истрошеним горивом и радиоактивним отпадом је плански документ јавне политике и доноси се на основу Закона о радијационој и нуклеарној сигурности и безбедности [8]. Чланом 10. овог Закона прописано је да се Стратегија доноси у циљу планирања спровођења принципа одговорног и сигурног управљања истрошеним горивом и радиоактивним отпадом.

Република Србија има пред собом задатак да дугорочно реши проблем радиоактивног отпада и истрошеног горива који је настао на њеној територији у протеклих 70 година и који ће настати у будућности, као и да дефинише стратешко опредељење за трајно збрињавање овог материјала тако да он не утиче на животну средину и не представља оптерећење за будуће генерације.

Стратешки приступ овој проблематици подразумева да се сви процеси у којима настаје радиоактивни отпад и истрошено гориво код корисника радиоактивних материјала одвијају уз што ниже економске трошкове и високи степен еколошке одрживости кроз смањење и спречавање загађења и заштиту природе. У том смислу, из примене Закона проистиче и одговарајућа политика наведена у овом документу која ће уз политику у области заштите животне средине довести до одрживог решења за збрињавање истрошеног горива и радиоактивног отпада са најнижим могућим утицајем на животну средину, у складу са међународним препорукама и стандардима.

Стратегијом се дефинишу мере за постизање циљева политике тј. постизање жељених промена и техничка средства на дуг временски период и предлаже пут за достизање крајњег циља – сигурно и безбедно управљање радиоактивним отпадом и истрошеним горивом у свим фазама од његовог настанка до одлагања. То подразумева и све фазе животног века постројења за одлагање радиоактивног отпада од избора локације до пуштања у рад као и обезбеђивање услова за његово затварање уз одговарајућу институционалну контролу и пасивне мере сигурности. Без обзира на то што Република Србија нема нуклеарне електране, чија је изградња забрањена посебним законом, нити планира њихову изградњу у будућности, проблем збрињавања радиоактивног отпада и истрошеног горива је и

те како присутан због дуге историје примене извора јонизујућег зрачења у медицини, привреди и научно-истраживачком раду.

Током 2020. године, Директорат за радијациону и нуклеарну сигурност и безбедност Србије је у сарадњи са ЈП „Нуклеарни објекти Србије“ израдио прву верзију Нацрта Стратегије. У децембру исте године, документ је добио високу оцену од стране експерта ангажованог у оквиру пројекта Саветодавног центра за европска и правна питања Европске комисије PLAC III – Правна подршка преговорима.

Нацрт Стратегије обухвата период од 7 година са пројекцијом за наредних 14 година (двоструки период доношења Стратегије). Документ се доноси у складу са принципима отворености, укључености заинтересованих страна, уважавања стручних мишљења и обезбеђивање адекватног временског периода за решавање проблема и доношење одлука. Поред основних принципа управљања истрошеним горивом и радиоактивним отпадом, Нацрт садржи Политику у овој области, историјат развоја, анализу и оцену постојећег стања, стратешке приоритете и циљеве, мере за постизање општих и посебних циљева, кључне показатеље учинка, институционални и финансијски оквир као и акционе планове за спровођење Стратегије. Очекује се да ће документ бити усвојен до краја 2023. године.

Директорат за радијациону и нуклеарну сигурност и безбедност је израдио нацрт Правилника о управљању радиоактивним отпадом и истрошеним нуклеарним горивом. Документ је био на јавној расправи и његово усвајање се очекује у последњем кварталу 2021. године.

Правилник се односи на радиоактивни отпад који је настао као отпад кроз одобрену делатност, у току ванредног догађаја и интервенција, услед истека рока важења одобрења, одсуства одобрења или престанка радијационе делатности или нуклеарне активности за коју је издато одобрење, као и на отпад који је генерисан током деконтаминације радне и животне средине, деконтаминације лица и уклањања напуштених извора.

Овим правилником посебно се прописује садржај Плана управљања радиоактивним отпадом и истрошеним нуклеарним горивом, категоризација радиоактивног отпада, услови за сакупљање, чување, карактеризацију, обраду, складиштење и одлагање овог материјала као и обавезе вођења евиденције.

Законом [8] је прописано да Директорат за радијациону и нуклеарну сигурност Србије прописује систем контроле увоза радиоактивног отпада насталог током обраде радиоактивног отпада или прераде истрошеног нуклеарног горива у другој држави а које је пореклом из Републике Србије, као и систем контроле извоза и транзита пошилки радиоактивног отпада и истрошеног нуклеарног горива. Доношењем овог правилника извршиће се усклађивање са Директивом Савета 2006/117/Еуратом о надзору и контроли пошилки радиоактивног отпада и истрошеног горива [12]. Потреба за доношењем оваквог правилника проистиче из стратешког опредељења да се део отпада третира ван граница Србије. Доношење правилника планирано је до краја 2023. године.

Директивом Савета 2011/70/ Еуратом [9] прописано је да ће сав радиоактивни отпад бити одложен на територији државе на којој је настао. Закон о радијационој и нуклеарној сигурности и безбедности је обухватио ову обавезу.

Одлагање радиоактивног отпада је стратешки циљ који у Републици Србији треба да буде достигнут у наредним деценијама. Планирање одлагалишта и спровођење

свих истражних радњи је дуготрајан процес који мора бити регулисан од самог почетка па отуда и потреба да буде правно уређен. Доношење овог правилника не представља приоритетан задатак али мора бити у вези и пратити динамику предвиђену Стратегијом управљања истрошеним горивом и радиоактивним отпадом.

#### 4. Закључак

Стално унапређење правног оквира у складу са научним достигнућима, технолошким решењима и признатом међународном праксом и стандардима је један од приоритетних задатака Директората за радијациону и нуклеарну сигурност и безбедност Србије. Имајући у виду кадровски потенцијал у Србији, актуелне трендове у погледу одлива стручног кадра и евидентан проблем у процесу преноса знања, тесна сарадња професионалних удружења и свих институција које су укључене у процес управљања радиоактивним отпадом и истрошеним нуклеарним горивом, од организација у чијем процесу рада настаје радиоактивни отпад, оператера централног складишта радиоактивног отпада до регулаторног тела, је од виталног значаја.

#### 5. 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, 1996
- [7] Закон о заштити од јонизујућих зрачења и о нуклеарној сигурности, Сл. гласник РС 36/09 и 93/12, 2009
- [8] Закон о радијационој и нуклеарној сигурности и безбедности, Сл. гласник РС 95/18 и 10/19, 2018
- [9] Council Directive 2011/70/Euratom of 19 July 2011 establishing a Community Framework for the responsible and safe management of spent fuel and radioactive waste (OJ L 199, 02/08/2011)
- [10] Закон о потврђивању Заједничке конвенције о сигурности управљања истрошеним горивом и о сигурности управљања радиоактивним отпадом, Сл. гласник РС – Међународни уговори 10/2017, 2017
- [11] Republic of Serbia, First National Report, Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management, March 2018
- [12] Council Directive 2006/117/Euratom of 20 November 2006 on the supervision and control of shipments of radioactive waste and spent fuel (OJ L 337, 05/12/2006)

**RADIOACTIVE WASTE MANAGEMENT IN THE REPUBLIC OF  
SERBIA – REGULATORY ASPECT**

**Ivana AVRAMOVIĆ and Milan VUJOVIĆ**

*Serbian Radiation and Nuclear Safety and Security Directorate, Belgrade, Serbia,*

[avramovic@srbatom.gov.rs](mailto:avramovic@srbatom.gov.rs), [vujovic@srbatom.gov.rs](mailto:vujovic@srbatom.gov.rs)

**ABSTRACT**

The Republic of Serbia acceded to the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management in 2017, which prompted an additional alignment with the international standards, and a more comprehensive transposition of the recommendations and requirements by the International Atomic Energy Agency and the EU, aiming at strengthening and establishing the adequate cooperation with the international community. The preparation of Draft Spent Fuel and Radioactive Waste Management Strategy is an important step forward towards a planned approach to dealing with the issue of radioactive waste in the Republic of Serbia. The new Rulebook on Radioactive Waste Management prescribes the content of the Radioactive Waste and Spent Nuclear Fuel Management Plan and defines the procedures for all phases of the management. The adoption of the rulebook concerning supervision and control of shipments of radioactive waste and spent fuel is planned for the end of 2023. Adoption of the rulebook on disposal of radioactive waste is planned but it is not a priority task.

## УНАПРЕЂЕЊЕ РЕГУЛАТОРНОГ ОКВИРА У ОБЛАСТИ ТРАНСПОРТА ОПАСНЕ РОБЕ КЛАСЕ 7 АДР/РИД/АДН (РАДИОАКТИВНЕ МАТЕРИЈЕ)

**Саша БАШИЋ и Милан ВУЈОВИЋ**

*Директорат за радијациону и нуклеарну сигурност и безбедност Србије, Београд, Република Србија, [basic@srbatom.gov.rs](mailto:basic@srbatom.gov.rs), [vujovic@srbatom.gov.rs](mailto:vujovic@srbatom.gov.rs)*

### САДРЖАЈ

*Закон о радијационој и нуклеарној сигурности и безбедности („Сл. гласник РС“ 95/18 и 10/19) успоставља правни оквир за регулисање сигурног и безбедног транспорта опасне робе класе 7 АДР/РИД/АДН (радиоактивне материје). Међународна агенција за атомску енергију успоставила је, стандардима сигурности, захтеве којима се обезбеђују сигурност и заштита здравља људи и животне средине од штетних ефеката јонизујућег зрачења током транспорта радиоактивних материја. Република Србија потписник је Европског споразума о међународном транспорту опасних роба (ADR), Правилника о међународном железничком превозу опасне робе (RID) и Европског споразума о међународном транспорту опасног терета унутрашњим пловним путевима (ADN). Ближим прописивањем услова за сигуран и безбедан транспорт радиоактивних материја подићи ће се ниво регулаторне контроле и обезбедити заштита здравља људи и животне средине од штетних ефеката јонизујућег зрачења током транспорта радиоактивних материја.*

### 1. Увод

Радиоактивни извори се у Републици Србији користе у медицинским, привредним и научно-истраживачким делатностима. Да би радиоактивни извори стигли до крајњих корисника било да су то здравствене, привредне или научно-истраживачке организације неопходно их је транспортовати на начин који ће обезбедити сигурност и безбедност свих учесника у транспорту, других појединаца из становништва и животне средине од штетних ефеката који могу настати као последица излагања јонизујућем зрачењу. Радиоактивне материје се, у Републици Србији, транспортују готово искључиво у оквиру друмског саобраћаја. Поред тога, транспорт радиоактивних материја се може вршити и железничким и пловним путевима.

Транспорт опасне робе класе 7 АДР/РИД/АДН (радиоактивне материје) спада, према одредбама Закона о радијационој и нуклеарној сигурности и безбедности („Сл. гласник РС“ 95/18 и 10/19) [1] у радијационе делатности и за обављање ове делатности неопходно је од Директората за радијациону и нуклеарну сигурност и безбедност Србије прибавити одговарајуће одобрење за обављање радијационе делатности и дозволе за појединачни или виšekратни транспорт.

Радијациона делатност транспорта опасне робе класе 7 АДР/РИД/АДН (радиоактивне материје) категоризована је према ризику који носи као радијациона делатност ниског и радијациона делатност високог ризика а у складу са Правилником о условима за категоризацију радијационих делатности („Сл. гласник РС“ 94/19) [2]. У делатности ниског ризика спадају они транспорти код којих је радиоактивна материја у паковањима означеним UN бројевима UN2915, UN3327, UN3332, UN3333, UN3324, LSA UN3325, UN3326 и UN2913. У делатности високог ризика спадају они транспорти код којих је радиоактивна

материја у паковањима означеним UN бројевима UN2916, UN3328, UN2917, UN3329, UN3323, UN3330, UN2919, UN3331, UN2977, UN2978 и UN3507. За радиоактивне материје у паковањима означеним UN бројевима UN2908, UN2909, UN2910 и UN2911 није неопходно прибавити дозволу за појединачни или вишекратни транспорт.

### 2. Међународни прописи и смернице

Повећање промета робе између држава указало је да неусклађеност прописа којима је уређен транспорт опасних роба може имати негативне економске последице како по произвођаче тако и по крајње кориснике. Из тог разлога, различите међународне организације усвојиле у међународне споразуме којима се уређује транспорт опасних роба. У ове споразуме спадају Европски споразум о међународном транспорту опасних роба (ADR) [3], Правилник о међународном железничком превозу опасне робе (RID) [4] и Европски споразум о међународном транспорту опасног терета унутрашњим пловним путевима (ADN) [5] чији је потписник и Република Србија.

Европски споразум о међународном транспорту опасних роба (ADR – *Accord relatif au transport international des marchandises Dangereuses par Route*) усвојила је 1957. године Економска комисија за Европу Уједињених нација (UNECE). Споразум је ступио на снагу 1968. године и од тада се његови прилози редовно ажурирају а тренутно важећа верзија на снази је од 1. јануара 2021. године. Овим споразумом уређено је која опасна роба и под којим условима се може превозити у међународном друмском саобраћају, начини паковања и обележавања као и услови за возило којим се превози опасна роба и пратећу опрему. Споразум садржи и одредбе које се тичу сигурног и безбедног транспорта радиоактивних материја а које су засноване на сигурносним стандардима које је донела Међународна агенција за атомску енергију [6]. Узимајући у обзир све већи број држава потписница овог споразума и њихову распрострањеност, од 2020. године, из назива овог споразума брише се реч „европски“.

Правилник о међународном железничком превозу опасне робе (RID – *Règlement concernant le transport international ferroviaire des marchandises dangereuses*) представља прилог Ц Конвенције о међународним железничким превозима из 1980. године. Овај документ односи се на међународни превоз опасне робе железницом на територији уговорних страна RID, на превозе који допуњују железнички превоз на које се примењују Јединствени прописи за Уговор о међународном железничком превозу робе а који подлежу важећим међународним прописима за превозе другим видовима транспорта. Документ и његове измене и допуне у надлежности су Међувладине организације за међународни транспорт железницом.

Европски споразум о међународном транспорту опасног терета унутрашњим пловним путевима (ADN – *Accord européen relatif au transport international des marchandises dangereuses par voies de navigation intérieures*) усвојен је 2000. године од стране Економске комисије за Европу Уједињених нација (UNECE) а ступио је на снагу 2008. године и од тада се његови прилози редовно ажурирају а тренутно важећа верзија на снази је од 1. јануара 2021. године. Овај Споразум се примењује на међународни транспорт опасног терета бродовима на унутрашњим пловним путевима и садржи одредбе о међународном транспорту опасног терета на унутрашњим пловним путевима, захтеве и процедуре везане за техничке

прегледе, издавање сертификата о одобрењу, признавање класификационих друштава, одступања, специјална овлашћења, надзор, обуку и испитивање експерата.

Међународна агенција за атомску енергију донела је 2012. године специфичне сигурносне захтеве са ознаком SSR-6 (*Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material, IAEA Safety Standards Series No. SSR-6 (Rev.1)*) којим су успостављени прописи за сигуран транспорт радиоактивног материјала. Овај документ се редовно ажурира и тренутно је важећа верзија из 2018. године. Доношењем овог документа Међународна агенција за атомску енергију успоставила је сигурносне стандарде који пружају прихватљив ниво контроле опасности услед излагања зрачењу, појаве критичности и излагања топлоти по људе, имовину и животну средину а које су повезане са транспортом радиоактивних материјала. Циљ овог документа је успостављање захтева који морају бити испуњени како би се обезбедила сигурност и заштита људи, имовине и животне средине од штетних ефеката јонизујућег зрачења током транспорта радиоактивног материјала. Ова заштита се постиже спречавањем да радиоактивни материјал нежељено доспе у радну и животну средину, контролом излагања, спречавањем појаве критичности и спречавањем оштећења изазваних топлотом.

### 3. Планирани прописи

Закон о радијационој и нуклеарној сигурности и безбедности („Сл. гласник РС“ 95/18 и 10/19) предвиђа доношење подзаконског акта којим ће се ближе уредити транспорт опасне робе класе 7 АДР/РИД/АДН (радиоактивне материје). Доношење овог подзаконског прописа очекује се до краја 2022. године. Овим подзаконским актом ближе ће се прописати услови и начин за обављање транспорта опасне робе класе 7 АДР/РИД/АДН (радиоактивне материје), услови и начин вођења евиденције транспорта опасне робе класе 7 АДР/РИД/АДН (радиоактивне материје) и потребна документација за добијање дозволе за транспорт опасне робе класе 7 АДР/РИД/АДН (радиоактивне материје). Планираним одредбама овог подзаконског акта обезбедиће се не само сигуран транспорт радиоактивних материја на територији Републике Србије већ и усклађивање домаћег законодавства са међународним конвенцијама и споразумима и са препорукама Међународне агенције за атомску енергију које су основа националних прописа у већини европских држава. На тај начин ће се постићи да се транспорт радиоактивним материја између држава обавља несметано водећи при том рачуна о највишим стандардима сигурности.

### 4. Закључак

Ближим прописивањем услова за сигуран и безбедан транспорт радиоактивних материја подићи ће се ниво сигурности и регулаторне контроле и обезбедити заштита здравља људи и животне средине од штетних ефеката јонизујућег зрачења током транспорта радиоактивних материја. Хармонизацијом домаћег законодавства са међународним споразумима и конвенцијама и стандардима Међународне агенције за атомску енергију ће се постићи да се транспорт између држава обавља несметано обезбеђујући при том највише стандарде сигурности и заштите здравља људи и животне средине од штетних ефеката јонизујућег зрачења.



### 5. Референце

- [1] Закон о радијационој и нуклеарној сигурности и безбедности, „Сл. гласник РС“ 95/18 и 10/19, 2018
- [2] Правилник о условима за категоризацију радијационих делатности, „Сл. гласник РС“ 94/19, 2019
- [3] Economic Commission for Europe, Inland Transport Committee, *Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road*, New York and Geneva, 2020
- [4] Intergovernmental Organisation for International Carriage by Rail, *Convention concerning International Carriage by Rail (COTIF), Appendix C – Regulations concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Rail (RID)*, Bern 2020
- [5] Economic Commission for Europe, Inland Transport Committee, *European Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Inland Waterways*, New York and Geneva, 2020
- [6] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, *Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material, IAEA Safety Standards Series No. SSR-6 (Rev.1)*, IAEA, Vienna, 2018.

**UPGRADE OF REGULATORY FRAMEWORK IN THE FIELD OF  
TRANSPORT OF DANGEROUS GOODS – CLASS 7 ADR/RID/ADN  
(RADIOACTIVE MATERIALS)**

**Saša BAŠIĆ and Milan VUJOVIĆ**

*Serbian Radiation and Nuclear Safety and Security Directorate, Belgrade, Serbia,  
[basic@srbatom.gov.rs](mailto:basic@srbatom.gov.rs), [vujovic@srbatom.gov.rs](mailto:vujovic@srbatom.gov.rs)*

**ABSTRACT**

Law on Radiation and Nuclear Safety and Security („Off. Gazette of RS“ 95/18 and 10/19) sets legal framework for regulation of safe and secure transport of dangerous goods – class 7 ADR/RID/ADN (radioactive materials). The International Atomic Energy Agency adopted, through its safety standards, requirements which provide safety and protection of human health and the environment from harmful effects of ionizing radiation during transport of radioactive materials. Republic of Serbia is signatory to European Agreement Concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road (ADR), International Regulations Concerning the Carriage of Dangerous Goods by Rail (RID) and European Provision concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Inland Waterways (ADN). By prescribing the conditions for safe and secure transport of radioactive materials, the level of regulatory control will be increased and the protection of human health and the environment from the harmful effects of ionizing radiation during the transport of radioactive materials will be ensured.

## PRIMENA ZAKONSKE REGULATIVE PRI KORIŠĆENJU IZVORA JONIZUJUĆIH ZRAČENJA U INDUSTRIJI

Zorica OBRADOVIĆ<sup>1</sup>, Mirjana ĐURAŠEVIĆ<sup>1</sup> i Katarina RAJKOVIĆ<sup>2</sup>

1) Univerzitet u Beogradu, Institut za nuklearne nauke "Vinča", Institut od nacionalnog značaja za Republiku Srbiju, Beograd, Srbija, [zoobradovic71@gmail.com](mailto:zoobradovic71@gmail.com), [mirad@vin.bg.ac.rs](mailto:mirad@vin.bg.ac.rs)

2) Akademija strukovnih studija Šumadija, Odsek Kruševac, [katar1970@yahoo.com](mailto:katar1970@yahoo.com)

### SADRŽAJ

Razvoj industrije doveo je do sve veće primene izvora jonizujućih zračenja, bilo da su to zatvoreni radioaktivni izvori u okviru mernih uređaja ili generatori jonizujućih zračenja. Važeća zakonska regulativa zahteva da svi koji rukuju sa izvorima jonizujućih zračenja moraju pre početka rada u zoni zračenja proći odgovarajuću obuku kako bi stekli potrebna znanja o samim izvorima jonizujućih zračenja, rizicima njihove primene i merama zaštite od jonizujućih zračenja u situacijama planiranog ili vanrednog izlaganja. Centar za permanentno obrazovanje je deo Instituta za nuklearne nauke „Vinča” koji se dugi niz godina bavi dopunskim i stručnim obučavanjem i osposobljavanjem izloženih radnika i lica odgovornih za sprovođenje mera zaštite od jonizujućih zračenja. U ovom radu su prikazani rezultati koje je ostvario Centar za permanentno obrazovanje u okviru edukacije izloženih radnika i lica odgovornih za sprovođenje mera zaštite od jonizujućih zračenja u oblasti industrije u periodu od 2011. godine do 2020. godine. Analizom tih rezultata može se pratiti uspešnost primene najnovije zakonske regulative u sprovođenju mera zaštite pri korišćenju izvora jonizujućih zračenja u industriji.

### 1. Uvod

Mnogobrojna otkrića iz oblasti radioaktivnosti kao i razvoj industrije doveli su do značajnijeg korišćenja izvora jonizujućih zračenja u industriji. Široka primena radioizotopa u industrijske svrhe počela je kada se razvojem nuklearnih reaktora i akceleratora omogućila masovna i jeftina proizvodnja radioaktivnih materijala. Sa druge strane, otkriće rendgenskog X zračenja i razvoj rendgen uređaja doveo je do njihove sve veće primene u industriji. Gde god je bilo moguće, radioaktivni izvori su zamenjeni sa rendgen uređajima iz razloga veće bezbednosti i sigurnosti.

Primena svih izvora jonizujućih zračenja zasniva se na interakciji jonizujućeg zračenja sa materijom. U industrijskim primenama najviše su zastupljene metode kod kojih se na osnovu apsorpcije ili rasejanja jonizujućeg zračenja omogućava merenje, kontrola i automatska regulacija debljine i gustine određenih proizvoda, kao i nivo popunjenosti posuda različitim proizvodima. U poseban deo primene spada i otkrivanje nepravilnosti u strukturi proizvoda i kontrola kvaliteta proizvoda. Određivanje pomenutih veličina ili praćenje njihove promene u toku nekog industrijskog procesa zasniva se na merenju intenziteta propuštenog ili reflektovanog snopa jonizujućeg zračenja posle njegove interakcije sa ispitivanim predmetom [1, 2].

Svaka primena izvora jonizujućih zračenja podrazumeva i potrebu za odgovarajućim merama zaštite, merama sprečavanja vanrednog događaja i merama saniranja posledica vanrednog događaja. Kako bi se smanjilo nepotrebno izlaganje radnika u okviru planiranog korišćenja izvora jonizujućih zračenja ili usled mogućeg vanrednog

događaja, važeća zakonska regulativa u ovoj oblasti prepoznaje situaciju planiranog izlaganja. Situacija planiranog izlaganja je situacija izlaganja koja nastaje usled planiranog korišćenja izvora zračenja ili usled ljudske aktivnosti kojom se menja put izlaganja što može da izazove normalno izlaganje ili potencijalno izlaganje ljudi ili životne sredine. Normalno izlaganje je izlaganje koje se može dogoditi tokom obavljanja delatnosti i predviđenih operativnih događaja, dok potencijalno izlaganje može nastati u određenim neregularnim situacijama primene izvora jonizujućih zračenja, a čija se verovatnoća pojave može unapred proceniti [3, 4].

Vanredni događaj je bilo koji neočekivani događaj koji može da dovede do izlaganja pojedinca iznad odobrenih nivoa izlaganja, ili do odstupanja uslova rada od odobrenih uslova rada [3]. Pošto vanredni događaj obuhvata događaje koji mogu dovesti do slučajnog i neplaniranog izlaganja radnika koji rade sa izvorima zračenja, od izuzetnog značaja je da se u okviru Izveštaja o sigurnosti izvrši procena mogućih vanrednih događaja, mere za njihovo sprečavanje, ublažavanje kao i sanacija stanja u koliko se vanredni događaj desi.

Imenovana odgovorna lica u svakoj ustanovi koja koristi izvore jonizujućih zračenja treba da obezbede preventivne mere da do ovih potencijalnih izlaganja ne dođe, striktnom primenom odgovarajućih Uputstava datim u Izveštaju o sigurnosti i Programu zaštite od jonizujućih zračenja koji izrađuju pravna lica ovlašćena od strane Direktorata za radijacionu i nuklearnu sigurnost i bezbednost Srbije.

Kada je reč o planiranom korišćenju izvora zračenja zaštita se postiže kroz osnovna načela zaštite od jonizujućih zračenja (opravdanost, optimizaciju i ograničavanje individualnih doza i rizika), koji su uvedeni kroz publikacije Međunarodne komisije za zaštitu od zračenja (ICRP) [5].

Optimizacija izlaganja izloženih radnika podrazumeva da se izlaganje smanji na najmanji mogući nivo (*ALARA princip- As Low As Reasonably Achievable*) i u suštini se ostvaruje na dva načina.

Jedan način je kroz dizajn uređaja, gde se samim dizajnom uređaja obezbeđuje optimalno planirano izlaganje i optimalni rizik od mogućeg izlaganja jonizujućem zračenju usled korišćenja izvora zračenja.

Tamo gde se dizajnom uređaja ne mogu obezbediti dovoljno niski nivoi izlaganja za izložene radnike, neophodno je primeniti mere zaštite (što kraće vreme izlaganja, što veće rastojanje od izvora zračenja i upotreba zaštitnih ekrana) [5]. U takvim uslovima je i veća mogućnost za pojavu vanrednog događaja, pa je tada ključna uloga edukacije izloženih radnika i prisustvo edukovanih lica odgovornih za sprovođenje mera zaštite od jonizujućih zračenja.

Centar za permanentno obrazovanje Instituta za nuklearne nauke „Vinča” je ovlašćeno pravno lice za dopunsko obučavanje i osposobljavanje izloženih radnika i lica odgovornih za sprovođenje mera zaštite od jonizujućih zračenja u industriji. Uloga Centra je da onima koji koriste izvore zračenja u industriji približi zakonsku regulativu i značaj uloge imenovanih odgovornih lica u implementaciji sistema zaštite od jonizujućih zračenja. Praćenjem postignutih rezultata u okviru edukacija koje Centar sprovodi, mogu se pratiti trendovi u primeni i razvoju zaštite od jonizujućih zračenja. Cilj ovog rada je da se kroz analizu održanih kurseva u periodu od 2011 do 2020. godine izvrši evaluacija edukacije o zaštiti od jonizujućih zračenja za izvore zračenja koji se primenjuju u industriji.

### 2. Primena izvora jonizujućih zračenja u industriji i rizici od izlaganja

Direktorat za radijacionu i nuklearnu sigurnost i bezbednost Srbije je regulatorno telo koje kroz Zakon o radijacionoj i nuklearnoj sigurnosti i bezbednosti Srbije i odgovarajuća podzakonska akta sprovodi implementaciju međunarodnih standarda (*Basic Safety Standards*) [3, 6, 7]. Jedan od zadataka Direktorata je i da definiše kategorizaciju radijacionih delatnosti. Uslovi za kategorizaciju radijacionih delatnosti određeni su prema kriterijumima za procenu rizika i odnose se na uticaj radijacione delatnosti na zdravlje izloženih radnika i pojedinaca, stanovništva i životnu sredinu kao i na vrstu delatnosti (radijacione delatnosti niskog, umerenog i visokog rizika) [8].

Radijacione delatnosti niskog rizika u industriji su uglavnom delatnosti u kojima se koriste rendgen aparati kao izvori jonizujućih zračenja (XRF, EDXRF, XRD, kontrola kvaliteta proizvoda, tuneli za skeniranje proizvoda..). Kod takvih delatnosti je dizajnom uređaja postignut nizak nivo izlaganja izloženih radnika i mala verovatnoća za pojavu vanrednog događaja.

Kada je reč o zatvorenim izvorima zračenja kategorizacija radijacionih delatnosti po riziku je daleko složenija i zavisi od kategorije samog izvora [8, 9].

Radijacione delatnosti visokog rizika gde je najveći nivo izlaganja izloženih radnika i najveća verovatnoća za pojavu vanrednog događaja su u oblasti industrijske radiografije i karotažnih merenja. Imenovana odgovorna lica za sprovođenje mera zaštite od jonizujućih zračenja moraju da brinu o bezbednosti izvora jonizujućih zračenja i sigurnosti izloženih radnika kroz praćenje primene odgovarajućih Upustava i procedura datih u Izveštaju o sigurnosti i Programu zaštite od jonizujućih zračenja.

### 3. Edukacija izloženih radnika i lica odgovornih za sprovođenje mera zaštite u industriji

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.

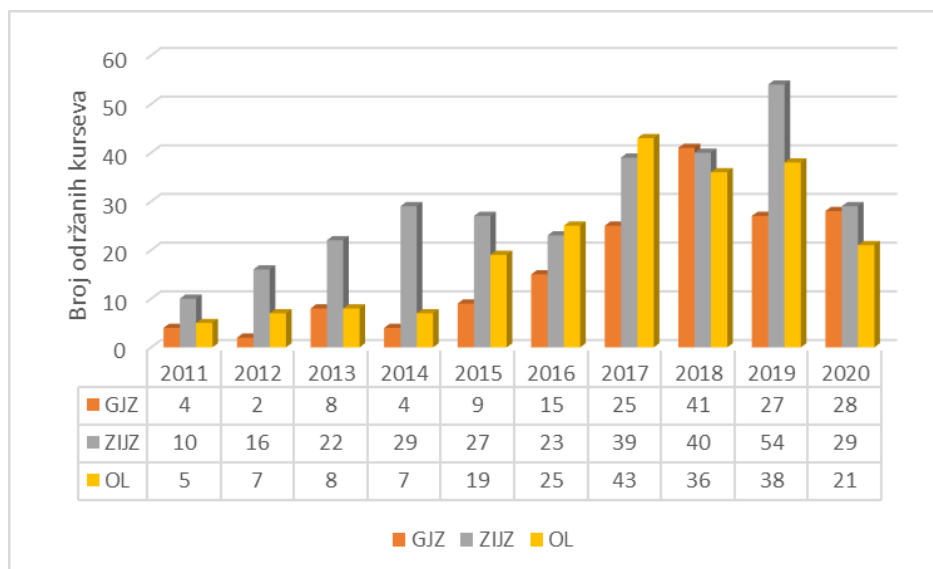
U oblasti industrije mogu se izdvojiti tri značajne oblasti kurseva koji se održavaju. To su kursevi koji se odnose na:

- korišćenje generatora jonizujućih zračenja,
- korišćenje zatvorenih izvora jonizujućih zračenja i
- osposobljavanje lica odgovornih za sprovođenje mera zaštite od jonizujućih zračenja.

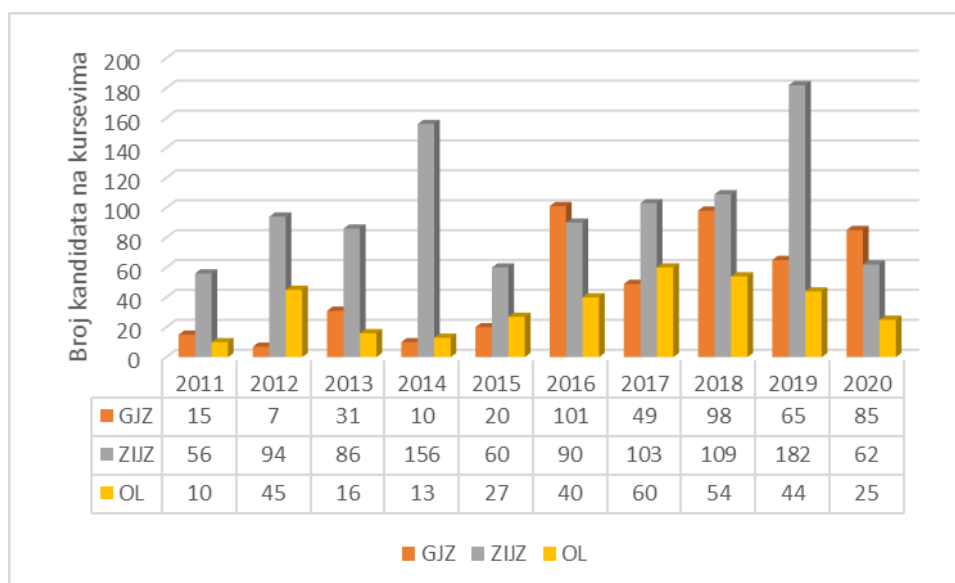
Na slikama 1. i 2. su prikazani grafikoni koji se odnose na broj održanih kurseva i broj kandidata na ovim kursevima razvrstano po ovim oblastima. Svi podaci su dati za period od 2011. godine do 2020. godine, zato što se u Centru od 2011. godine vodi baza podataka svih održanih kurseva i svih polaznika ovih kurseva. Ukupan broj svih kurseva održanih u Centru u ovom periodu koji se odnose na primenu izvora jonizujućih zračenja u industriji je 661, a ukupan broj kandidata je 1813.

Sa prikazanih grafikona može se videti da od 2011. postoji trend rasta u sve tri oblasti kurseva, što ukazuje na porast uticaja zakonske regulative u implementaciji predviđenih zakonskih obaveza u sistemu zaštite od jonizujućih zračenja. Takođe se može uočiti da je još uvek veći broj kurseva i veći broj kandidata u oblasti koja se odnosi na korišćenje

zatvorenih izvora jonizujućih zračenja u odnosu na broj kurseva i broj kandidata koji se odnosi na korišćenje generatora jonizujućih zračenja, mada je evidentan broj porasta ovih kurseva u zadnjih nekoliko godina. Kada govorimo o kursevima za odgovorna lica, više nego očigledan je doprinos veće primene zakonske regulative u sistemu zaštite od jonizujućih zračenja od strane korisnike izvora jonizujućih zračenja u industriji.



**Slika 1. Broj kurseva održanih u Centru u oblasti industrije u periodu 2011 – 2020. godine. GIZ su kursevi koji se odnose na korišćenje generatora jonizujućih zračenja. ZIJZ su kursevi koji se odnose na korišćenje zatvorenih izvora jonizujućih zračenja. OL su kursevi koji se odnose na odgovorna lica u industriji.**



**Slika 2. Broj polaznika na kursevima u Centru u oblasti industrije u periodu 2011-2020. godine. GIZ su kursevi koji se odnose na korišćenje generatora jonizujućih zračenja. ZIJZ su kursevi koji se odnose na korišćenje zatvorenih izvora jonizujućih zračenja. OL su kursevi koji se odnose na odgovorna lica u industriji.**

### 4. Zaključak

I pored toga što je najveća primena izvora jonizujućih zračenja u medicini, nikako se ne sme zapostaviti i njihova primena u industriji. Primena izvora jonizujućih zračenja u industriji odnosi se na korišćenje zatvorenih izvora zračenja ili generatora jonizujućih zračenja u industrijskim procesima. U tehnologijama koje su se nekada koristile dominiralo je korišćenje zatvorenih izvora zračenja što podrazumeva veće mere bezbednosti izloženih radnika i sigurnosti izvora zračenja. Novije tehnologije, gde god je to moguće, zamenjuju zatvorene izvore zračenja sa generatorima jonizujućih zračenja, gde su dizajnom uređaja postignuti niski nivoi izlaganja izloženih radnika i manja verovatnoća za pojavu vanrednog događaja. I u jednom i u drugom slučaju veoma važnu ulogu u sistemu zaštite ima lice odgovorno za sprovođenje mera zaštite od jonizujućih zračenja, koje u sistemu neophodnih edukacija dobija sva potrebna znanja koja se odnose na sistem zaštite od jonizujućih zračenja. Tamo gde su velika izlaganja izloženih radnika (industrijska radiografija i karotažna merenja) neophodno je odgovarajućim edukacijama odgovornih lica pospešivati adekvatnu i neophodnu primenu odgovarajućih procedura, kako bi se smanjila postojeća izlaganja i verovatnoća za pojavom vanrednih događaja. Takav pristup je u skladu sa najnovijom zakonskom regulativom, jer se na taj način utiče i na smanjenje izlaganja opšte populacije i zaštitu životne sredine.

### 5. Zahvalnica

Rad je finansijski podržan od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije (Aneks ugovora, evidencioni broj: 451-03-9/2021-14/ 200017).

### 6. Literatura

- [1] A. Milojević, V. Urošević, M. Kurepa, *Principi i metode primene radioaktivnih izotopa u industriji*, Naučna knjiga, Beograd, 1963
- [2] *Industrial Applications of Sealed Radioactive Sources*, IAEA, Vienna, 2000.
- [3] *Zakon o radijacionoj i nuklearnoj sigurnosti i bezbednosti*, Sl. Gl. RS br. 95/2018 i 10/2019.
- [4] *Pravilnik o granicama izlaganja jonizujućim zračenjima i merenjima radi procene nivoa izlaganja jonizujućim zračenjima*, Sl. Gl. RS br. 86/2011 i 50/2018.
- [5] *The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*, ICRP Publication 103, International Commission on Radiological Protection (ICRP), Elsevier, 2007.
- [6] *Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards*, IAEA SAFETY STANDARDS, General Safety Requirements Part 3, IAEA, Vienna, 2014.
- [7] *Establishing the Infrastructure for Radiation Safety*, Specific Safety Guide No. SSG-44, IAEA, Vienna, 2018.
- [8] *Pravilnik o uslovima za kategorizaciju radijacionih delatnosti*, Sl. Gl. RS br. 94/19.
- [9] *Dangerous quantities of radioactive material (D-values)*, IAEA, Vienna, 2006.

**APPLICATION OF LEGISLATION REGARDING THE USE OF RADIATION  
SOURCES IN INDUSTRY**

**Zorica OBRADOVIĆ<sup>1</sup>, Mirjana ĐURAŠEVIĆ<sup>1</sup> and Katarina RAJKOVIĆ<sup>2</sup>**

1) *University of Belgrade, Vinča Institute of Nuclear Sciences, Institute of national importance for the Republic of Serbia, Belgrade, Serbia, [zoobradovic71@gmail.com](mailto:zoobradovic71@gmail.com), [mirad@vin.bg.ac.rs](mailto:mirad@vin.bg.ac.rs),*

2) *Shumadia Academy of Professional Studies - Department of Krusevac, Serbia, [katar1970@yahoo.com](mailto:katar1970@yahoo.com)*

**ABSTRACT**

The industry development has led to the increasing industrial application of radiation sources, as closed radiation sources or radiation generators. They have been widely used by various industries to improve the quality of product, optimize processes, save energy and materials. Any application of radiation sources implies the need for appropriate radiation protection in order to reduce unnecessary exposure of people who work with radiation sources in the situation of planned and emergency exposure. International commission of radiation protection (ICRP) suggested general principles of radiation protection in terms of three key words: justification, optimization and dose limit. 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 sources of ionizing radiation in their everyday work. The results of the CPE in the education of exposed workers and radiation protection officers in the industry application for the period from 2011 to 2020 are presented in this paper. The analysis of these results shows the success of the application of regulations in industrial usage of radiation sources.



## IZAZOVI ZA DEFINISANJE PRAVILA ODLUČIVANJA ZA USAGLAŠENOST REZULTATA ISPITIVANJA SA REGULATORNIM ZAHTEVIMA

**Jovana KNEŽEVIĆ, Nataša LAZAREVIĆ, Ivan KNEŽEVIĆ,  
Nevena ZDJELAREVIĆ i Dalibor ARBUTINA**

*Javno preduzeće „Nuklearni objekti Srbije”, Beograd, Srbija,  
[jovana.knezevic@nuklearniobjekti.rs](mailto:jovana.knezevic@nuklearniobjekti.rs), [natasa.lazarevic@nuklearniobjekti.rs](mailto:natasa.lazarevic@nuklearniobjekti.rs),  
[ivan.knezevic@nuklearniobjekti.rs](mailto:ivan.knezevic@nuklearniobjekti.rs), [nevena.zdjelarevic@nuklearniobjekti.rs](mailto:nevena.zdjelarevic@nuklearniobjekti.rs),  
[dalibor.arbutina@nuklearniobjekti.rs](mailto:dalibor.arbutina@nuklearniobjekti.rs)*

### SADRŽAJ

*Javno preduzeće „Nuklearni objekti Srbije“, jedini nuklearni operator u zemlji, akreditovano je za radiološka ispitivanja uključujući nuklearna ispitivanja u radijacionoj i nuklearnoj sigurnosti, biohemijska ispitivanja bioloških materijala i ispitivanja u oblasti humane genetike. U toku 2019. godine sprovedena je tranzicija usaglašenosti sa opštim zahtevima za kompetentnost laboratorija za ispitivanje stare verzije standarda SRPS ISO/IEC 17025:2006 na novu verziju standarda SRPS ISO/IEC 17025:2017. Laboratorija za ispitivanje suočila se sa zadacima za implementaciju novih zahteva među kojima je definisanje pravila odlučivanja prilikom davanja izjave o usaglašenosti rezultata sa regulatornim zahtevima. U radu biće prikazan način na koji je laboratorija sistematski analizirala moguće opcije za pravilo odlučivanja, uzimajući u obzir primenu različitih opcija na metode i konkretne rezultate ispitivanja. Prikazano je odabrano pravilo odlučivanja i dati su argumenti zašto je ono adekvatno, pogotovo u oblasti radioloških i nuklearnih ispitivanja. Dati su primeri usaglašenosti rezultata ispitivanja sa regulatornim zahtevima uz primenu definisanog pravila odlučivanja.*

### 1. Uvod

Javno preduzeće „Nuklearni objekti Srbije“ ima akreditovanu laboratoriju za ispitne metode čija je oblast akreditacije radiološka ispitivanja uključujući nuklearna ispitivanja, humanu genetiku i biohemijska ispitivanja humanog biološkog materijala. U prethodnom periodu izvršena je tranzicija sa stare verzije standarda SRPS ISO/IEC 17025:2006 na novu verziju standarda SRPS ISO/IEC 17025:2017, pri čemu je urađena revizija i usklađivanje postojećih, kao i izrada novih dokumenata podrške u skladu sa zahtevima nove verzije standarda.

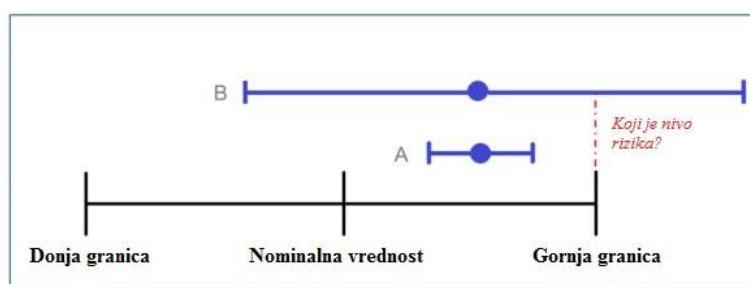
Laboratorijska ispitivanja se mahom zasnivaju na određivanju sadržaja aktivnih radionuklida (prirodnih i veštačkih) u različitim medijumima (uzorci iz životne sredine, mašine, oprema, postrojenja i dr.) i merenju operativnih dozimetrijskih veličina (ambijentalni ekvivalent doze, jačina ambijentalnog ekvivalenta doze, lični ekvivalent doze). Za ove veličine, nacionalno zakonodavstvo je propisalo gornje granice sadržaja radionuklida u medijumima i granice izlaganja jonizujućim zračenjima [2-5]. Adekvatno odabrano pravilo odlučivanja o prihvatanju ili odbijanju određenog rezultata je od velikog značaja zbog specifičnosti ispitivanja koja imaju za cilj radijacionu i nuklearnu sigurnost i bezbednost, odnosno zaštitu ljudi i životne sredine od štetnog dejstva jonizujućih zračenja. Donošenje odluke o usaglašenosti rezultata sa regulatornim zahtevima mora biti takvo da rizik od lažnog prihvatanja bude što je moguće manji.

## 2. Могуће опције за правило одлучивања

Prilikom obavljanja ispitivanja i potom davanja izjave o usaglašenosti da je rezultat u granicama ili van granica, odnosno da li „prolazi“ ili „ne prolazi“ u skladu sa određenim zahtevima, postoje dva moguća ishoda:

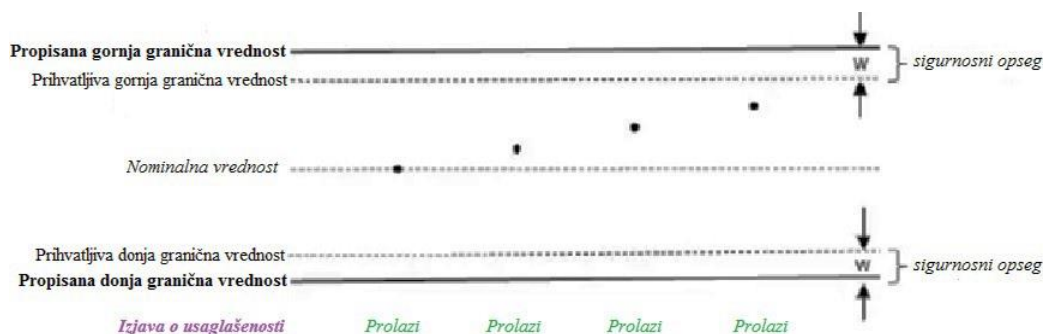
- Donosi se tačna odluka u pogledu usaglašenosti;
- Donosi se netačna odluka u pogledu usaglašenosti.

Svaka izmerena vrednost ima pridruženu mernu nesigurnost. Na slici 1 se može primetiti važnost merne nesigurnosti prilikom davanja izjave o usaglašenosti. U slučaju A, izmerena vrednost sa proširenom mernom nesigurnošću upada u opseg dozvoljenih granica, dok za slučaj B izmerena vrednost sa proširenom mernom nesigurnošću probija gornju granicu. U tom smislu, veći je rizik od „lažnog prihvatanja“, odnosno davanja izjave o usaglašenosti sa specificiranim zahtevima za slučaj B, zbog većeg opsega merne nesigurnosti.



**Slika 1. Ilustracija merenja rizika pri odlučivanju.**

Upotreba sigurnosnog opsega za definisanje pravila odlučivanja može umnogome smanjiti verovatnoću donošenja pogrešne odluke. Ovaj opseg predstavlja sigurnosni faktor uključen u proces odlučivanja na taj način što smanjuje prihvatljivu graničnu vrednost ispod propisane granične vrednosti. Širina sigurnosnog opsega  $w$  predstavlja razliku propisane granične vrednosti (*tolerance limit*, TL) i prihvatljive granične vrednosti (*acceptance limit*, AL),  $w = |TL - AL|$ , slika 2. To znači da je rezultat ispitivanja usaglašen sa specifikacijom ukoliko se nalazi ispod prihvatljive granične vrednosti.

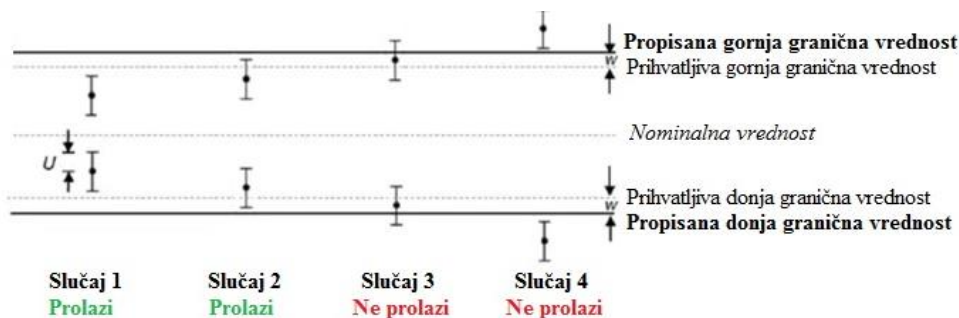


**Slika 2. Sigurnosni opseg.**

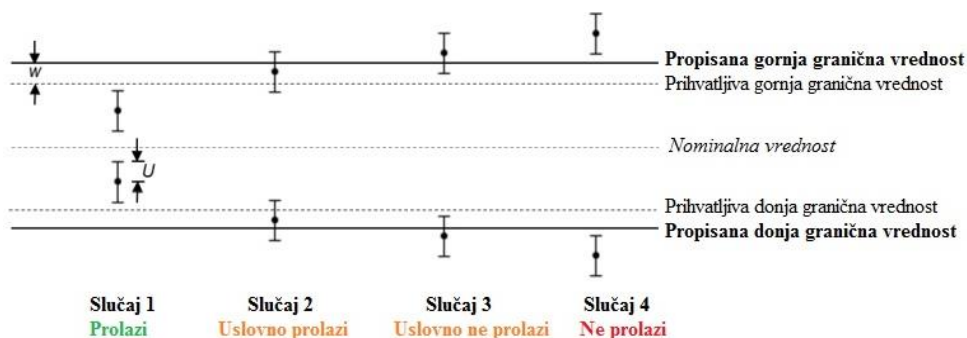
Prema preporukama međunarodnog standarda [7], postoje tri vrste pravila odlučivanja:

- Binarno pravilo odlučivanja jednostavnog prihvatanja bez sigurnosnog opsega;
- Binarno pravilo odlučivanja sa sigurnosnim opsegom;
- Nebinarno pravilo odlučivanja sa sigurnosnim opsegom.

Kada je razmatrano koje pravilo odlučivanja odabrati, prvi uslov bio je postojanje sigurnosnog opsega. U tom smislu, prva od navedenih opcija za pravilo odlučivanja nije uzimana u obzir. Zatim su razmatrane prednosti i mane binarnog i nebinarnog pravila odlučivanja. Prikazi slučajeva usaglašenosti rezultata ispitivanja sa regulatornim zahtevima za binarno pravilo odlučivanja i nebinarno pravilo odlučivanja sa sigurnosnim opsegom dati su na slikama 3 i 4, respektivno.



**Slika 3. Prikazi slučajeva usaglašenosti rezultata ispitivanja za binarno pravilo odlučivanja sa sigurnosnim opsegom.**



**Slika 4. Prikazi slučajeva usaglašenosti rezultata ispitivanja za nebinarno pravilo odlučivanja sa sigurnosnim opsegom.**

Za vrednosti rezultata ispitivanja koje se nalaze unutar sigurnosnog opsega, kao i one vrednosti koje se nalaze van opsega propisanih granica nije bilo dileme: prvi slučaj se prihvata, drugi se ne prihvata, bez obzira na dodatnu mernu nesigurnost. Međutim, slučaj 3 kod binarnog pravila odlučivanja, odnosno slučaj 2 kod nebinarnog pravila odlučivanja, zahtevao je posebno razmatranje, analiziranje i diskusiju. Za ove slučajeve, izmerena vrednost se nalazi iznad prihvatljive granične vrednosti, a ispod propisane granične vrednosti. Za pravilo odlučivanja sa slike 3, rezultat sa pridruženom proširenom mernom nesigurnošću ne bi prošao, jer bi kao takav premašio propisanu gornju granicu. Za pravilo odlučivanja sa slike 4, takav bi se rezultat uslovno prihvatio, sa određenim nivoom rizika. Imajući ovo u vidu i uzimajući u obzir specifičnost oblasti laboratorijskih ispitivanja, laboratorija za ispitivanje je na konzervativan način pristupila odabiru pravila odlučivanja i odlučilo se za usvajanje binarnog pravila odlučivanja sa sigurnosnim opsegom [6-11]. Ovo pravilo odlučivanja se primenjuje na sve metode ispitivanja iz dodeljenog obima akreditacije, osim za biohemijska i hematološka ispitivanja. Pravilo odlučivanja se, u skladu sa zahtevom standarda [1], saopštava i

dogovara sa korisnikom pre početka usluge i daje se u vidu izjave o usaglašenosti u izveštaju o ispitivanju kada je relevantno.

Definisanje binarnog pravila odlučivanja sa sigurnosnim opsegom vrši se na sledeći način:

- Rezultat ispitivanja je u saglasnosti sa propisima nacionalnog zakonodavstva i preporukama međunarodnih standarda, ukoliko se izmerena vrednost nalazi ispod prihvatljive gornje granične vrednosti, odnosno ako se izmerena vrednost sa pridruženom mernom nesigurnošću nalazi ispod propisane gornje granične vrednosti (slučaj 1 i 2, slika 3). Prihvatljiva gornja granična vrednost se dobija kao  $AL = TL - w$ , gde je  $w$  proširena kombinovana merna nesigurnost  $U$  sa 95 % poverenja (faktor proširenja  $k = 2$ ). Na analogan način se usaglašenost procenjuje za propisanu donju graničnu vrednost.
- Rezultat ispitivanja nije u saglasnosti sa propisima nacionalnog zakonodavstva i preporukama međunarodnih standarda, ukoliko se izmerena vrednost nalazi iznad prihvatljive gornje granične vrednosti, odnosno ako se izmerena vrednost sa pridruženom mernom nesigurnošću nalazi iznad propisane gornje granične vrednosti (slučaj 3 i 4, slika 3). Prihvatljiva gornja granična vrednost se dobija kao  $AL = TL - w$ , gde je  $w$  proširena kombinovana merna nesigurnost  $U$  sa 95 % poverenja (faktor proširenja  $k = 2$ ). Na analogan način se usaglašenost procenjuje za propisanu donju graničnu vrednost.

Merna nesigurnost je u definisanom pravilu odlučivanja uzeta direktno u obzir. Za širinu sigurnosnog opsega se uzima vrednost od proširene kombinovane merne nesigurnosti ( $w = U$ ). U tom slučaju se obezbeđuje da je specifični rizik, odnosno verovatnoća lažnog prihvatanja, ispod 2,5 %, a u skladu sa preporukama međunarodnog standarda [2].

### 3. Primena pravila odlučivanja na rezultate ispitivanja

Davanje izjave o usaglašenosti rezultata ispitivanja sa regulatornim zahtevima zasniva se na odabranom pravilu odlučivanja u kom figurišu rezultat ispitivanja, pridružena proširena merna nesigurnost, prihvatljiva granična vrednost i granična vrednost propisana nacionalnim zakonodavstvom.

U tabeli 1 dat je prikaz rezultata ispitivanja nivoa eksternog izlaganja merenjem specifične površinske aktivnosti radionuklida u uzorcima zemlje kao deo aktivnosti čišćenja armiranobetonskih skloništa civilno-vojnog aerodroma Ponikve kod Užica, jugozapadna Srbija, od neeksplozivnih ubojnih sredstava bombardovanja, radioaktivnog materijala i sanacije manevarskih površina. Radioaktivni izotop torijum  $^{232}\text{Th}$  je merenjem specifične površinske aktivnosti utvrđen u prašini, šutu i šljaci, od delova aviona koji su goreli.

Rezultati ispitivanja za lokacije 1, 3 i 5 su usaglašeni sa regulatornim zahtevima [5], s obzirom da izmeren rezultat sa pridruženom mernom nesigurnošću odgovara slučaju 1 sa slike 3 (za lokacije 1 i 5), odnosno slučaju 2 sa slike 3 (za lokaciju 3). Rezultati ispitivanja za lokacije 2 i 4 nisu usaglašeni sa regulatornim zahtevima [5], s obzirom da izmeren rezultat sa pridruženom mernom nesigurnošću odgovara slučaju 3 sa slike 3 (za lokaciju 2), odnosno slučaju 4 sa slike 3 (za lokaciju 4).

**Tabela 1. Davanje izjave o usaglašenosti primenom pravila odlučivanja za rezultat merenja specifične površinske aktivnosti radionuklida  $^{232}\text{Th}$  u armiranobetonskim skloništima.**

Lokacija	Izmeren rezultat sa pridruženom mernom nesigurnošću [Bq/kg]	Propisana gornja granica [Bq/kg] [5]	Prihvatljiva gornja granica [Bq/kg]	Izjava o usaglašenosti (usaglašen/nije usaglašen)
1	$310 \pm 20$	1000	980	Usaglašen
2	$950 \pm 80$	1000	920	Nije usaglašen
3	$910 \pm 70$	1000	930	Usaglašen
4	$9\ 000 \pm 700$	1000	300	Nije usaglašen
5	$43 \pm 4$	1000	996	Usaglašen

#### 4. Zaključak

U toku sprovedene tranzicije usaglašenosti sa opštim zahtevima za kompetentnost laboratorija za ispitivanje stare verzije standarda ISO/IEC 17025:2006 na novu verziju standarda ISO/IEC 17025:2017, laboratorija za ispitivanje suočila se sa zadacima za implementaciju novih zahteva, a poseban izazov bilo je definisanje pravila odlučivanja. Zahtev za dokumentovanje pravila odlučivanja sa druge strane je olakšao izveštavanje i odobravanje rezultata ispitivanja. Iako prethodna verzija standarda nije eksplicitno zahtevala postojanje pravila odlučivanja, laboratorija je uvek bila okrenuta konzervativnom pristupu i strogosti u pogledu odobravanja rezultata, zbog specifičnosti oblasti primene rezultata ispitivanja. Dokumentovanje pravila odlučivanja i njegovo saopštavanje korisniku usluga predstavlja osnov za davanje izjave o usaglašenosti rezultata ispitivanja sa regulatornim zahtevima, čiji je krajnji cilj zaštita ljudi i životne sredine od štetnog dejstva jonizujućih zračenja.

#### 5. Literatura

- [1] SRPS ISO/IEC 17025:2017, Opšti zahtevi za kompetentnost laboratorije za ispitivanje i laboratorije za etaloniranje, ISO/IEC, Geneva, 2017.
- [2] Zakon o radijacionoj i nuklearnoj sigurnosti i bezbednosti, „Službeni glasnik Republike Srbije“ br. 95/18 i 10/19, 2019.
- [3] Pravilnik o granicama sadržaja radionuklida radionuklida u vodi za piće, životnim namirnicama, stočnoj hrani i lekovima, predmetima opšte upotrebe, građevinskom materijalu i drugoj robi koja se stavlja u promet, „Službeni glasnik Republike Srbije“ br. 36/18, 2018.
- [4] Pravilnik o granicama izlaganja jonizujućim zračenjima i merenja radi procene nivoa izlaganja jonizujućim zračenjima, „Službeni glasnik Republike Srbije“ br. 86/11 i 50/18, 2018.
- [5] Pravilnik o granicama radioaktivne kontaminacije lica, radne i životne sredine i načinu sprovođenja dekontaminacije, „Službeni glasnik Republike Srbije“ br. 38/2011, 2011.

- [6] Procedura za vrednovanje merne nesigurnosti i definisanje pravila odlučivanja QP.0700.4, verzija 3.1, Javno preduzeće „Nuklearni objekti Srbije“, 2020.
- [7] ILAC-G8:09/2019, Guidelines on Decision rules and Statements of Conformity, ILAC, 2019.
- [8] Implementing ISO/IEC 17025:2017, UNIDO, Vienna, 2020.
- [9] Technical report No. 1, Decision rules applied to conformity assessment, Eurolab, 2017.
- [10] Cook book, Doc No. 8, Determination of conformance with specifications using measurement uncertainties – possible strategies, Eurolab, 2018.
- [11] LAB 12 / Edition: 24 Reasons for evaluating uncertainty, UKAS, Staines-upon-Thames, 2019.

**CHALLENGES FOR DEFINING DECISION RULE FOR COMPLIANCE OF  
TEST RESULTS WITH REGULATORY REQUIREMENTS**

**Jovana KNEŽEVIĆ, Nataša LAZAREVIĆ, Ivan KNEŽEVIĆ,  
Nevena ZDJELAREVIĆ and Dalibor ARBUTINA**

*Public Company „Nuclear Facilities of Serbia“ Belgrade, Serbia,  
[jovana.knezevic@nuklearniobjekti.rs](mailto:jovana.knezevic@nuklearniobjekti.rs), [natasa.lazarevic@nuklearniobjekti.rs](mailto:natasa.lazarevic@nuklearniobjekti.rs),  
[ivan.knezevic@nuklearniobjekti.rs](mailto:ivan.knezevic@nuklearniobjekti.rs), [nevena.zdjelarevic@nuklearniobjekti.rs](mailto:nevena.zdjelarevic@nuklearniobjekti.rs),  
[dalibor.arbutina@nuklearniobjekti.rs](mailto:dalibor.arbutina@nuklearniobjekti.rs)*

**ABSTRACT**

Public Company „Nuclear Facilities of Serbia“, the only nuclear operator in the country, is accredited for radiological testing, including nuclear testing in the field of radiation and nuclear safety, biological assessment of human biological materials and genetic examination of human blood. During 2019, the transition of compliance with the general requirements for the competence of testing laboratory from the old version of the standard SRPS ISO/IEC 17025:2006 to the new version of the standard SRPS ISO/IEC 17025:2017 was carried out. The testing laboratory was faced with tasks for the implementation of new requirements, among which is the definition of decision-making rules when giving a statement on the compliance of results with regulatory requirements. The paper will present the way in which the laboratory has systematically analyzed possible options for the decision rule, taking into account the application of different options to methods and specific test results. The selected decision rule is presented and arguments are given as to why it is adequate, especially in the field of radiological and nuclear testing. Examples of compliance of test results with regulatory requirements with the application of a defined decision rule are given.

**НЕЈОНИЗУЈУЋА  
ЗРАЧЕЊА**



## MONTE KARLO SIMULACIJE DISTRIBUCIJE ZAKOČNOG ZRAČENJA U OKOLINI LINEARNOG 15 MEV AKCELERATORA

Dušan MRĐA<sup>1</sup>, Borislava PETROVIĆ<sup>1,2</sup>, Tatjana IGNJIĆ<sup>1,3</sup>,  
Jovana KNEŽEVIĆ<sup>1</sup>, Kristina BIKIT<sup>1</sup>, Sofija FORKAPIĆ<sup>1</sup>,  
Jan HANSMAN<sup>1</sup>, Danijel VELIMIROVIĆ<sup>1</sup> i Ištvan BIKIT<sup>1</sup>

- 1) Univerzitet u Novom Sadu, Prirodno-matematički fakultet, Departman za fiziku, Novi Sad, Srbija, [mrdjad@df.uns.ac.rs](mailto:mrdjad@df.uns.ac.rs), [borislava.petrovic@df.uns.ac.rs](mailto:borislava.petrovic@df.uns.ac.rs), [tatjana.ignjic\\_08@hotmail.com](mailto:tatjana.ignjic_08@hotmail.com), [jovana.knezevic@df.uns.ac.rs](mailto:jovana.knezevic@df.uns.ac.rs), [kristina.bikit@df.uns.ac.rs](mailto:kristina.bikit@df.uns.ac.rs), [sofija@df.uns.ac.rs](mailto:sofija@df.uns.ac.rs), [jan.hansman@df.uns.ac.rs](mailto:jan.hansman@df.uns.ac.rs), [danijel.velimirovic@df.uns.ac.rs](mailto:danijel.velimirovic@df.uns.ac.rs), [bikit@df.uns.ac.rs](mailto:bikit@df.uns.ac.rs)
- 2) Institut za onkologiju Vojvodine, Sremska Kamenica, Srbija, [borislava.petrovic@df.uns.ac.rs](mailto:borislava.petrovic@df.uns.ac.rs)
- 3) Univerzitetski klinički centar Republike Srpske, Banja Luka, BiH, [tatjana.ignjic\\_08@hotmail.com](mailto:tatjana.ignjic_08@hotmail.com)

### SADRŽAJ

U radu je simulirana emisija i distribucija zakočnog zračenja generisanog 15 MeV elektronima koji padaju na W-metu linearnog akceleratora. Na taj način, primenjen je fundamentalniji pristup u odnosu na uobičajne Monte Karlo simulacije u ovoj oblasti, koje već polaze od odgovarajuće emisije fotonske raspodele, pri čemu su dalje praćene interakcije ovog zračenja sa objektima u okolini akceleratora. Simulacije su izvršene primenom Geant4 paketa (v. 10.6), a u cilju validacije ovih simulacija izvršeno je poređenje apsorbirane doze unutar vodenog fantoma sa odgovarajućim eksperimentalnim vrednostima. Dobijeni su i analizirani simulirani spektri zakočnog zračenja na nekoliko pozicija oko akceleratora, van primarnog fotonskog snopa. Ispitivani su efekti backscattering-a usled prisustva betonskih zidova bunkera u kom je smešten akcelerator. Takođe, na osnovu zadatog elementalnog sastava betona u simulacijama, ispitivana je produkcija radioizotopa usled fotonuklearnih reakcija. Izvedeni su odgovarajući zaključci o efektima, dozi i značaju rasejanog zračenja (zračenja van primarnog fotonskog snopa) u okolini linearnog terapijskog akceleratora.

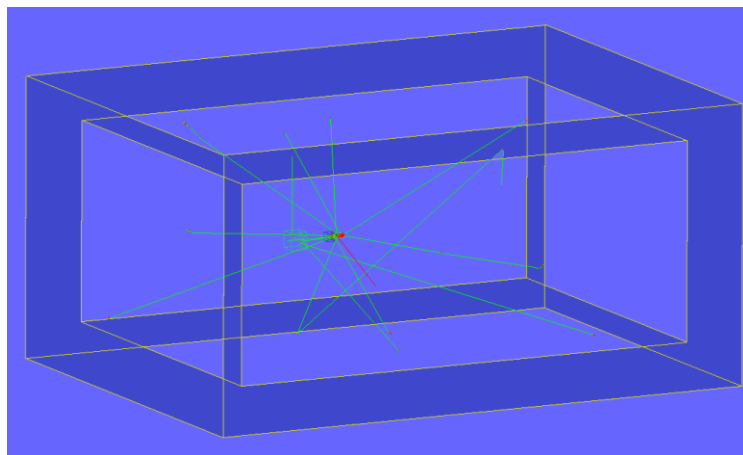
### 1. Uvod

U današnje vreme značaj i upotreba linearnih akceleratora u terapijske svrhe u medicini je izuzetno velika. Izbor maksimalne energije fotonskog snopa (6 MeV, 12 MeV, 15 MeV), njegova kolimacija i definisanje zračnog polja zavise od konkretnih terapijskih zahteva za određena tkiva, odnosno organe. Precizna isporuka odgovarajuće doze jonizujućeg zračenja određenom organu, uz minimiziranje neželjenih efekata na ostale delove organizma, predstavlja prioritet prilikom planiranja zračne terapije [1]. U tom smislu, savremeni akceleratori terapijski sistemi poseduju inkorporiran odgovarajući softver radi proračuna doze koja se isporučuje [2], pri čemu su zahtevi za preciznost ovih proračuna visoki (zahteva se međusobno odstupanje izračunatih i merenih doznih vrednosti manje od 1 %). To podrazumeva da su dobro poznate karakteristike zračnog polja unutar primarnog snopa, kao i na samoj granici ozračene površine. Sa druge strane, energetska distribucija i intenzitet sekundarnog fotonskog zračenja (rasejano zakočno zračenje [3,4] van primarnog snopa) se generalno manje istražuju i često se njihov dozni efekat na pacijenta zanemaruje. Stoga je neophodno realizovati Monte Karlo simulacije, ali i eksperimentalna merenja koja se odnose na

rasejano zakočno zračenje, odnosno dominantno efekte *backscattering*-a usled prisustva betonskih zidova bunkera u kom je smešten akcelerator. Ukoliko se u terapijske svrhe koriste fotoni energije preko 8 MeV (što odgovara tipičnoj vrednosti energije veze nukleona unutar jezgra), dolazi do fotonuklearnih procesa na materijalima koji se direktno ozračuju, što za posledicu ima generisanje neutrona i formiranje odgovarajućih radioizotopa [5]. To je razlog više zbog kojeg se mora voditi računa i o doznim efektima produkovanih neutronima, a ne samo neposredno jonizujućim zakočnim zračenjem.

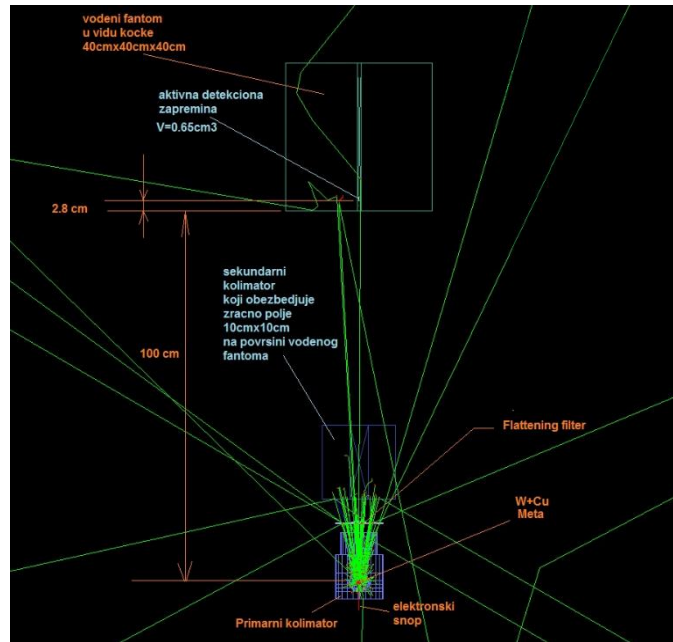
### 2. Monte Karlo simulacije i eksperimentalni rezultati

Monte Karlo simulacije postavke terapijskog linearnog akceleratora su izvršene primenom Geant4 (v. 10.6) softverskog paketa [6], pri čemu su bile aktivne i elektromagnetna i hadronska fizika u okviru *PhysicsList* fajla. Osnovne karakteristike glave akceleratora (geometrija i materijal mete, primarnog kolimatora, *field flattner*-a, sekundarnog kolimatora) odgovarale su modelu *Clinac® iX* linearnog akceleratora proizvođača Varian Medical Systems, USA. Elektroni energije 15 MeV su u simulacijama u vidu snopa padali na volframsku metu, generišući zakočno zračenje, što je odgovaralo fundamentalnijem pristupu u odnosu na slične simulacije u kojima se polazi od odgovarajuće prostorne i energetske distribucije fotonskog snopa. Ipak, kao posledicu ovo je imalo dosta dugačko vreme trajanja simulacija na standardnom PC računaru. Akcelerator u simulacijama je bio smešten u betonskom bunkeru (Slika 1) unutrašnjih dimenzija (11,47 m · 8,16 m · 4,77 m) i debljine zidova (1 m) i odgovarajućeg masenog elementalnog sastava (H 1 %, C 0,1 %, O 52,9107 %, Na 1,6 %, Mg 0,2 %, Al 3,3872 %, Si 33,7021 %, K 1,3 %, Ca 4,4 %, Fe 1,4 %), gustine 2300 kg m<sup>-3</sup>.



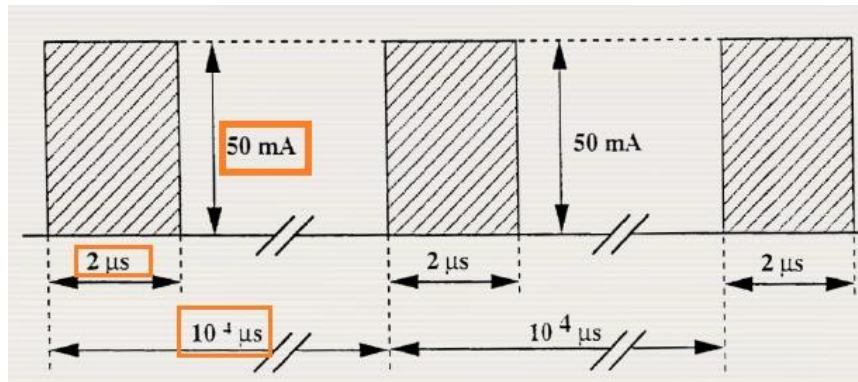
**Slika 1. Postavka glave linearnog akceleratora u betonskom bunkeru.**

Da bi se validovala primenjena simulaciona metoda, najpre je upoređen rezultat simulacija apsorbovane doze u primarnom fotonskom snopu unutar vodenog fantoma dimenzija 40 cm · 40 cm · 40 cm, na dubini od 2,8 cm ispod površine vode (od izvora/mete do mesta očitavanja doze rastojanje je iznosilo 102,8 cm), sa eksperimentalnim merenjem pri istim uslovima. Zračno polje na površini vode (i u simulacijama i u eksperimentu) je iznosilo 10 cm · 10 cm, a aktivna detekciona zapremina na pomenutoj mernoj poziciji je iznosila 0,65 cm<sup>3</sup> (Slika 2).



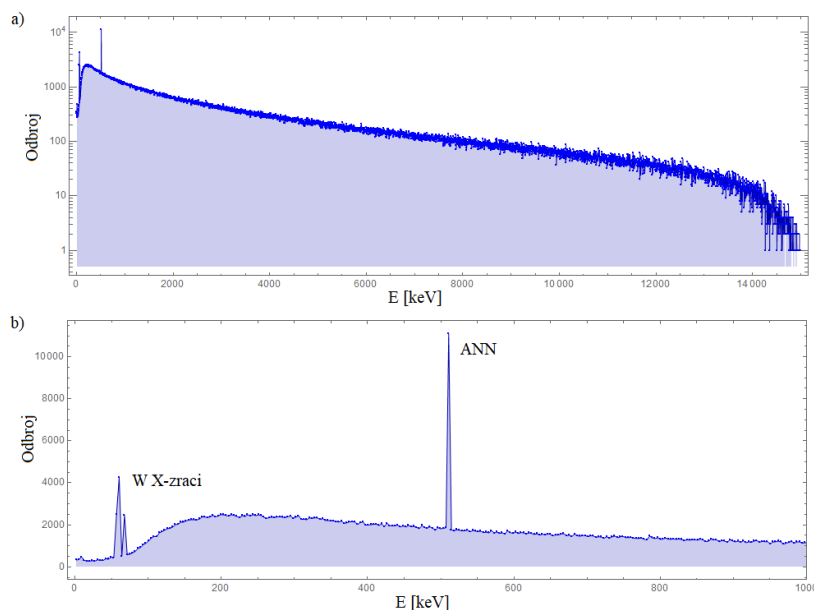
**Slika 2. Zadana geometrija glava akceleratora-fantom u simulacijama.**

Karakteristike tipičnih elektronskih impulsa koji padaju na metu akceleratora dati su na Slici 3. Imajući ovo u vidu, kao i činjenicu da je simulirana emisija ukupno  $250 \cdot 10^6$  elektrona energije 15 MeV, dobijena je doza za 100 monitorskih jedinica (vreme ozračavanja 10 s) na mestu očitavanja koja iznosi 1,004 Gy, odnosno odstupanje od 0,4 % u odnosu na eksperimentalnu vrednost od 1 Gy.



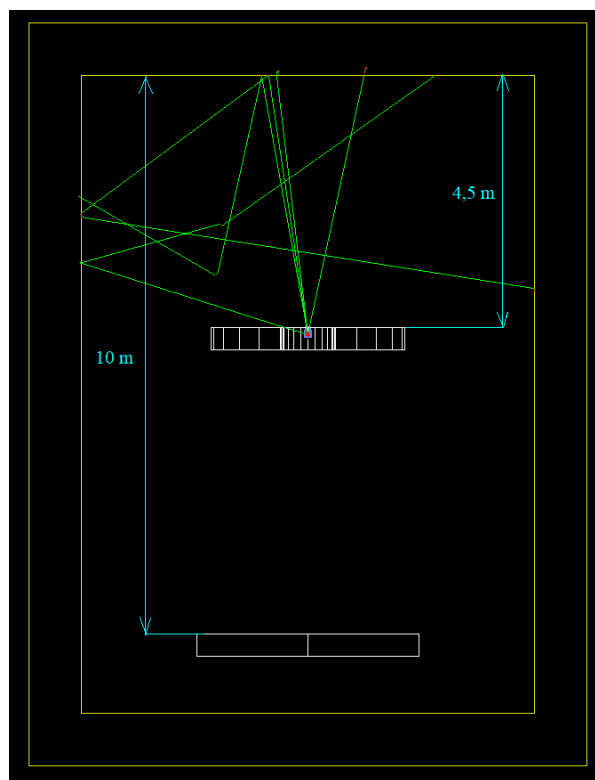
**Slika 3. Karakteristike elektronskih impulsa (amplituda impulsa 50 mA, trajanje impulsa 2  $\mu$ s, stopa ponavljanja 100 impulsa po sekundi, period  $10^4 \mu$ s).**

Dobijeni spektar primarnog zakočnog zračenja, nastao kao rezultat interakcije elektrona energije 15 MeV sa W metom, prikazan je na Slici 4. Uočava se kontinualna energetska distribucija do 15 MeV sa maksimumom na oko 230 keV. U niskoenergetskom regionu prisutna je izrazita anihilaciona linija (511 keV), kao i karakteristični X-zraci volframa ( $K_{\alpha} \approx 58$  keV,  $K_{\beta} \approx 67$  keV).

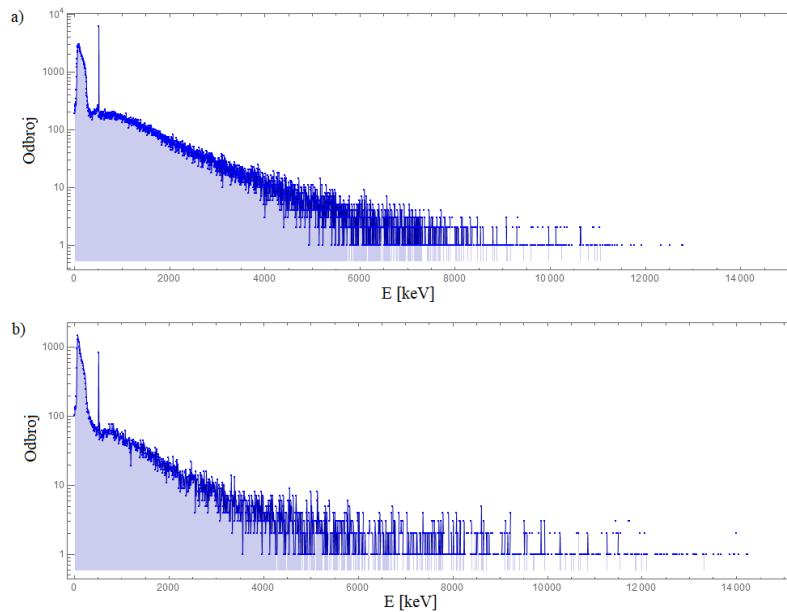


**Slika 4. Spektar primarnog zakočnog zračenja generisan interakcijom  $3 \cdot 10^6$  15 MeV elektrona sa volframskom metom (a). Niskoenergetski deo spektra do 1 MeV (b).**

Spektri rasejanog zakočnog zračenja (koje se rasejava na zidu bunkera) sa dve različite detekcione pozicije (na 4,5 m i na 10 m od površine zida na koju pada primarni snop (Slika 5)) u odnosu na glavu akceleratora prikazani su na Slici 6.



**Slika 5. Detekcione pozicije na kojima se registruje rasejano zračenje.**



**Slika 6. Spektri rasejanog zračenja na rastojanju od 4,5 m (a) i 10 m (b) od zida na kom se rasejava primarni snop.**

U tabeli 1 prikazani su formirani izotopi elemenata, uključujući i radioizotope, kao i odgovarajući nuklearni procesi nastali kao posledica interakcije direktnog snopa zakočnog zračenja sa betonskim zidom bunkera (u simulaciji je 500 000 elektrona palo na W metu).

**Tabela 1. Formirani izotopi/radioizotopi i nuklearni procesi kao posledica interakcije direktnog fotonskog snopa sa betonskim zidom bunkera dobijeni u simulaciji.**

<b>Formirani izotopi/radioizotopi</b>	<b>Izotop</b>	<b>Broj formiranih čestica/jezgara</b>
	p	3204
	d	12
	<sup>24</sup> Na	6
	<sup>41</sup> Ca	5
	<sup>40</sup> K	5
	<sup>55</sup> Fe	1
	<sup>55</sup> Mn	1
	<sup>28</sup> Al	1
	<sup>40</sup> Ar*	3
<sup>40</sup> Ar	3	
<b>Nuklearni procesi</b>	<b>Proces</b>	<b>Broj odigranih procesa</b>
	Fotonuklearni	228
	Neutronske zahvat	150
	Radioaktivni raspad	47
	Hadronsko elastično rasejanje	5541
Neelastično rasejanje neutrona	2	

\* energija pobuđenog stanja 1460,851 keV

### 3. Diskusija i zaključak

Monte Karlo simulacije Geant4 softverom uz fundamentalni pristup modeliranja interakcije elektronskog snopa sa materijalom mete se pokazao kao moćno sredstvo za ispitivanje efekata rasejanog zakočnog zračenja u okolini linearnog terapijskog akceleratora, iako je ovakav pristup zahtevao relativno duga trajanja simulacija na komercijalno dostupnim PC računarima. Naročito je značajna mogućnost dobijanja spektralne distribucije rasejanog fotonskog zračenja na različitim pozicijama u odnosu na glavu linearnog terapijskog akceleratora. Spektar zakočnog zračenja direktnog snopa dobijen u simulacijama, okarakterisan je relativno širokim maksimumom na oko 230 keV, prisustvom fluorescentnog X-zračenja volframa i izrazitom anihilacionom linijom, kao i spektralnom distribucijom koja se proteže do oko 15 MeV. Sa druge strane, iako značajno manjeg intenziteta, spektar rasejanog zračenja se proteže do oko 8 MeV i ima izrazitu niskoenergetsku kontinualnu distribuciju sa maksimumom na oko 80 keV i širine oko 170 keV. Postavkom detekcione zapremine određene mase i vodene matrice u simulacijama je moguće dobiti brzinu doze rasejanog zakočnog zračenja u zavisnosti od pozicije u bunkeru. Generisanje fotona kao posledica interakcije 15 MeV elektrona sa volframskom metom u simulacijama, a potom njihova interakcija sa betonskim zidom, dovodi, kao što je pokazano, do različitih nuklearnih procesa, odnosno formiranja odgovarajućih radioizotopa u zavisnosti od elementalnog sastava betonskog zida.

### 4. Zahvalnica

Istraživanja je finansiralo Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije (Ev. br. 451-03-9/2021-14/ 200125)

### 5. Literatura

- [1] O.E. Durán-Nava, E. Torres-García, R. Oros-Pantoja, J.O. Hernández-Oviedo, Monte Carlo simulation and experimental evaluation of dose distribution produced by a 6 MV medical linear accelerator. *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series* 1221, 2019, 012079.
- [2] J. Van Dyk, *The Modern Technology of Radiation Oncology*. Medical Physics Publishing, Madison, Wisconsin. 1999.
- [3] D. Mrdja, K. Bikit, I. Bikit, J. Slivka, S. Forkapic, J. Knezevic. Monte Carlo simulation of beta particle-induced bremsstrahlung doses. *J. Radiol. Prot.* 38, 2018, 34–47.
- [4] M.M. Alabdoaburas, J.V. Bezin, J.P. Mege, A. Veres, F. De Vathaire, D. Lefkopoulos and I. Diallo. Measurement of peripheral dose in high-energy electron beams used in external radiotherapy. *Phys. Medica* 30, 2014, 123–145.
- [5] L. Tana, R. Ciolini, E. Ciuffardi, C. Romei, F. d’Errico. Evaluation of air photoactivation at linear accelerators for radiotherapy. *J. Radiol. Prot.* 35, 2015, 239–248.
- [6] S. Agostinelli et al. Geant4—a simulation toolkit *Nucl. Instrum. Meth. A* 506, 2003, 250–303.

## MONTE CARLO SIMULATIONS OF THE BREMSSTRAHLUNG DISTRIBUTION IN THE VICINITY OF THE LINEAR 15 MEV ACCELERATOR

**Dušan MRĐA<sup>1</sup>, Borislava PETROVIĆ<sup>1,2</sup>, Tatjana IGNJIĆ<sup>1,3</sup>,  
Jovana KNEŽEVIĆ<sup>1</sup>, Kristina BIKIT<sup>1</sup>, Sofija FORKAPIĆ<sup>1</sup>,  
Jan HANSMAN<sup>1</sup>, Danijel VELIMIROVIĆ<sup>1</sup> and Ištvan BIKIT<sup>1</sup>**

- 1) *University of Novi Sad, Faculty of Sciences, Department of Physics, Novi Sad, Serbia, [mrdjad@df.uns.ac.rs](mailto:mrdjad@df.uns.ac.rs), [borislava.petrovic@df.uns.ac.rs](mailto:borislava.petrovic@df.uns.ac.rs), [tatjana.ignjic\\_08@hotmail.com](mailto:tatjana.ignjic_08@hotmail.com), [jovana.knezevic@df.uns.ac.rs](mailto:jovana.knezevic@df.uns.ac.rs), [kristina.bikit@df.uns.ac.rs](mailto:kristina.bikit@df.uns.ac.rs), [sofija@df.uns.ac.rs](mailto:sofija@df.uns.ac.rs), [jan.hansman@df.uns.ac.rs](mailto:jan.hansman@df.uns.ac.rs), [danijel.velimirovic@df.uns.ac.rs](mailto:danijel.velimirovic@df.uns.ac.rs), [bikit@df.uns.ac.rs](mailto:bikit@df.uns.ac.rs)*
- 2) *Oncology Institute of Vojvodina, Sremska Kamenica, Serbia, [borislava.petrovic@df.uns.ac.rs](mailto:borislava.petrovic@df.uns.ac.rs)*
- 3) *University Clinical Centre of the Republic of Srpska, Banja Luka, Bosnia and Herzegovina, [tatjana.ignjic\\_08@hotmail.com](mailto:tatjana.ignjic_08@hotmail.com)*

### ABSTRACT

In this paper, the emission and distribution of the bremsstrahlung radiation generated by 15 MeV electrons interacting with the W-target of the linear accelerator were simulated. In this way, the more fundamental approach was applied, in comparison with usual Monte Carlo simulations performed in this area in which the common photon distribution is assumed, following the further interaction of bremsstrahlung with the object in the vicinity of the accelerator. The simulations were performed using the Geant4 simulation package (v. 10.6), while the absorbed dose within the water phantom obtained in the simulation was compared with the experimental dose. Simulated spectra of bremsstrahlung in several positions around the accelerator, outside of the primary beam, were obtained and analyzed. The effects of backscattering caused by the presence of the concrete walls were also explored. Furthermore, based on the known composite elements of concrete, the production of radioisotopes occurring as a result of photonuclear reactions was investigated. The corresponding conclusions about effects, dose, and significance of the backscattered radiation (radiation outside of the primary photon beam) in the vicinity of the linear therapy accelerator were conducted.

## PROBLEMI SA UPOTREBOM SAVREMENE 5G TEHNOLOGIJE U REPUBLICI SRBIJI I PREPORUKE SA USKLADIVANJEM PROPISA U OBLASTI ZAŠTITE OD NEJONIZUJUĆIH ZRAČENJA

**Nebojša KRSTIĆ, Dušan MRĐA, Danijel VELIMIROVIĆ,  
Zoltan NAĐ, Ištvan BIKIT i Sofija FORKAPIĆ**

*Univerzitet u Novom Sadu, Prirodno-matematički fakultet, Departman za fiziku, Novi Sad, Srbija, [nebojsa.krstic@df.uns.ac.rs](mailto:nebojsa.krstic@df.uns.ac.rs), [mrdjad@df.uns.ac.rs](mailto:mrdjad@df.uns.ac.rs), [danijel.velimirovic@df.uns.ac.rs](mailto:danijel.velimirovic@df.uns.ac.rs), [nzolik@df.uns.ac.rs](mailto:nzolik@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)*

### SADRŽAJ

*Široka upotreba različitih vrsta električnih uređaja i njihov sve veći broj, kao i dinamičan razvoj savremenih telekomunikacionih tehnologija učinili su neophodnim kontrolu nivoa intenziteta elektromagnetnih polja u životnoj sredini, kao i zaštitu stanovništva od efekata prekomernog uticaja ovih polja. U ovom radu su predstavljene trenutne normativne vrednosti za bezbedne nivoe nejonizujućeg zračenja u Srbiji i Evropi. Nova 5G tehnologija, uprkos mnogim prednostima, takođe budi strah u društvu. 5G mreža zahteva veću gustinu baznih stanica, što je povezano sa većom koncentracijom elektromagnetnog zračenja. Zbog toga će možda biti potrebno povećati ograničenja sa restriktivnih srpskih standarda na nivo koji je Svetska zdravstvena organizacija prepoznala kao bezbedan. U radu su detaljno analizirani svi aspekti povezani sa upotrebom savremenih tehnologija zasnovanih na elektromagnetnom nejonizujućem zračenju, kao što je 5G mreža. U pogledu zaštite životne sredine od mogućih štetnih dejstava nejonizujućih zračenja, preporuka laboratorija koje sprovode ispitivanja elektromagnetskih polja je da svaki izvor nejonizujućeg zračenja u naseljenom mestu bude izvor od posebnog interesa i da podleže periodičnoj kontroli. Ukoliko na lokaciji postoji više izvora EMZ, koja ne dostižu 10%, verovatno je da će uzrokovati ukupno veće EM polje i veći ukupni faktor izloženosti u odnosu na usamljeni izvor koji prelazi 10% iznosa referentne granične vrednosti za tu frekvenciju. Ova analiza je ilustrovana na primerima sa merenja. Pored toga potrebno je jačanje kapaciteta akreditovanih Laboratorija za merenja EMZ i što veće prisustvo na terenu u razgovoru sa stanovništvom u neposrednom okruženju izvora nejonizujućeg zračenja, što je najefikasniji način otklanjanja straha kod stanovništva.*

### 1. Uvod

U protekle četiri decenije razvijeni su standardi za analogne i digitalne sisteme mobilnih telekomunikacija. Razvoj mobilnih mreža razvrstan je po tzv. generacijama koje predstavljaju evolutivni tok razvoja mobilnih mreža počev od najstarije mobilne mreže 1G (1 Generation) do danas aktuelne 5G mobilne mreže. Evolucija mobilnih mreža je stalna, prilagođava se i uvodi u ciklične obrasce. Manje efikasne mreže se uklanjaju kako bi se omogućio rad njihovog boljeg naslednika. 5G je peta i poslednja generacija mobilne tehnologije, koja je pratila svoje prethodnike: 1G (~ 1980), 2G (~ 1990), 3G (~ 2000) i 4G (~ 2010). Četvrta generacija (4G) je započela 2008. godine sa izdanjem 8 (Release 8) 3GPP standarda i od tada je doživela šest novih unapređenja u periodu od 10 godina. Polazno izdanje 8 iz 2008. godine je dobilo osnovni naziv LTE (Long-Term Evolution) za 4G tehnologiju, dok je izdanje 10 iz 2011. godine dobilo naziv LTE Advanced (LTE-A), a izdanje 13 iz 2016. je nazvano LTE Advanced Pro (4.5 G). Svi



mobilni operateri u Srbiji imaju razvijenu 4G LTE mrežu i kroz softversko ili hardversko unapređenje 4G opreme, prate nova izdanja 3GPP standarda i time unapređuju svoju 4G mrežu prema poslednjim izdanjima (LTE-A ili LTE-A Pro). Izdanje 3GPP standarda (izdanje 15) je usvojeno u decembru 2017. i dostiglo je tehničke ciljeve koji su definisani za 5G tehnologiju, pa je ovaj standard nazvan 5G New Radio (NR).

U javnosti postoji značajna zabrinutost u pogledu potencijalne veze između različitih zdravstvenih problema i izloženosti nejonizujućim zračenjima. Sa porastom broja baznih stanica mobilne telefonije i uvođenjem nove 5G tehnologije otvaraju se različita pitanja u vezi postavljanja novih antena. Deo javnosti je zainteresovan za prednosti koje nude nove tehnologije kao i kako su regulisane mere zaštite od neželjenih zračenja. Opseg od 3400 do 3800 MHz koji se razmatra za upotrebu 5G mreže je dobar kompromis između pokrivenosti i kapaciteta. Makro ćelije dugog dometa moći će se implementirati u ovom frekvencijskom opsegu kako bi se garantovalo dobro pokrivanje, a istovremeno imaju proširene propusne kapacitete potrebne za mobilne telefone velike brzine prenosa podataka. Suprotno prethodnim tehnologijama, izlaganje talasima koje stvaraju bazne stanice mobilnih telefona verovatno će varirati u zavisnosti od lokacije korisnika koji komuniciraju i od njihove upotrebe.

## 2. Pregled zakonske regulative u EU i Republici Srbiji

U Evropskoj uniji, u domenu elektromagnetnih polja i nejonizujućih zračenja se primenjuje Preporuka Saveta 1999/519/EC o ograničavanju izloženosti opšte populacije elektromagnetskim poljima (u opsegu 0 - 300 GHz) [1]. Ove granične vrednosti (Tabela 1) su u skladu sa preporukama Međunarodne komisije za zaštitu od nejonizujućih zračenja – ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) iz 1998. godine [2].

**Tabela 1. Preporuka Saveta 1999/519/EC, Referentni nivoi za električna, magnetna i elektromagnetna polja (0-300 GHz) [1].**

Frekvencija $f$	Jačina električnog polja $E$ [V/m]	Jačina magnetskog polja $H$ [A/m]	Gustina magnetskog fluksa $B$ [ $\mu$ T]	Gustina snage (ekvivalentnog ravnog talasa) [ $W/m^2$ ]
0-1 Hz	-	$3,2 \times 10^4$	$4 \times 10^4$	
1-8 Hz	10 000	$3,2 \times 10^4 / f^2$	$4 \times 10^4 / f^2$	
8-25 Hz	10 000	$4000/f$	$5 000/f$	
0,025-0,8 kHz	$250/f$	$4 / f$	$5 / f$	
0,8-3 kHz	$250/f$	5	6,25	
3-150 kHz	87	5	6,25	
0,15-1 MHz	87	$0,73/f$	$0,92/f$	
1-10 MHz	$87 / f^{1/2}$	$0,73/f$	$0,92/f$	
10-400 MHz	28	0,073	0,092	2
400-2000 MHz	$1,375 f^{1/2}$	$0,0037 f^{1/2}$	$0,0046 f^{1/2}$	$f/200$
2-300 GHz	61	0,16	0,2	10

Zakonom o zaštiti od nejonizujućih zračenja (Sl. Glasnik RS br. 36/09) uređuju se opšti uslovi i mere zaštite od dejstva nejonizujućih zračenja pri korišćenju izvora nejonizujućih zračenja u Srbiji, dok se Pravilnikom o granicama izlaganja nejonizujućim zračenjima (Sl. Glasnik RS br.104/09) propisuju bazična ograničenja i referentni granični nivoi izlaganja stanovništva električnim, magnetskim i elektromagnetskim poljima različitih frekvencija (Tabela 2) koji se odnose na zone povećane osetljivosti izvan kontrolisanih (nadziranih) oblasti – ograđenih ili obeleženih oblasti oko izvora koji je dostupan samo zaposlenim licima. Bazična ograničenja izlaganja stanovništva električnim, magnetskim i elektromagnetskim poljima (0 Hz do 300 GHz) jesu ograničenja u izlaganju vremenski promenljivim izvorima elektromagnetskih polja (niskofrekventni, visokofrekventni, uključujući radio frekvencijske, mikrotalasne i dr.), koja su zasnovana neposredno na utvrđenim zdravstvenim efektima i biološkim pokazateljima [4]. Zonama povećane osetljivosti smatraju se područja stambenih zona u kojima se ljudi mogu zadržavati i 24 sata dnevno, škole, školski/studentski/starački domovi, predškolske ustanove, porodilišta, bolnice, turistički objekti, dečja igrališta, površine neizgrađenih parcela namenjenih, prema urbanističkom planu, za navedene namene, u skladu sa preporukama Svetske zdravstvene organizacije. Pored toga, Pravilnikom o izvorima nejonizujućih zračenja od posebnog interesa, vrstama izvora, načinu i periodu njihovog ispitivanja (Službeni glasnik RS 104/09) uvodi se pojam izvora nejonizujućih zračenja od posebnog interesa koji mogu da budu štetni po zdravlje ljudi, a određeni su kao stacionarni i mobilni izvori čije elektromagnetno polje u zoni povećane osetljivosti, dostiže najmanje 10% iznosa referentne, granične vrednosti propisane **za tu frekvenciju** za koji su obavezna periodična merenja jedanput svake druge kalendarske godine.

**Tabela 2. Referentni granični nivoi elektromagnetnog zračenja propisani u Srbiji za određene frekvencije u rasponu 0-300GHz [4].**

Frekvencija $f$	Jačina električnog polja $E$ [V/m]	Jačina magnetskog polja $H$ [A/m]	Gustina magnetskog fluksa $B$ [ $\mu$ T]	Gustina snage (ekvivalentnog ravnog talasa) [ $W/m^2$ ]	Vreme uprosečanja $t$ [minute]
< 1 Hz	5 600	12 800	16 000		*
1-8 Hz	4 000	$12\,800 / f^2$	$16\,000 / f^2$		*
8-25 Hz	4 000	$1\,600/f$	$2\,000/f$		*
0,025-0,8 kHz	$100/f$	$1,6 / f$	$2 / f$		*
0,8-3 kHz	$100/f$	2	2,5		*
3-100 kHz	34,8	2	2,5		*
100-150 kHz	34,8	2	2,5		6
0,15-1 MHz	34,8	$0,292/f$	$0,368/f$		6
1-10 MHz	$34,8 / f^{1/2}$	$0,292/f$	$0,368/f$		6
10-400 MHz	11,2	0,0292	0,0368	0,326	6
400-2000 MHz	$0,55 f^{1/2}$	$0,00148 f^{1/2}$	$0,00184 f^{1/2}$	$f/1250$	6
2-10 GHz	24,4	0,064	0,08	1,6	6
10-300 GHz	24,4	0,064	0,08	1,6	$68/f^{1,05}$

Ukupni faktor izlaganja pri maksimalnoj jaćini elektrićnog polja za sve servise, kao i GSM900/1800 i UMTS baznu stanicu kada su aktivni kontrolni i svi saobraćajni kanali je takođe bitan. Termićki efekti relevantni iznad 100kHz procenjuju se prema formuli 1, dok se ukupan faktor izlaganja procenjuje prema formuli 2 prema standardnoj metodi SRPS EN 62232 – B.6:

$$\sum_{i=100\text{kHz}}^{1\text{MHz}} \left( \frac{E_i}{c} \right)^2 + \sum_{i>1\text{MHz}}^{300\text{GHz}} \left( \frac{E_i}{E_{L,i}} \right)^2 \leq 1 \quad (1)$$

$$\sum_{i>1\text{MHz}}^{300\text{GHz}} \left( \frac{E_i}{E_{L,i}} \right)^2 \leq 1 \quad (2)$$

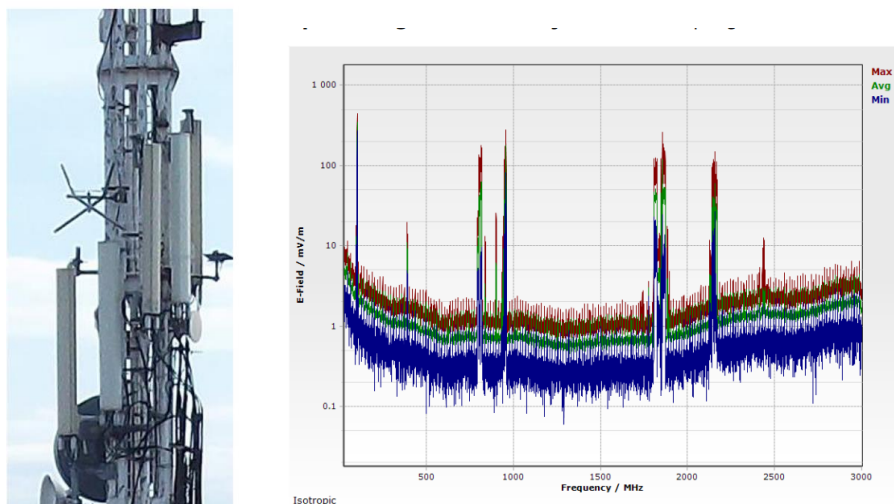
gde su  $E_i$  -jaćina elektrićnog polja izmerena na frekvenciji  $i$  i  $E_{L,i}$  - referentni nivo elektrićnog polja iz Pravilnika o granicama izlaganja nejonizujućem zraćenju (Sl.glasnik RS 104/09), dok  $c$  ima vrednost  $87/f^{1/2}$  V/m.

Poređenjem granićnih vrednosti iz Tabele 1 i 2 moţe se primetiti da su naše vrednosti skoro 2,5 puta niţe od evropskih i međunarodnih preporuka. Primeri nekih od zemalja EU koje nisu direktno primenile referentne granićne nivoe propisane od strane ICNIRP su: Italija - zakonom iz 2001. propisana je granićna vrednost elektrićnog polja na otvorenom od 20 V/m, odnosno od 6 V/m u zgradama gde se boravi duţe od 4 sata i prometnim mestima na otvorenom, Grćka - zakonom iz 2012. propisane su vrednosti na nivou 60% propisanih od ICNIRP za bazne stanice na manje od 300 m od vrtića, škola, bolnica i staraćkih domova (na ovim objektima ne mogu biti locirane bazne stanice). Za ostale oblasti propisane su granice na nivou 70% ICNIRP granica, ali su u praktićnoj primeni primenjeni restriktivniji nivoi, Belgija - razne regije imaju razne nivoe ali su svi stroţi od ICNIRP, na primer za Brisel 6 V/m na 900 MHz, u Flandriji 20 V/m itd i Hrvatska - dozvoljeni nivoi gustine snage su 16% od onih propisanih od strane ICNIRP [5].

### 3. Primer ispitivanja izvora nejonizujućih zraćenja

Pri simultanom izlaganju poljima sa razlićitim frekvencijama mora se uzeti u obzir mogućnost zbirnih efekata tim izlaganjima. U ovom radu dat je primer ispitivanja predmetnog izvora zraćenja na koji su montirane antene od dva operatera. Detaljna merenja se vrše na frekvencijama predmetnog i relevantnih izvora zraćenja spektralnim analizatorom SRM3006 sa softverom za demodulaciju signala, proizvođaća NARDA i antenom Three-axis antenna (E-field) 3501/03 (opseg 27 MHz -3 GHz) prema internim procedurama i standardnim metodama [6, 7, 8 i 9]. Širokopoljnim mernim instrumentom sa izotropnom antenom (portabl uređaj za merenje jaćine polja model PMM 8053B, proizvođaća NARDA i sondom EP 300 – opseg 100 kHz-3 GHz), na visini od 1.5 m prvobitno se skenira cela određena zona radi utvrđivanja taćke, a kasnije i Merne Pozicije u kojoj je nivo EM polja najveći.

Rezultati ispitivanja preliminarnog merenja jaćine ukupnog elektrićnog polja u taćkama ispitivanja prikazani su u Tabeli 3, gde su  $E_{uk}$  – ukupna jaćina elektrićnog polja u taćki ispitivanja i  $\Delta E_{uk}$  –merna nesigurnost jaćine elektrićnog polja (u intervalu poverenja 95%).



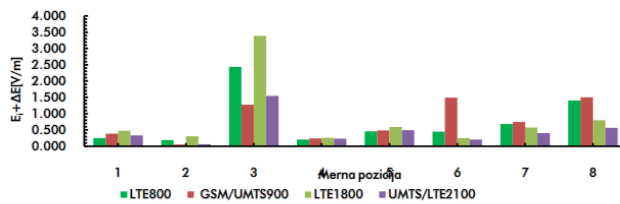
**Slika 1. Izgled izvora predmetnog ispitivanja - levo i spektar emitovanog zračenja - desno.**

**Tabela 3. Jačina ukupnog izmerenog električnog polja po tačkama ispitivanja.**

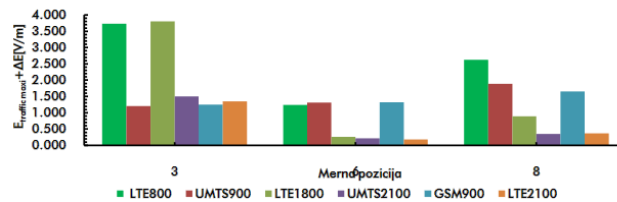
Merna pozicija	$E_{uk}$ [V/m]	$\pm\Delta E_{uk}$ [V/m]
1	1.557	0.498
2	0.858	0.275
3	6.390	2.045
4	1.330	0.426
5	1.799	0.576
6	2.797	0.895
7	2.186	0.700
8	4.436	1.420

Procena maksimalnog električnog polja tj. ekstrapolacija po kanalima, vršena je za merne pozicije 3, 6 i 8. Izbor mernih pozicija za koje je proračunata maksimalna vrednost električnog polja vršen je na osnovu kriterijuma: tačka ispitivanja se nalazi u zoni povećane osetljivosti, ili u neposrednoj blizini pomenute zone, u kojoj je izmerena najveća ukupna vrednost jačine električnog polja za posmatrani sektor. Ako su maksimalno izmerene vrednosti ukupnog faktora izloženosti (TER) iznad 0.05 tj. 22% od granične vrednosti smatra se da na Mernoj Poziciji postoje relevantni izvori (RS) i prema međunarodnom standardu [9] treba izvršiti detaljna merenja. Predmetni izvor merenja (EUT) tada se smatra relevantnim izvorom (RSEUT) u svim Mernim Pozicijama nezavisno od dobijenih rezultata gore navedenih merenja i biće uvek detaljno meren. Ekstrapolacija električnog polja  $E_{traffic\ max}$  se vrši preko kontrolnih kanala za GSM mobilnu mrežu ili demodulacijom pilot kanala za UMTS mobilnu mrežu, koji su stalno aktivni i emituju se pri konstantnoj maksimalnoj snazi. Za LTE mobilnu mrežu koristi se trenutno izmereni referentni signal RS Pilot. Za merenje RS(lte) Pilot-a mora se koristiti instrument/program sa LTE dekodrom.

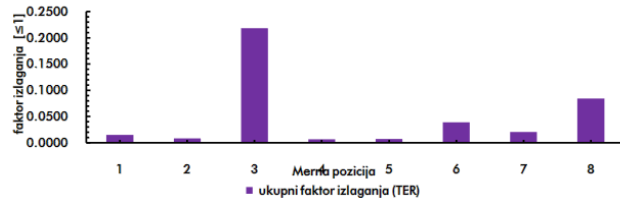
Grafikon 1



Grafikon 2



Grafikon 3



**Slika 2. Izmerene vrednosti električnog polja sa mernom nesigurnošću – Grafikon 1; maksimalno procenjene vrednosti sa mernom nesigurnošću – Grafikon 2 i ukupni faktori izlaganja pri maksimalnom opterećenju i sa mernom nesigurnošću– Grafikon 3 na svim mernim pozicijama.**

Upoređivanjem izmerenih i maksimalnih vrednosti jačine električnog polja (Slika2 - grafikon 1 i grafikon 2) sa graničnim vrednostima za sve relevantne izvore (RS i RSEUT) može se zaključiti da izmerene vrednosti sa mernom nesigurnošću na svim mernim pozicijama NE PRELAZE referentne granične nivoe. Izmerene vrednosti jačine električnog polja sa mernom nesigurnošću na mernoj poziciji 3 za LTE800 i LTE1800 PRELAZE vrednost koja iznosi 10% referentnih graničnih nivoe. Takođe, maksimalne procenjene vrednosti jačine električnog polja sa mernom nesigurnošću na mernoj poziciji 3 i 8 PRELAZE vrednost koja iznosi 10% referentnih graničnih nivoe. Međutim, ukupni faktor izlaganja (grafikon 3) NE PRELAZI referentne granične nivoe. Na osnovu dobijenih rezultata može se zaključiti da ukupno elektromagnetno polje u ispitanom opsegu 27MHz – 3GHz zadovoljava uslove Pravilnika o granicama izlaganja nejonizujućim zračenjima (Sl. Glasnik RS br.104/09), ali ne i uslove Pravilnika o izvorima nejonizujućih zračenja od posebnog interesa, vrstama izvora, načinu i periodu njihovog ispitivanja (Službeni glasnik RS 104/09) u pogledu izlaganja stanovništva, u svim ispitnim tačkama. Ako se primeni kriterijum za ukupni faktor izloženosti (ER) od 0.05, tada se pozicije 3 i 8 jasno izdvajaju kao značajni izvori za periodičnu kontrolu.

### 4. Diskusija i zaključak

Problem kod uvođenja 5G tehnologije je da se još uvek ne zna kako uspostaviti granične vrednosti pa samim tim ni kako ispitivati tako nastalo EM zračenje. Kontinuirano praćenje nivoa elektromagnethih polja ne može da služi za ispitivanja konkretnih baznih stanica. Takve zaključke daju Laboratorije akreditovane po međunarodnim standardima gde se jasno navode metodologije merenja, zahtevi za opremom, stručnim kadrom itd. Takođe, smatramo da kriterijum od 10% graničnih vrednosti za pojedinačnu frekvenciju nije dovoljan uslov da se izvor okarakteriše kao izvor od posebnog interesa jer primeri iz prakse pokazuju da tada nije uzet u obzir simultani efekat više antenna na jednoj lokaciji koji može da se odrazi samo kroz factor ukupnog izlaganja. U pogledu zaštite životne sredine od mogućih štetnih dejstava nejonizujućih zračenja bolje bi bilo da je svaki izvor EMZ u neseljenom mestu izvor od posebnog interesa i da podleže periodičnoj kontroli. Uz povećanje graničnih vrednosti i uslova od 10% za izvor od posebnog interesa bi dovelo do toga da se veoma mali broj (možda nekoliko desetina) izvora kontroliše, što bi imalo za posledicu veću uznemirenost stanovništva, koje je i danas veoma uznemireno i u strahu. Veće prisustvo stručnih timova na terenu u razgovoru sa ljudima u neposrednom okruženju izvora EM zračenja je najefikasniji način otklanjanja straha kod stanovništva.

### 5. Zahvalnica

Istraživanja je finansiralo Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije (Ev. br. 451-03-9/2021-14/ 200125).

### 6. Literatura

- [1] 1999/519/EC: Council recommendation of 12 July 1999 on the limitation of exposure of the general public to electromagnetic fields (0 Hz to 300 GHz).
- [2] ICNIRP GUIDELINES FOR LIMITING EXPOSURE TO TIME-VARYING ELECTRIC, MAGNETIC AND ELECTROMAGNETIC FIELDS (UP TO 300 GHZ) PUBLISHED IN: HEALTH PHYSICS 74 (4):494-522; 1998
- [3] Zakon o zaštiti od nejonizujućih zračenja (Sl. Glasnik RS br. 36/09)
- [4] Pravilnik o granicama izlaganja nejonizujućim zračenjima (Sl. Glasnik RS br.104/09)
- [5] NALED Analiza – Regulatorni okvir i praksa za izgradnju mreže baznih stanica mobilne telefonije, jul 2021.
- [6] SRPS EN 50413:2010 Osnovni standard za procedure merenja i izračunavanja izlaganja ljudi električnim, magnetskim i elektromagnetskim poljima (0 Hz – 300 GHz),
- [7] SRPS EN 50413:2010/A1:2014 Osnovni standard za procedure merenja i izračunavanja izlaganja ljudi električnim, magnetskim i elektromagnetskim poljima (0 Hz – 300 GHz) – Izmena 1,
- [8] SRPS EN 61566:2009 Merenje izlaganja radiofrekvencijskim elektromagnetskim poljima - Jačina polja u opsegu frekvencija od 100 kHz do 1 GHz i
- [9] SRPS EN 62232:2017 Određivanje jačine RF polja, gustine snage i SAR u blizini radiokomunikacionih baznih stanica radi procene izlaganja ljudi.

## PROBLEMS WITH THE USE OF MODERN 5G TECHNOLOGY IN THE REPUBLIC OF SERBIA AND RECOMMENDATIONS WITH HARMONIZATION OF REGULATIONS IN THE FIELD OF PROTECTION AGAINST NON-IONIZING RADIATION

**Nebojša KRSTIĆ, Dušan MRĐA, Danijel VELIMIROVIĆ,  
Zoltan NAĐ, Ištvan BIKIT and Sofija FORKAPIĆ**

*University of Novi Sad, Faculty of Sciences, Department of Physics, Novi Sad, Serbia,  
[nebojsa.krstic@df.uns.ac.rs](mailto:nebojsa.krstic@df.uns.ac.rs), [mrdjad@df.uns.ac.rs](mailto:mrdjad@df.uns.ac.rs), [danijel.velimirovic@df.uns.ac.rs](mailto:danijel.velimirovic@df.uns.ac.rs),  
[nzolik@df.uns.ac.rs](mailto:nzolik@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)*

### ABSTRACT

Widespread use of great number of electrical devices, as well as the dynamic development of modern telecommunications technologies has made it necessary to control the intensity levels of electromagnetic fields in the environment and protect the population from the effects of these fields. In this paper current normative values for safe levels of non-ionizing radiation in Serbia and Europe are presented and compared. The new 5G technology, despite its many advantages, also arouses fear in society. The 5G network requires a higher density of base stations, which is associated with a higher concentration of electromagnetic radiation. Therefore, it may be necessary to increase the limits from restrictive Serbian standards to a level recognized by the World Health Organization as a safe. Insufficient education and often misinformation of the general population leads to the population's fear of electromagnetic radiation and to increasing resistance to the development of mobile networks. The paper analyzes in detail all aspects related to the use of modern technologies based on electromagnetic non - ionizing radiation, such as the 5G network. Regarding the protection of the environment from the possible harmful effects of non-ionizing radiation, the recommendation of laboratories conducting electromagnetic field tests is that any source of non-ionizing radiation in an inhabited place should be a source of special interest and subject of periodic control. If there are multiple EMF sources at the site, which do not reach 10% of limit, it is likely to cause an overall higher EM field and a higher total exposure factor compared to a single source exceeding 10% of the reference limit value for that frequency. This analysis is illustrated by examples of in-situ measurements. The presence of expert teams in the field in the immediate vicinity of non-ionizing radiation sources and their conversations with the population, is the most efficient way to eliminate fear among the population.

## APSORBOVANA SPECIFIČNA ENERGIJA RADIOFREKVENTNOG ZRAČENJA

Marko MILOŠEVIĆ i Nenad STEVANOVIĆ

Univerzitet u Kragujevcu, Prirodno-matematički fakultet, Kragujevac, Srbija,  
[marko.milosevic@pmf.kg.ac.rs](mailto:marko.milosevic@pmf.kg.ac.rs), [nenad.stevanovic@pmf.kg.ac.rs](mailto:nenad.stevanovic@pmf.kg.ac.rs)

### SADRŽAJ

*U ovom radu razvijen je programski kod za simulaciju prostiranja EM talasa kroz materijalnu sredinu. Osobine sredine kroz koju se prosire talas se mogu definisati parametrima kao što su relativna dielektrična i magnetna konstanta, specifična provodnost, gustina, i slično. Model koji je primenjen u ovom radu baziran je na diskretizaciji i rešavanju vremenski zavisnih Maksvelovih jednačina u diferencijalnom obliku. Programski kod je primenjen za računanje apsorbirane specifične energije radiofrekventnog (RF) zračenja kroz ljudsku glavu. Računata je apsorbirana energija zračenja za različite frekvencije i pokazano je da se najveći deo energije apsorbira u koži.*

### 1. Uvod

Radiofrekventno zračenje (RF) predstavlja deo spektra EM talasa u opsegu frekvencija od 3 kHz do 300 GHz. Izvori RF zračenja mogu biti prirodni i veštački. U prirodne izvore spadaju: atmosferska polja, elektromagnetna polja Zemlje i kosmička zračenja. U veštačke izvore ubrajaju se predajne antene radio i TV stanica, bazne stanice mobilnih telefona i najzastupljeniji veštački izvori su mobilni telefoni. U savremenom društvu pametni telefon je neophodan uređaj, pa je uticaj RF zračenja od mobilnih telefona još uvek predmet istraživanja [1,2].

Dugo vremena se smatralo da jedini efekat koji proizvode RF zračenja je termalni. Pokazuje se da postoje efekti koji nisu termalni, za koje su potrebni manji intenziteti polja i koji su daleko značajniji od termalnog. Pokazano je da postoje i pozitivni efekti zračenja. Glavne svetske organizacije i dalje negiraju netermalne efekte i svoje preporuke u zaštiti od zračenja baziraju na termalnom efektu [3].

Veličina koja najbolje opisuje efekat zračenja na biološke sisteme je specifična apsorbirana energija (SAR – specific absorbed rate) i predstavlja apsorbiranu energiju RF zračenja po jedinici masene gustine sredine

$$SAR = \frac{\sigma E^2}{\rho} \quad (1)$$

gde je  $\sigma$  specifična provodnost sredine (S/m),  $\rho$  je gustina sredine (kg/m<sup>3</sup>), a E je amplituda električnog polja (V/m) od RF zračenja u datoj tački sredine. Jedinica za SAR je W/kg [3].

Jedan od načina da se odredi SAR u biološkim sistemima je merenjem promene telesne temperature termovizijskom kamerom [4]. S druge strane, u velikom broju radova prvo se računa SAR, iz čega se posledično izvodi porast temperature [5–9].

Modeli ljudskih organa se mogu formirati na osnovu snimanja magnetnom rezonancom (MRI). Druga istraživanja koriste jednostavan dizajn ljudskog modela, preko cilindričnog ili sfernog oblika. Trodimenzionalni pristup zahteva dosta vremena



računanja i memorijskog prostora u računaru, pa se mnogi simetrični problemi mogu svesti na 2D.

U ovoj radu razvijen je programski kod za modelovanje prostiranja RF zračenja kroz 2D sredine na osnovu rešavanja vremenski zavisnih Maksvelovih jednačina, koje se numerički rešavaju na bazi FDTD metoda (FiniteDiference Time Domain). Programski kod je primenjen za simulaciju prostiranja RF kroz ljudsku glavu, izloženu zračenju mobilnog telefona. Glava je podeljena u tkiva, slojeve i na osnovu poznatih parametara svakog tkiva, određena je raspodela SAR. Rezultati dobijeni u ovom radu se dobro slažu sa rezultatima publikovanim u [3,11].

## 2. Primena FDTD metoda za prostiranje RF zračenja

FDTD metod je jedan od najjednostavnijih metoda za rešavanje složenih problema iz oblasti elektromagnetizma [12]. Za korišćenje ovog metoda neophodno je napisati vremenski zavisne Maksvelove jednačine u diferencijalnom obliku. U ovom radu za razvijanje programskog koda korišćene su sledeće Maksvelove jednačine [2],

$$-\sigma_m \mathbf{H} - \mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} = \nabla \times \mathbf{E} \quad (2)$$

$$\sigma \mathbf{E} + \varepsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = \nabla \times \mathbf{H} \quad (3)$$

pri čemu električno polje ima samo z komponentu, i menja se duž x i y ose. Skalarnе jednačine za (2) i (3) su:

$$-\sigma_m H_x - \mu \frac{\partial H_x}{\partial t} = \frac{\partial E_z}{\partial y}, \quad (4)$$

$$\sigma_m H_y + \mu \frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{\partial E_z}{\partial x}, \quad (5)$$

$$\sigma E_z + \varepsilon \frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y}. \quad (6)$$

U FDTD metodu prostor i vreme se diskretizuju, prostorni i vremenski izvodi koji se pojavljuju u Maksvelovim jednačinama zamenjuju se konačnim razlikama, pa se iz jednačina (4), (5) i (6) dobijaju jednačine u kojima su električno i magnetno polje u određenom vremenskom koraku izraženi preko električnog i magnetnog polja u prethodnom vremenskom koraku [12]:

$$H_x^{q+\frac{1}{2}} \left[ m, n + \frac{1}{2} \right] = \frac{1 - \frac{\sigma_m \Delta t}{2\mu}}{1 + \frac{\sigma_m \Delta t}{2\mu}} H_x^{q-\frac{1}{2}} \left[ m, n + \frac{1}{2} \right] - \frac{1}{1 + \frac{\sigma_m \Delta t}{2\mu}} \frac{\Delta t}{\mu \Delta y} (E_z^q [m, n+1] - E_z^q [m, n]) \quad (7)$$

$$H_y^{q+\frac{1}{2}} \left[ m + \frac{1}{2}, n \right] = \frac{1 - \frac{\sigma_m \Delta t}{2\mu}}{1 + \frac{\sigma_m \Delta t}{2\mu}} H_y^{q-\frac{1}{2}} \left[ m + \frac{1}{2}, n \right] + \frac{1}{1 + \frac{\sigma_m \Delta t}{2\mu}} \frac{\Delta t}{\mu \Delta x} (E_z^q [m+1, n] - E_z^q [m, n]) \quad (8)$$

$$\begin{aligned}
 E_z^{q+1}[m,n] = & \frac{1 - \frac{\sigma \Delta t}{2\varepsilon}}{1 + \frac{\sigma \Delta t}{2\varepsilon}} E_z^q[m,n] + \frac{1}{1 + \frac{\sigma \Delta t}{2\varepsilon}} \frac{\Delta t}{\varepsilon \Delta x} \left( H_y^{q+\frac{1}{2}} \left[ m + \frac{1}{2}, n \right] - H_y^{q+\frac{1}{2}} \left[ m - \frac{1}{2}, n \right] \right) \\
 & - \frac{1}{1 + \frac{\sigma \Delta t}{2\varepsilon}} \frac{\Delta t}{\varepsilon \Delta y} \left( H_x^{q+\frac{1}{2}} \left[ m, n + \frac{1}{2} \right] - H_x^{q+\frac{1}{2}} \left[ m, n - \frac{1}{2} \right] \right)
 \end{aligned} \quad (9)$$

gde su  $\Delta x$  i  $\Delta y$  prostorni koraci duž x i y ose, respektivno,  $\Delta t$  vremenski korak, a  $m$ ,  $n$  i  $q$  su celobrojne vrednosti koje označuju broj koraka i odgovaraju  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  i  $\Delta t$ , respektivno. Čvorovi električnog polja nalaze se na celobrojnim vrednostima prostornih koraka, dok su čvorovi obe komponente magnetnog polja pomereni za pola prostornog koraka u odnosu na čvorove električnog polja. Električno polje postoji u trenucima koji su jednaki celobrojnim vrednostima vremenskog koraka, dok obe komponente magnetnog polja postoje u trenucima pomerenim za pola vremenskog koraka u odnosu na trenutke postojanja električnog polja. U konciznoj formi, preko matrica, prethodni set jednačina postaje [12]

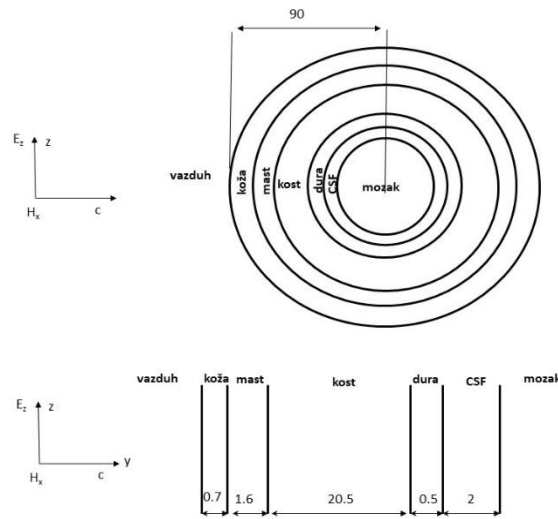
$$\begin{aligned}
 H_x[m,n] &= C_{hxh}[m,n] H_x[m,n] - C_{hxe} \left( E_z[m,n+1] - E_z[m,n] \right) \\
 H_y[m,n] &= C_{hyh}[m,n] H_y[m,n] + C_{hye} \left( E_z[m+1,n] - E_z[m,n] \right) \\
 E_z[m,n] &= C_{eze}[m,n] E_z[m,n] + \\
 & C_{ezh}[m,n] \left( \left( H_y[m,n] - H_y[m-1,n] \right) - \left( H_x[m,n] - H_x[m,n-1] \right) \right)
 \end{aligned} \quad (10)$$

Za definisanje 2D mreže koja ima konačan broj čvorova, a ponaša se kao da je beskonačna (da se što manje energije reflektuje nazad u unutrašnjost mreže) korišćeni su ABC's granični uslovi drugog reda (Absorbing boundary conditions). U slučaju ABC's uslova drugog reda, za definisanje električnog polja u čvoru na granici u određenom trenutku, potrebne su vrednosti električnih polja u tom trenutku u dva susedna unutrašnja čvora, kao i vrednosti električnih polja u tom graničnom čvoru i dva susedna unutrašnja čvora u prethodna dva vremenska koraka. Za svaki vremenski korak se računaju električno i magnetno polje u svakom čvoru 2D materijalne sredine, pri čemu se broj koraka može definisati u programu. Prethodno opisani postupak omogućava simulaciju prostiranja EM talasa kroz materijalnu sredinu, i računanje apsorbirane specifične energije radiofrekventnog zračenja. U programu se mogu definisati frekvencija, relativna dielektrična konstanta, relativna magnetna konstanta, provodljivost sredine, magnetna provodljivost, veličina sredine (broj čvorova po x i y osi), prostorni i vremenski korak.

### 3. Model ljudske glave i geometrija ozračivanja

U mnogim radovima glava je modelovana kao sistem sačinjen od koncentričnih kružnica u 2D. Svaka kružnica predstavlja jedno tkivo. Na slici 1 je šematski prikazan slojevit model ljudske glave, sačinjen od kože, masti, lobanje (kosti), dure, SCF i mozga. Svako tkivo se karakteriše relativnom električnom konstantom i specifičnom provodnošću za datu frekvenciju EM talasa (dati su u tabeli 1). Na slici 1 su date dimenzije svakog sloja izražene u mm.

EM talas pada na površ glave u smeru yose, tako da je vektor električnog polja u pravcu z-ose, dok vektor magnetog polja osciluje u pravcu xose koordinatnog sistema predstavljenog na slici 1.



**Slika 1. Model ljudske glave za računanje SAR.**

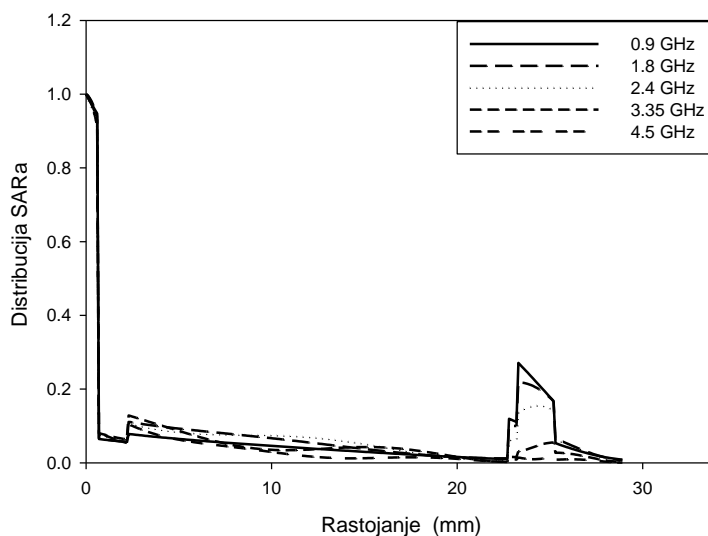
Da bi se izvršila simulacija formirana je 2D mreža od 340x340 segmenta po y i z osi. Veličina svakog segmenta je  $dx=dy=0.1$  mm, a vremenski korak  $dt=dx/(2c_0)$ . Smatrano je da je izvor na rastojanju od 1 cm od glave, čiji se vektor električnog polja menja kao  $E_z = E_0 \cos(\omega t)$ , gde je  $\omega$  kružna učestanost, t vreme, a  $E_0$  amplituda električnog polja.

**Tabela 1. Parametri slojeva (tkiva) ljudske glave [3,11].**

Tkivo	Gustina $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	0,9 GHz		1,8 GHz		2,4 GHz		3,35 GHz		4,5 GHz	
		$\epsilon_r$	$\sigma$ (S/m)	$\epsilon_r$	$\sigma$ (S/m)	$\epsilon_r$	$\sigma$ (S/m)	$\epsilon_r$	$\sigma$ (S/m)	$\epsilon_r$	$\sigma$ (S/m)
Koža	1100	41,4	0,87	38,9	1,18	38,1	1,44	37,14	1,93	36,18	2,68
Mast	920	5,46	0,05	5,34	0,07	5,29	0,102	5,18	0,14	5,076	0,21
Kost	1850	12,45	0,14	11,8	0,28	11,41	0,38	10,87	0,58	10,28	0,84
Dura	1050	44,4	0,96	42,9	1,32	42,1	1,64	40,9	2,25	39,47	3,15
CSF	1060	68,7	2,41	67,2	2,92	66,3	3,41	64,83	4,39	62,85	5,87
Mozak	1030	45,8	0,77	43,5	1,15	42,6	1,48	41,34	2,11	39,91	3,03

#### 4. Rezultati i diskusija

Na osnovu FDTD metoda koji je opisan u poglavlju 2, razvijen je programski kod kojim se simulira prostiranje RF zračenja kroz model ljudske glave. Programski kod omogućuje da se unese frekvencija RF zračenja, snaga i oblik izvora i njegovo rastojanje od glave. U ovom radu izvor RF zračenja je postavljen dovoljno daleko da se prema glavi prostire ravanski talas, tako da je komponenta električnog polja talasa tangencijalna na graničnu površ. Set jednačina (11) u početnom trenutku  $t=0$ , je računat iterativnim putem za svaki segment 2D mreže koordinata, a zatim postupak ponavljen u narednim vremenskim intervalima, sa vremenskim korakom  $dt$ .



**Slika 2. Raspodela specifične apsorbovane energija RF zračenja u glavi.**

Kao rezultat programskog koda računa se apsorbovana energija RF zračenja u svakom sloju glave, prema relaciji (1). Apsorbovane energije su računate za frekvencije 0.9 – 4.5 GHz i normirane raspodele prikazane na Slici 2.

Sa slike se vidi da je maksimalna apsorbovana energija RF zračenja u sloju kože, za sve razmatrane frekvencije. Kroz dalje slojeve, apsorbovane energije su znatno manje i opadaju sa dubinom prodiranja. Izuzetak je sloj CSF, koji se nalazi ispred mozga i karakteriše se znatno većom provodnošću od ostalih slojeva. Sa grafika se vidi da apsorbovana energija opada sa porastom frekvencije zračenja.

## 5. Zaključak

Računanje specifične apsorbovane energije RF zračenja u biološkim sistemima se jednostavno može izvesti FDTD metodom. Razvijen program se može primeniti sve geometrije ljudskih organa: model koncentričnih sfera (model glave), model aksijalnih cilindara (model trupa, ruke, noge). Ovakav pristup omogućuje da se izvrši procena deponovane energije u svim organima ljudskog organizma i proceni rizik po zdravlje.

## 6. Zahvalnica

Ovaj rad je podržan od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja (broj ugovora: 451-03-9/2021-14/200122).

## 7. Literatura

- [1] Đorđević. Osnovi elektrotehnike, Elektrostatika, Akademska misao, Beograd, 2009.
- [2] A. Đorđević. Osnovi elektrotehnike, Elektromagnetizam, Akademska misao, Beograd, 2009.
- [3] Z.M. Lwin, M. Yokota. Numerical analysis of SAR and temperature distribution in two dimensional human head model based on FDTD parameters and the polarization of electromagnetic wave. *International Journal of Electronics and Communications*, 104, 2019, 91-98.

- [4] M.A. Bhat, V. Kuma. Calculation of SAR and measurement of temperature change of human head due to the mobile phone waves at frequencies 900 MHz and 1800 MHz. *Adv. Phys Theories Appl*, 16, 2013, 54–63.
- [5] A. Siritwipreecha, P. Rattanadecho, T. Wessapan. The influence of wave propagation mode on specific absorption rate and heat transfer in human body exposed to electromagnetic wave. *Int J Heat Mass Transf.*65, 2013, 423–34.
- [6] J. Wang, O. Fujiwara. FDTD computation of temperature rise in the human head for portable telephones. *IEEE Trans Microw Theory Tech*47, 1999,1528–34.
- [7] A. Hirata, K. Shirai, O. Fujiwara. On averaging mass of SAR correlating with temperature elevation due to a dipole antenna. *Progress in Electromag Res, PIER*84, 2008, 221–37.
- [8] O. Takifumi, H. Yuki, T. Shinobu. Incident angle characteristic of SAR in two-dimensional three-layered ellipse human model exposed to EM plane waves. *Electron Commun Japan*,85, 2002, 221-229.
- [9] S. Nishizawa, O. Hashimoto. Effectiveness analysis of lossy dielectric shields for a three-layered human model. *IEEE Tranfs Microwave Theory Tech.* 47, 1999, 277–286.
- [10] Alisoy HZ. An FDTD based numerical analysis of microwave propagation properties in a skin-fat tissue layers. *Optik J* 2013;124(21):5218–24.
- [11] A.I. Sabbah, , N.I. Dib, M.A. Al-Nimr. Evaluation of specific absorption rate and temperature elevation in a multi-layered human head model exposed to radio frequency radiation using the finite-difference time domain method. *IET Microw. Antennas Propag.*5, 2011, 1073–1080.
- [12] D.M. Sullivan, *Electromagnetic simulation using Finite-Difference Time-Domain Method* Institute of electrical and electronics engineering, Inc New York, 2020.

**SPECIFIC ABSORBED RATE OF RADIOFREQUENTLY RADIATION**

**Marko MILOŠEVIĆ and Nenad STEVANOVIĆ**

*University of Kragujevac, Faculty of Science, Kragujevac, Serbia,  
[marko.milosevic@pmf.kg.ac.rs](mailto:marko.milosevic@pmf.kg.ac.rs), [nenad.stevanovic@pmf.kg.ac.rs](mailto:nenad.stevanovic@pmf.kg.ac.rs)*

**ABSTRACT**

In this paper the program code for simulation of EM wave through matter was developed. The matter is defined by relative electric and magnetic constants, specific conductivity, density. The model applied in this paper is based on discretisation of Maxwell equations in differential form. Program code was applied for calculation of specific absorbed rate of RF radiation through human head. It was shown that largest part of energy is absorbed in skin layer of the head.

**ЛИСТА АУТОРА**

**A**

- Aleksandar DRAGIĆ** 175  
**Aleksandar KANDIĆ** 92, 181  
**Amra ŠABETA** 194, 309  
**Ana MRAKOVIĆ** 255  
**Andrea KOJIĆ** 229, 236  
**Annette ROTTGER** 309  
**Attila VERES** 309

**B**

- Biljana MILENKOVIĆ** 187, 169  
**Biljana VUČKOVIĆ** 38, 68, 134  
**Boban ĐOKIĆ** 68  
**Boban RAKIĆ** 241, 248  
**Bojan MILJEVIĆ** 52  
**Borislava PETROVIĆ** 346  
**Branislava MITROVIĆ** 10  
**Branislav NASTASIJEVIĆ** 87  
**Branko RADOJKOVIĆ** 106  
**Britt WENS** 309

**C**

- Christelle ADAM-GUILLERMIN** 309

**D**

- Dalibor ARBUTINA** 289, 338  
**Damir BORKOVIĆ** 75  
**Danijel VELIMIROVIĆ** 200, 208, 346, 353  
**Darko SARVAN** 27  
**David KNEŽEVIĆ** 175  
**Dejan JOKOVIĆ** 175  
**Dejan MLADENOVIĆ** 106  
**Denis GLAVIČ-CINDRO** 309  
**Dimitrije MALETIĆ** 175  
**Đorđe STRATIMIROVIĆ** 27  
**Dragana ĐORĐEVIĆ** 92  
**Dragana KRSTIĆ** 45  
**Dragana TODOROVIĆ** 19, 32, 82, 128, 162, 297  
**Dragoljub JOVANOVIĆ** 87  
**Dragoslav NIKEZIĆ** 45, 187  
**Dušan MRĐA** 2, 52, 60, 141, 200, 208, 215, 346, 353  
**Dušan TOPALOVIĆ** 315  
**Dušica SPASIĆ** 38, 114, 134  
**Dušica VUČIĆ** 106

**E**

- Erika BRATTICH** 27



**G**

- Goran MANIĆ** 106  
**Gordana PANTELIĆ** 19, 32, 82, 121, 128, 156, 162, 297

**I**

- Igor ČELIKOVIĆ** 92, 121, 156, 181  
**Ines KRAJCAR-BRONIĆ** 75  
**Irena TANASKOVIĆ** 101  
**Ištvan BIKIT** 200, 208, 346, 353  
**Ivana AVRAMOVIĆ** 321  
**Ivana COHA** 255  
**Ivana JELIĆ** 269, 275, 282  
**Ivana SMIČIKLAS** 255, 262, 269, 275, 282  
**Ivana VIDAKOVIĆ** 45  
**Ivana VUKANAC** 19, 32, 82, 121, 128, 156, 162, 181, 297  
**Ivan KNEŽEVIĆ** 338

**J**

- Jan HANSMAN** 2, 60, 92, 134, 141, 200, 208, 215, 346  
**Jasminka JOKSIĆ** 315  
**Jelena AJTIĆ** 27  
**Jelena ĐURIČIĆ-MILANKOV** 92  
**Jelena KRNETA-NIKOLIĆ** 19, 32, 82, 121, 128, 156, 162, 297  
**Jelena PAJIĆ** 241, 248  
**Jelena STAJIĆ** 169, 187  
**Jelena STANKOVIĆ-PETROVIĆ** 229  
**Jelena ŽIVKOVIĆ-RADOVANOVIĆ** 134  
**Joao ALVES** 309  
**Jovana ILIĆ** 101  
**Jovana KNEŽEVIĆ** 52, 60, 141, 200, 208, 215, 338, 346  
**Jovana NIKOLOV** 68

**K**

- Katarina RAJKOVIĆ** 332  
**Kristina BIKIT-ŠREDER** 2, 60, 92, 200, 208, 346  
**Kristina KALKAN** 2, 60

**L**

- Linda PERSSO** 309  
**Ljiljana GULAN** 38, 68, 114, 134

**M**

- Maja EREMIĆ-SAVKOVIĆ** 148, 302  
**Maria-Alexandra STAMATOVIĆ** 255  
**Marija JANKOVIĆ** 19, 32, 82, 128, 162, 297  
**Marija ŠLJIVIĆ-IVANOVIĆ** 255, 269, 275, 282  
**Marin JOVANOVIĆ** 106  
**Marko MILOŠEVIĆ** 169, 361  
**Massimo PINTO** 309

<b>Michal DERLACINSKI</b>	<i>309</i>
<b>Miguel-Angel HERNÁNDEZ-CEBALLOS</b>	<i>27</i>
<b>Mihailo SAVIĆ</b>	<i>175</i>
<b>Mihail RAZVANLOAN</b>	<i>309</i>
<b>Mihajlo JOVIĆ</b>	<i>255, 262, 269, 275, 282</i>
<b>Milan STANKOVIĆ</b>	<i>45</i>
<b>Milan VUJOVIĆ</b>	<i>321, 327</i>
<b>Milana ŽIVKOVIĆ</b>	<i>45</i>
<b>Milenko ĐUKIĆ</b>	<i>241, 248</i>
<b>Milica RAJAČIĆ</b>	<i>19, 32, 82, 128, 162, 297</i>
<b>Milica STUPAR</b>	<i>194</i>
<b>Milivoj GAVRILOV</b>	<i>60</i>
<b>Miloš ĐALETIĆ</b>	<i>194, 222</i>
<b>Miloš ŽIVANOVIĆ</b>	<i>121, 156, 194, 222, 229, 236, 309</i>
<b>Milovan LEKOVIĆ</b>	<i>38</i>
<b>Milutin JEVREMOVIĆ</b>	<i>289</i>
<b>Mirjana ANTONIJEVIĆ-NIKOLIĆ</b>	<i>215</i>
<b>Mirjana ĐURAŠEVIĆ</b>	<i>181, 332</i>
<b>Mirjana RADENKOVIĆ</b>	<i>315</i>
<b>N</b>	
<b>Nataša LAZAREVIĆ</b>	<i>338</i>
<b>Nataša MLADENOVIĆ-NIKOLIĆ</b>	<i>181</i>
<b>Nataša SARAP</b>	<i>19, 32, 82, 128, 297</i>
<b>Nataša TODOROVIĆ</b>	<i>52, 68</i>
<b>Nebojša KRSTIĆ</b>	<i>353</i>
<b>Nenad MIHAJLOVIĆ</b>	<i>289</i>
<b>Nenad ŠIPKA</b>	<i>262</i>
<b>Nenad STEVANOVIĆ</b>	<i>169, 187, 361</i>
<b>Nenad ZLATIĆ</b>	<i>45</i>
<b>Nevena ZDJELAREVIĆ</b>	<i>338</i>
<b>Nikola KRŽANOVIĆ</b>	<i>194, 222, 229, 236, 309</i>
<b>Nikola SVRKOTA</b>	<i>121</i>
<b>Nikola VESELINOVIĆ</b>	<i>175</i>
<b>P</b>	
<b>Perko VUKOTIĆ</b>	<i>121</i>
<b>Predrag BOŽOVIĆ</b>	<i>229, 236, 262</i>
<b>Predrag KUZMANOVIĆ</b>	<i>52, 141, 215</i>
<b>R</b>	
<b>Radislav TOŠIĆ</b>	<i>2</i>
<b>Radomir BANJANAC</b>	<i>175</i>
<b>Ranko ZEKIĆ</b>	<i>121</i>
<b>Reetta NYLUND</b>	<i>309</i>
<b>Robert BERNAT</b>	<i>309</i>
<b>Robert LAKATOŠ</b>	<i>134</i>

**S**

<b>Saša BAŠIĆ</b>	327
<b>Sladana TANASKOVIĆ</b>	87
<b>Sladana VUKOVIĆ</b>	241, 248
<b>Slavko DIMOVIĆ</b>	269, 275, 282, 309
<b>Slobodan MARKOVIĆ</b>	2, 60
<b>Sofija FORKAPIĆ</b>	2, 52, 60, 92, 134, 141, 200, 208, 215, 346, 353
<b>Srboljub STANKOVIĆ</b>	87, 194, 309
<b>Srdan STEFANOVIĆ</b>	87
<b>Stefan RAFAJLOVIĆ</b>	315
<b>Steven BELL</b>	309
<b>Suzana BOGOJEVIĆ</b>	101

**T**

<b>Tamara MILANOVIĆ</b>	181
<b>Tatjana IGNIĆ</b>	346

**V**

<b>Valentin BLIDÉANU</b>	236
<b>Vedrana MAKARIĆ</b>	194
<b>Vedrana PROKIĆ</b>	248
<b>Vedrana VULETIĆ</b>	302
<b>Velibor ANDRIĆ</b>	162
<b>Vesna ARSIĆ</b>	101
<b>Vesna MANIĆ</b>	106
<b>Vladimir ĐURĐEVIĆ</b>	27
<b>Vladimir MARKOVIĆ</b>	169, 187
<b>Vladimir SOCHOR</b>	309
<b>Vladimir UDOVIČIĆ</b>	148, 175
<b>Vojislav STANIĆ</b>	87
<b>Vukosava ŽIVKOVIĆ</b>	87

**Z**

<b>Zoltan NAĐ</b>	353
<b>Zoran MIRKOV</b>	248
<b>Zorica OBRADOVIĆ</b>	181, 332
<b>Živojin STOJANOVIĆ</b>	262

**САДРЖАЈ**

<b>ОПШТИ ПРОБЛЕМИ ЗАШТИТЕ ОД ЗРАЧЕЊА .....</b>	<b>1</b>
КОМПАРАЦИЈА РАЗЛИЧИТИХ МОДЕЛА У ПРОЦЕНИ БРЗИНЕ ЕРОЗИВНИХ ПРОЦЕСА НА ЛОКАЛИТЕТУ ТИТЕЛСКОГ ЛЕСНОГ ПЛАТОА .....	2
<b>РАДИОЕКОЛОГИЈА И ИЗЛАГАЊЕ СТАНОВНИШТВА .....</b>	<b>9</b>
ИЗВЕДЕНЕ КОНЦЕНТРАЦИЈЕ <sup>238</sup> U I <sup>226</sup> RA У ХРАНИ ЗА ЖИВОТИНЈЕ.....	10
ЕФЕКТИ СВОЈСТАВА ТЛА РАЗЛИЧИТИХ ПОЛЈОПРИВРЕДНИХ КОНЦЕПАТА НА МИГРАЦИЈУ АНТРОПОГЕНИХ РАДИОНУКЛИДА .....	19
КОРЕЛАЦИОНЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ СПЕЦИФИЧНЕ АКТИВНОСТИ БЕРИЛИЈУМА-7 У ВАЗДУХУ И TEMPERATURE НА ДУГОГОДИШЊИМ НИЗОВИМА НЕДЕЛЈНИХ ВРЕДНОСТИ 27	
РАДИОАКТИВНОСТ ОКОЛИНЕ У ПРОЦЕСУ ИСКОПАВАЊА БУНАРА - СЕЛО ПОГАНОВО 32	
ЈАЧИНА АМБИЈЕНТАЛНОГ ДОЗНОГ ЕКВИВАЛЕНТА И КОРЕЛАЦИЈА СА МЕТЕОРОЛОШКИМ ПАРАМЕТРИМА У ГРАДУ ВАЉЕВУ И ОКОЛИНИ.....	38
ПРОЦЕНА ЗДРАВСТВЕНОГ РИЗИКА ОД ПРИРОДНИХ И ВЕШТАЧКИХ РАДИОНУКЛИДА У ЛЕКОВИТИМ БИЛЈКАМА.....	45
РЕЦИКЛИРАЊЕ ФОСФОГИПСА У ПРОИЗВОДЊИ ОРЕКЕ И ПРОЦЕНА ЈАЧИНЕ АПСОРБОВАНЕ ДОЗЕ ГАМА ЗРАЧЕЊА МОНТЕ CARLO СИМУЛАЦИЈАМА .....	52
ДА ЛИ ЈЕ АКЦИДЕНТ У ЧЕРНОБИЛУ ДОМИНАНТАН ИЗВОР ДЕПОЗИЦИЈЕ СЕЗИЈУМА У РЕГИОНУ? .....	60
ПРОЦЕНА ЗДРАВСТВЕНОГ РИЗИКА ИЗЛОЖЕНОСТИ РАДОНУ ИЗ ВОДЕ У ОПШТИНИ НОВО БРДО .....	68
LONG-TERM VARIATIONS IN TRITIUM ACTIVITY CONCENTRATION IN PRECIPITATION REFLECT THE SOLAR ACTIVITY CYCLE .....	75
САДРЖАЈ РАДИОНУКЛИДА У ИЗВОРСКИМ ВОДАМА У ОКОЛИНИ СМЕДЕРЕВСКЕ ПАЛАНКЕ .....	82
УТИЦАЈ ГАМА ЗРАЧЕЊА НА СТАБИЛНОСТ АФЛАТОКСИНА У МЛЕКУ.....	87
ИСПИТИВАЊЕ РАДИОАКТИВНОСТИ СУСПЕНДОВАНИХ ЧЕСТИЦА АТМОСФЕРЕ УЗОРКОВАНИХ КАСКАДНИМ ИМПАКТОРОМ НИСКОГ ПРИТСКА.....	92
<sup>131</sup> I У ВАЗДУХУ У НЕПОСРЕДНОЈ ОКОЛИНИ ИНСТИТУТА ЗА МЕДИЦИНУ РАДА СРБИЈЕ "ДР ДРАГОМИР КАРАЈОВИЋ" У БЕОГРАДУ .....	101
РАДИОНУКЛИДИ У ЗЕМЉИШТУ У ОБЛАСТИ ГРАДА НИША .....	106
<b>РАДОН.....</b>	<b>113</b>
ВИСОКЕ КОНЦЕНТРАЦИЈЕ РАДОНА У ПОРОДИЧНОЈ КУЋИ У ОКОЛИНИ КОСОВСКЕ МИТРОВИЦЕ.....	114
РАДОНСКИ РАВНОТЕЖНИ ФАКТОР У ИЗАБРАНИМ РЕЗИДЕНЦИЈАЛНИМ И РАДНИМ ОБЈЕКТИМА У СРБИЈИ И СРНОЈ ГОРИ .....	121
СИСТЕМАТСКО ИСПИТИВАЊЕ КОНЦЕНТРАЦИЈЕ РАДОНА НА ТЕРИТОРИЈИ БЕОГРАДА ..	128
АНАЛИЗА ВИСОКЕ КОНЦЕНТРАЦИЈЕ РАДОНА У ЈЕДНОЈ КУЋИ У РУДАРСКОМ ПОДРУЧЈУ КОМПЛЕКСА „ТРЕПЧА“ .....	134
МЕРЕЊЕ ЕМАНАЦИЈЕ <sup>222</sup> Rn ИЗ ПЕПЕЛА НАСТАЛОГ САГОРЕВАЊЕМ ЛИГНИТА .....	141
НАЦИОНАЛНИ АКЦИОНИ ПЛАН ЗА РАДОН У РЕГУЛАТИВНОМ ОКВИРУ РЕПУБЛИКЕ СРБИЈЕ .....	148
TRACERADON - МЕТРОЛОГИЈА РАДОНА У ОБЛАСТИ ИЗУЧАВАЊА КЛИМАТСКИХ ПРОМЕНА И У ЗАШТИТИ ОД ЗРАЧЕЊА У ЖИВОТНОЈ СРЕДИНИ.....	156

<b>МЕТОДЕ ДЕТЕКЦИЈЕ И МЕРНА ИНСТРУМЕНТАЦИЈА.....</b>	<b>161</b>
ISPITIVANJE AKTIVNOSTI RADIONUKLIDA U OTPADNOM MATERIJALU – BUDŽET MERNE NESIGURNOSTI.....	162
VREMENSKA ZAVISNOST GUSTINE TRAGOVA NA TRAG DETEKTORIMA U DIFUZIONOJ KOMORI .....	169
SIMULACIJA PRODUKCIJE NEUTRONA MIONIMA IZ KOSMIČKOG ZRAČENJA U OLOVNOJ ZAŠTITI GERMANIJUMSKOG DETEKTORA.....	175
DUGOVREMENSKA STABILNOST KALIBRACIONIH STANDARDA RAZLIČITIH MATRIKSA U GAMASPEKTROMETRIJI .....	181
POREĐENJE FUNKCIJA ODGOVORA CR-39 DETEKTORA ZA DETEKCIJU ALFA ZRAČENJA .....	187
INFLUENCE OF REFERENCE FIELD SPECTRA ON CALIBRATION OF FIELD CLASS DOSIMETERS.....	194
ISPITIVANJE DISTRIBUCIJE <sup>226</sup> RA U UZORCIMA VODE PRIMENOM MONTE KARLO SIMULACIJA .....	200
ISPITIVANJE KOMPONENTI FONSKOG SPEKTRA HPGE DETEKTORA U OLOVNOJ ZAŠTITI PRIMENOM MONTE KARLO SIMULACIJA .....	208
RAZVOJ METODE ZA SMANJENJE KONCENTRACIJE <sup>226</sup> RA U FOSFOGIPSU .....	215
ISPITIVANJE PROTOTIPOVA NOVIH SONDI S2 I S3 MERAČA DMRZ-M15 .....	222
<b>ЗАШТИТА ОД ЗРАЧЕЊА У МЕДИЦИНИ.....</b>	<b>228</b>
PROCENA VREDNOSTI PARAMETARA MATEMATIČKOG MODELA ZA RADIJACIONI IZLAZ RENDGEN-APARATA U DIJAGNOSTIČKOJ RADIOLOGIJI.....	229
<b>ДОЗИМЕТРИЈА.....</b>	<b>235</b>
EMPIR PROJECT 19NET04 MIRA – JOINT NETWORK PROJECT SIGNIFICANCE .....	236
<b>БИОЛОШКИ ЕФЕКТИ ЈОНИЗУЈУЋИХ ЗРАЧЕЊА.....</b>	<b>240</b>
ANALIZA ZDRAVSTVENOG STANJA NAKON OBAVLJENIH PERIODIČNIH PREGLEDA ZAPOSLENIH NA EKSPLOATACIJI SIROVE NAFTE.....	241
ZNAČAJ REDOVNIH PERIODIČNIH PREGLEDA I CITOGENETIČKIH ANALIZA U RADIOLOŠKOJ ZDRAVSTVENOJ ZAŠTITI.....	248
<b>РАДИОАКТИВНИ ОТПАД И ДЕКОНТАМИНАЦИЈА.....</b>	<b>254</b>
Uticaj organskih kompleksanata na separaciju jona SR iz vodenih rastvora odabranim zeolitima.....	255
DEKONTAMINACIJA CEVNOG MATERIJALA TEHNOLOŠKI OBOGAĆENOG PRIMORDIJALNIM RADIONUKLIDIMA.....	262
MODELI IZOTERMI SORPCIJE JONA Sr(II) I Co(II) NA OTPADNIM CEMENTNIM MATERIJALIMA .....	269
PRIMENA LANGMUIR-OVIH I FREUNDLICH-OVIH IZOTERMI NA SORPCIJU CO(II) I NI(II) JONA NA OTPADNIM OPEKAMA.....	275
MODELOVANJE IZOTERMI SORPCIJE SR(II) JONA NA OTPADNIM OPEKAMA .....	282
MOBILE SYSTEM FOR CONDITIONING OF DISUSED SEALED RADIOACTIVE SOURCES (MSC DSRS).....	289

---

<b>РЕГУЛАТИВА, ЕДУКАЦИЈА И ЈАВНО ИНФОРМИСАЊЕ.....</b>	<b>296</b>
MERNA NESIGURNOST GAMA INDEKSA ZA GRAĐEVINSKI MATERIJAL – ZAKONSKA REGULATIVA U PRAKSI .....	297
УСКЛАЂИВАЊЕ НАЦИОНАЛНИХ ПРОПИСА СА ЗАХТЕВИМА ЕВРОПСКЕ УНИЈЕ ЗА МОНИТОРИНГ РАДИОАКТИВНОСТИ У ВОДИ ЗА ПИЋЕ .....	302
A NEW EUROPEAN RADIATION PROTECTION NETWORK DEVELOPED BY THE SUPPORT BSS JOINT NETWORK PROJECT.....	309
REGULATIVA, PREPORUKE I MOGUĆNOSTI SARADNJE U OBLASTI RADIJACIONE I NUKLEARNE BEZBEDNOSTI.....	315
УПРАВЉАЊЕ РАДИОАКТИВНИМ ОТПАДОМ У РЕПУБЛИЦИ СРБИЈИ – РЕГУЛАТОРНИ АСПЕКТ.....	321
УНАПРЕЂЕЊЕ РЕГУЛАТОРНОГ ОКВИРА У ОБЛАСТИ ТРАНСПОРТА ОПАСНЕ РОБЕ КЛАСЕ 7 АДР/РИД/АДН (РАДИОАКТИВНЕ МАТЕРИЈЕ).....	327
PRIMENA ZAKONSKE REGULATIVE PRI KORIŠĆENJU IZVORA JONIZUJUĆIH ZRAČENJA U INDUSTRIJI.....	332
IZAZOVI ZA DEFINISANJE PRAVILA ODLUČIVANJA ZA USAGLAŠENOST REZULTATA ISPITIVANJA SA REGULATORNIM ZAHTEVIMA.....	338
<b>НЕЈОНИЗУЈУЋА ЗРАЧЕЊА .....</b>	<b>345</b>
MONTE KARLO SIMULACIJE DISTRIBUCIJE ZAKOČNOG ZRAČENJA U OKOLINI LINEARNOG 15 MeV AKCELERATORA.....	346
PROBLEMI SA UPOTREBOM SAVREMENE 5G TEHNOLOGIJE U REPUBLICI SRBIJI I PREPORUKE SA USKLAĐIVANJEM PROPISA U OBLASTI ZAŠTITE OD NEJONIZUJUĆIH ZRAČENJA .....	353
APSORBOVANA SPECIFIČNA ENERGIJA RADIOFREKVENTNOG ZRAČENJA .....	361
<b>ЛИСТА АУТОРА .....</b>	<b>368</b>
<b>САДРЖАЈ .....</b>	<b>373</b>