

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



**ЗБОРНИК  
РАДОВА**

**XXIX СИМПОЗИЈУМ ДЗЗСЦГ  
Сребрно језеро  
27- 29. септембар 2017. године**

**Београд  
2017. године**

**SOCIETY FOR RADIATION PROTECTION OF  
SERBIA AND MONTENEGRO**



# PROCEEDINGS

**XXIX SYMPOSIUM DZZSCG  
Srebrno jezero  
27- 29. September 2017**

**Belgrade  
2017**

ЗБОРНИК РАДОВА

XXIX СИМПОЗИЈУМ ДЗЗСЦГ  
27-29.09.2017.

Издавачи:

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

За извршног издавача:

Др Борислав Грубор

Уредници:

Др Јелена Станковић Петровић  
Др Гордана Пантелић

ISBN 978-86-7306-144-3

© Institut za nuklearne nauke „Vinča“

Техничка обрада:

Јелена Станковић Петровић, Гордана Пантелић

Штампа:

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

Тираж:

150 примерака

Година издања:

Септембар 2017.

## KORIŠĆENJE MULTIVARIJANTNE ANALIZE ZA PREDVIĐANJE GEOGENOG RADONSKOG POTENCIJALA

**Sofija FORKAPIĆ<sup>1</sup>, Dimitrije MALETIĆ<sup>2</sup>, Jovica VASIN<sup>3</sup>, Kristina BIKIT<sup>1</sup>, Dušan MRDA<sup>1</sup>, Ištvan BIKIT<sup>1</sup>, Vladimir UDOVIČIĆ<sup>2</sup>, Radomir BANJANAC<sup>2</sup>**

1) Univerzitet u Novom Sadu, Prirodno-matematički fakultet, Novi Sad, Srbija,

[sofija@df.uns.ac.rs](mailto:sofija@df.uns.ac.rs)

2) Univerzitet u Beograd, Institut za fiziku, Beograd, Srbija, [maletic@ipb.ac.rs](mailto:maletic@ipb.ac.rs)

3) Univerzitet u Novom Sadu, Institut za ratarstvo i povrtarstvo, Novi Sad, Srbija, [jovica.vasin@ifvcns.ns.ac.rs](mailto:jovica.vasin@ifvcns.ns.ac.rs)

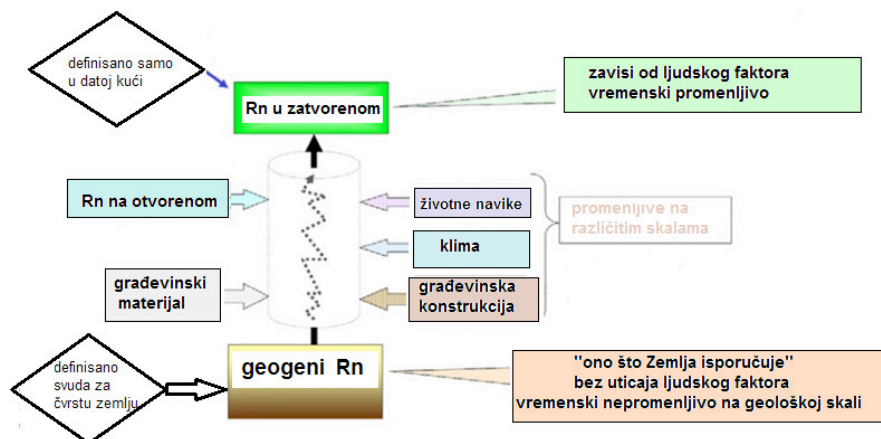
### SADRŽAJ

Geogeni radonski potencijal koji izdvaja radon u podzemnim slojevima kao dominantan uzrok akumulacije radona u zatvorenim prostorijama i koji je nezavisan od ljudskog uticaja i vremenski konstantan u geološkim okvirima predstavlja glavni alat za iznalaženje radonom ugroženih područja. U nedostatku podataka za permeabilnost zemljišta za radon i malog broja merenja radona u zemljištu, upotrebljena je multivarijantna analiza velikog broja raspoloživih geohemijskih podataka, merenja radioaktivnosti zemljišta i koncentracija aktivnosti radona u zatvorenim prostorijama datih lokacija na području Vojvodine. Nekoliko uporedivih metoda iz ROOT okvira za analize softverskog paketa TMVA je korišćeno za analizu zavisnosti koncentracije radona u zatvorenom od mnoštva ulaznih varijabli. BDTG kao najpodobnija metoda je pokazala da su varijable sa najvećim uticajem na koncentraciju radona u zatvorenim prostorijama pored sadržaja ukupnog azota, koncentracije aktivnosti radionuklida u zemljištu na profilu dubine od 30 cm i sadržaj humusa i gline. Dobijeni rezultati pokazuju dobro slaganje sa nedavnim ispitivanjem emanacije radona iz zemljišta na području grada Novog Sada.

### 1. UVOD

Poznato je da radon i njegovi kratkoživeći potomci daju najveći doprinos efektivnoj dozi koju stanovništvo primi od jonizujućih zračenja [1]. Nedavna epidemiološka istraživanja pokazala su da rizik od radona postoji i pri koncentracijama za koje se ranije smatralo da su zanemarive. U svim evropskim zemljama se sprovode mapiranja radona, a rezultati se sumiraju u publikaciji zajedničkog istraživačkog centra Evropske komisije (JRC EC) koji koordinira projekt izrade evropskog atlasa prirodne radioaktivnosti. Naime, sve države članice EU (uključujući i zemlje kandidate za članstvo) prema direktivi EU [2] moraju propisati referentne nivoe radona u boravišnim i radnim prostorijama i identifikovati područja sa visokim radonskim potencijalom. Postoje dva koncepta u definiciji radonskog potencijala: prema broju objekata sa koncentracijama radona iznad referentnog nivoa – indoor radon potential IRP i prema lokalnim geofizičkim parametrima kao što su koncentracija radona u zemljištu i permeabilnost zemljišta (geogeni radonski potencijal GRP). 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). Radon dominantno potiče od povišene koncentracije radijuma i uranijuma u stenama koje se nalaze duboko ispod tla i zbog toga što je radon inertan gas lako napušta mesto formiranja i difunduje kroz debele slojeve zemljišta usled gradijenta u koncentraciji i pritisku.



**Slika 1. Kompleksni uticaji na radon u zatvorenim prostorijama i geogeni radonski potencijal [4]**

Geogeni radonski potencijal (GRP) određenog područja se može odrediti na osnovu koncentracije radona u zemljištu i permeabilnosti zemljišta na osnovu sledeće empirijske formule [5]:

$$GRP = \frac{C}{-\log_{10} k - 10} \quad (1)$$

gde je  $C$  koncentracija radona [ $Bq/m^3$ ] u zemljištu i  $k$  permeabilnost zemljišta [ $m^2$ ]. Ovako određeni geogeni radonski potencijal se upoređuje sa kartama geomorfoloških jedinica datog područja, kartama koncentracije uranijuma i radijuma u zemljištu i pedološkim kartama u cilju identifikacije radonom ugroženih područja. U nedostatku merenja koncentracije radona u zemljištu, kao i zbog nemogućnosti da se meri permeabilnost zemljišta za radon, naši prvi pokušaji da se proceni GRP na osnovu postojećih baza podataka su bili da se detaljno analiziraju korelacije između dostupnih geohemijskih podataka i merenja koncentracije radona u zatvorenim prostorijama kako bi se predvidela radonom ugrožena područja i validovale geogene prognoze. U tu svrhu primenjeni su multivarijantnimetodi, razvijeni u CERN-u za analizu velikog broja događaja u eksperimentalnoj fizici visokih energija, kako bi se ispitale sve moguće korelacije između velikog broja sistematskih ispitivanja koncentracija radona u zatvorenom na području Vojvodine u periodu od 2002-2005. godine koje je sprovela Laboratorija za ispitivanje radioaktivnosti uzoraka i doze jonizujućeg i nejonizujućeg zračenja, PMF-a u Novom Sadu. [6]. Za vojvođansko zemljište postoji bogata sistematika merenja radioaktivnosti i geohemijskih karakteristika nastala upravo u tom periodu (2001-2010) u saradnji laboratorije u Novom Sadu sa Institutom za ratarstvo i povrtarstvo iz Novog Sada. Izbor lokaliteta za poređenje vrednosti je bio po kriterijumima zastupljenosti površina podpojedininim geomorfološkim celinama [7] i pojedinim tipovima zemljišta [8-9].

Institut za fiziku u Beogradu je primenio sve dostupne regresione metode implementirane u TMVA (Toolkit for Multivariate analysis) [10] da bi odredio i rangirao korelacione koeficijente u cilju iznalaženja najpogodnijeg metoda koji će dati najbolje korelacije

koncentracija radona od mnoštva ulaznih parametara. Da bi ova multivarijantna klasifikacija bila moguća set ulaznih događaja je morao biti podeljen na one koji odgovaraju signalu (povišene koncentracije radona) i one koje odgovaraju fonu (ispod granice od  $120 \text{ Bq/m}^3$  koja daje najbolje razdvajanje rezultata) (slika 3). Metoda multivarijantne regresije, međutim, ne zahteva ovakvo preliminarno razdvajanje podataka i zbog toga je opštijeg karaktera.

### 2. METODOLOGIJA UZORKOVANJA I MERENJA

Merenje koncentracije radona u zatvorenim prostorijama je sprovedeno metodom trag detektora tipa CR39 koji su u zatvorenoj difuzionoj komori bili izlagani na oko 3000 lokacija u Vojvodini u prizemnim prostorijama u trajanju od 90 dana u zimskim mesecima: decembar, januar i februar u periodu od 2002-2005. Nagrizanje i očitavanje tragova je izvršeno kod proizvođača opreme Radosys Company, Mađarska. Za ovu studiju izračunate su srednje vrednosti koncentracija radona za mesta u neposrednoj blizini lokaliteta uzorkovanja zemljišta. Tipovi zemljišta kojim pripadaju ispitivani uzorci su: černozem, humoglej, fluvisol, pseudoglej, solonjec, kambisol, solončak i arenosol, po IUSS klasifikaciji [9]. Sa svake odabrane lokacije uzeto je 10 mikro uzoraka zemljišta sa površine od  $10 \times 10 \text{ m}$ , a zatim napravljen jedan kompozitni uzorak mešanjem. Za ispitivanje radioaktivnosti uzorci zemljišta su uzeti sa dve dubine: iz površinskog sloja (0–10 cm) i sa dubine do 30 cm agrohemijskom sondom. Hemijske analize zemljišta su izvršene samo na uzorcima sa dubine od 30 cm. Uzorci zemljišta su sušeni na  $105^\circ\text{C}$  do konstantne mase, usitnjeni, homogenizovani i mereniu cilindričnim posudama na kapi detektora. Koncentracije aktivnosti radionuklida gama emitera u zemljištu određene su metodom niskofonske gama spektrometrije na dva HPGe detektora visoke rezolucije u pasivnoj zaštiti. Za prikupljane i analizu gama spektara korišćen je softver Genie 2000. pH-vrednost određena je u suspenziji zemljišta sa vodom ( $10 \text{ g} : 25 \text{ cm}^3$ ) i suspenziji zemljišta sa kalijum hloridom, potenciometrijski, pH metar PHM62 standard-Radiometar Copenhagen. Sadržaj humusa određen je metodom Tjurin-a; ukupan sadržaj azota po Kjeldahlu na sistemu za digestiju i titraciju Tacator; lakopristupačni fosfor i lakopristupačni kalijum (ekstrakcijom sa amonijum laktatom) - AL metodom. Za određivanje mehaničkog sastava zemljišta korišćene su metode: frakcionisanje pomoću serije sita i pipet metoda. U cilju ostvarivanja peptizacije mehaničkih elemenata uzorci zemljišta se tretiraju natrijum-pirofosfatom. Na osnovu veličine čestica prema IUSS klasifikaciji mogu se odrediti sledeće frakcije: krupan pesak (0,2–2 mm), sitan pesak (0,02–0,2 mm), fini prah (0,002–0,02 mm) i glina ( $<0,002 \text{ mm}$ ) [9].

### 3. REZULTATI I DISKUSIJA

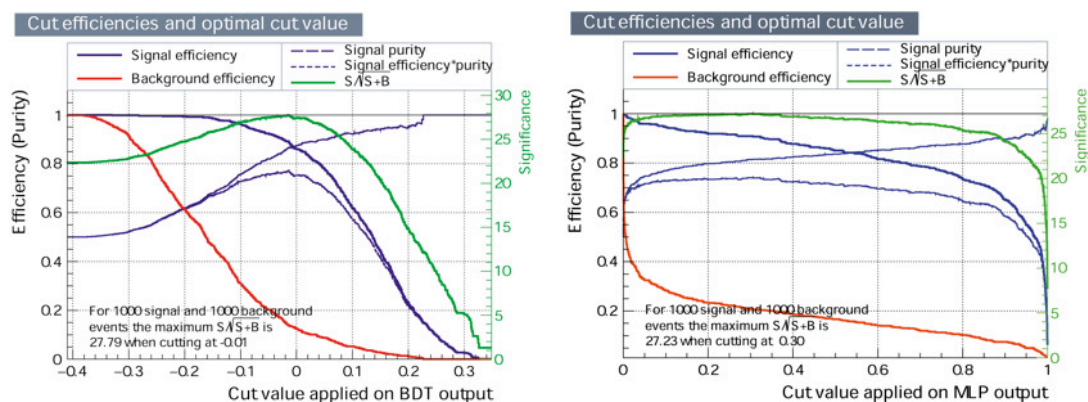
U tabeli 1. prikazani su linearni korelacioni koeficijenti koji nam ukazuju na veličinu korelacije između ulaznih veličina i koncentracije radona. Može se uočiti da radon najbolje korelira sa radionuklidima na dubini od 30 cm.

Za primenu multivarijantnih metoda, ispitivani uzorak mora da ima značajnu statistiku. Pošto to nije bilo zadovoljeno, veštački se povećao uzorak dupliranjem svih vrednosti, ali uz modifikaciju množenjem inicijalnih vrednosti ulaznih parametara i koncentracija radona sa 1+slučajne Gausove vrednosti sa sigma 1/10.

Tabela 1. Korelacioni koeficijenti između radona i ulaznih parametara

Redni br.	Parametar	Korelacioni koeficijent
1	Elevation	+0,11
2	pH	0
3	CaCO <sub>3</sub>	-0,03
4	Humus	+0,15
5	Ukupan N	+0,13
6	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-0,01
7	K <sub>2</sub> O	+0,01
8	Krupan pesak	-0,08
9	Sitan pesak	-0,19
10	Prah	+0,16
11	Glina	+0,17
12	Ra-226 30cm	+0,27
13	U-238 30cm	+0,17
14	Th-232 30cm	+0,22
15	K-40 30cm	+0,10
16	U-238 površina	-0,17
17	Ra-226 površina	+0,04
18	Th-232 površina	0
19	K-40 površina	+0,02
20	Cs-137 površina	-0,17

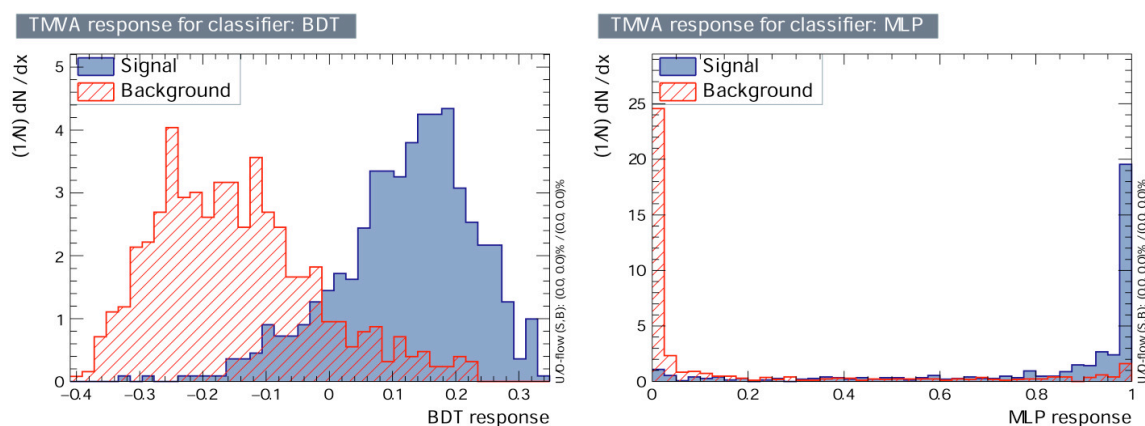
Ulazni parametri (karakteristike zemljišta i sadržaj radionuklida na površini i na dubini od 30 cm) su korišćeni za testiranje i evaluaciju 12 multivarijantnih metoda koje postoje u okviru TMVA. Najbolji metod je onaj koji zadržava maksimalnu vrednost odbacivanja fona pri najvećoj efikasnosti signala (slika 2). Na osnovu takvog kriterijuma kao metoda koja najefikasnije klasifikuje ulazne događaje, odabrana je metoda BDT (Boosted Decision Trees method). Ovo se može ilustrovati na slici 3. koja prikazuje raspodelu izlaznih veličina BDT klasifikacione metode za ulazne signale i fonske događaje. Drugi najbolji izbor je primena ANN Multilayer Perceptrons metode (MLP).



Slika 2. Efikasnost odsecanja i optimalna vrednost odsecanja za BDT (levo) i MLP (desno) multivarijantnih metoda za radonske koncentracije

**Tabela 2. Rezultati evaluacije metoda rangirani po najboljoj efikasnosti signali i čistoći površine. @B je deo fonskih događaja koji su klasifikovani kao događaji signala**

MVA metoda	Efikasnost signala prema efikasnosti fona (greška):				podela	značaj
	@B=0,01	@B=0,10	@B=0,30	ROC-integ		
BDT	0,212(16)	0,814(16)	0,959(08)	0,932	0,609	1,614
BDTG	0,243(17)	0,767(17)	0,966(07)	0,927	0,611	1,676
MLPBNN	0,224(17)	0,754(17)	0,957(08)	0,922	0,600	1,579
MLP	0,228(17)	0,728(18)	0,955(08)	0,919	0,577	1,540
SVM	0,211(16)	0,797(16)	0,938(09)	0,918	0,587	1,611
RuleFit	0,162(15)	0,671(19)	0,906(12)	0,891	0,482	1,263
LikelihoodPCA	0,000(00)	0,491(20)	0,845(14)	0,843	0,404	1,099
LD	0,047(08)	0,348(19)	0,744(18)	0,789	0,271	0,806
Likelihood	0,031(07)	0,328(19)	0,674(19)	0,764	0,208	0,589
FDA_GA	0,031(07)	0,147(14)	0,363(19)	0,611	0,093	0,353



**Slika 3. Raspodela izlaznih vrednosti BDT i ANN MLP klasifikacionih metoda za ulazni signal i fonske događaje**

Rangiranje BDTG ulaznih varijabli (tabela 3) je izvedena brojanjem koliko često se varijable koriste pri donošenju odluka u svakom čvorištu stabla, pri čemu je ova vrednost otežana brojem podela i brojem događaja u čvoru. Kao što se vidi iz tabele 3, pored ukupnog azota, najvažnije varijable za koncentracije radona u zatvorenim prostorijama su koncentracije radionuklida na 30cm dubine.

Najbolji regresioni metodi koji daju izlazne veličine najpribližnije stvarnim vrednostima koncentracije radona su ponovo BDT, a kao druga MLP, isto kao i u slučaju multivarijantnog klasifikatora. Slika 4 prikazuje distribuciju koncentracija radona i izlaznih veličina iz MPL evaluacije koncentracija radona na osnovu svih ulaznih parametara.

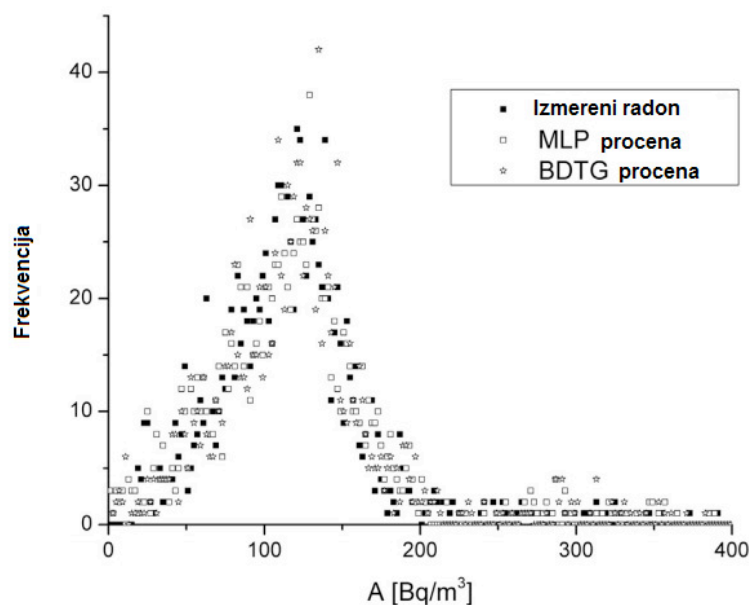
Da bi procenili kvalitet korišćenog metoda poređene su razlike između izlaznih vrednosti iz MLP multivarijantne regresione metode i vrednosti merenih koncentracija radona (slika 5). Slika ukazuje na dobru moć predviđanja varijacija koncentracija radona na



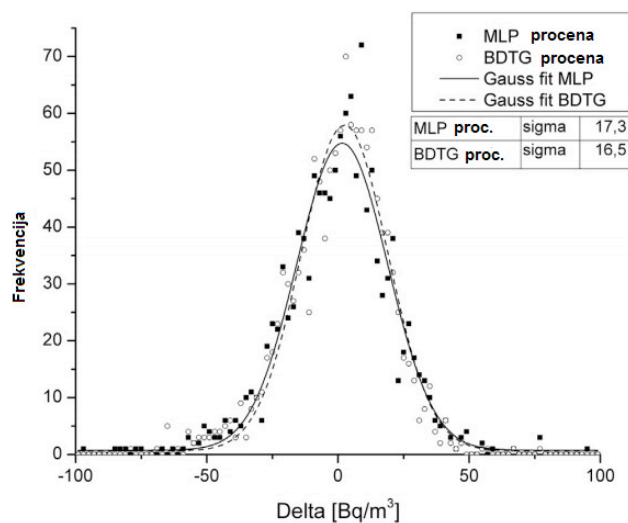
osnovu celokupnog seta ulaznih parametara pomoću multivarijantnih regresionih metoda.

**Tabela 3. Ulazni parametri poređani po značaju za BDTG MVA metodu za radon**

BDTG rang	Parametar	Značaj varijable $\times 10^{-2}$
1	Ukupan N	6,490
2	U-238 30cm	6,425
3	K-40 30cm	6,040
4	Th-232 30cm	5,495
5	Humus	5,490
6	K <sub>2</sub> O	5,406
7	glina	5,360
8	U-238 površina	5,218
9	Sitan pesak	5,116
10	CaCO <sub>3</sub>	5,081
11	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	5,003
12	Cs-137 površina	4,715
13	Ra-226 30cm	4,656
14	Nadmorska visina	4,595
15	K-40 površina	4,509
16	pH	4,435
17	Ra-226 površina	4,188
18	Prah	4,082
19	Th-232 surface	4,026
20	Krupan pesak	3,671



**Slika 4. Raspodela merenih koncentracija radona i izlaznih podataka iz MLP multivarijantnog regresionog metoda za koncentracije radona**



**Slika 5. Raspodela razlika izlaznih veličina iz MLP metoda i merenih radonskih koncentracija**

#### 4. ZAKLJUČAK

U ovom radu detaljno je opisana mogućnost primene multivarijantne analize za procenu radonskog potencijala. Odabrana je najadekvatnija metoda za analizu radonskih merenja među velikim brojem multivarijantnih metoda, koje su razvijene za analizu podataka u fizici visokih energija i implementirane u TMVA softverski paket. Evaluacijom i rangiranjem dobijenih rezultata na osnovu efikasnosti i čistoće signala izdvojene su dve metode koje daju najbolje rezultate u analizama: BDT i MLP koja se bazira na veštačkoj neuralnoj mreži (ANN). Rezultati dalje multivarijantne analize daju uvid u zavisnost koncentracije radona od koncentracija ostalih radionuklida u zemljištu i geohemijskih karakteristika zemljišta. BDTG multivarijantni metod pokazuje da su varijable od najvećeg značaja za koncentracije radona u zatvorenom: koncentracije radionuklida u dubljim slojevima zemljišta, ali takođe sadržaji humusa i gline u zemljištu (tabela 3). Dodatno, multivarijantni regresioni metodi daju dobru aproksimaciju koncentracije radona korišćenjem celokupnog seta ulaznih parametara. Sve to potvrđuje da su radio-geohemijski podaci korisni za generisanje mapa radonom ugroženih područja. Potvrđena je pretpostavka 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. Ovaj zaključak se može primeniti za odabir lokacija za buduća merenja permeabilnosti zemljišta kada se nabavi neophodna oprema. Dobijena najbolja korelacije koncentracija radona sa sadržajem ukupnog azota u zemljištu predstavlja interesantan rezultat koji će biti dalje proučavan u narednim studijama proučavanja emanacije radona iz zemljišta.

#### 5. ZAHVALNICA

Autori se zahvaljuju na finansijskog podršci Pokrajinskom sekretarijatu za zaštitu životne sredine i održivog razvoja i Ministarstvu prosvete, nauke i tehnološkog razvoja u okviru projekata OI171002 i III43002.

**6. LITERATURA**

- [1] UNSCEAR, 2008, Ionizing Radiation: Sources and Effects, UNSCEAR 2008 REPORT, VOLUME II, United Nations, New York (2008)
- [2] WHO, 2009 Handbook on Indoor Radon – a Public Health Perspective
- [3] Council Directive 2013/59/EURATOM of 5 December 2013 laying down basic safety standards for protection against the dangers arising from exposure to ionising radiation, and repealing Directives 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom and 2003/122/Euratom, Article 74 Indoor exposure to radon
- [4] V. Gruber et al., The European map of geogenic radon potential, *Journal of Radiological Protection* 33 (2013) 51-60
- [5] Neznal M, Neznal M, Matolin M, Barnet i and Miksova J 2004 The New Method for Assessing the Radon Risk of Building Sites (*Czech Geological Survey Special Papers vol 16*) (Prague: Czech Geological Survey)
- [6] Forkapić, S., et al., 2007. Indoor radon in rural dwellings of the south-Pannonian region. *Radiat. Prot. Dosim.*123 , pp. 378-383
- [7] Koščal, M., Menković, Lj., Knežević, M., Mijatović, M., (2005): Geomorfološka karta Vojvodine sa tumačem. Geozavod – Gemini, Beograd
- [8] Nejgebauer, V., et al., 1971. Pedološka karta Vojvodine (R 1 : 50.000). Institut za poljoprivredna istraživanja, Novi Sad
- [9] IUSS Working Group WRB, 2014: World Reference Base for Soil Resources 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome.
- [10] Hoecker, A., et al., 2007. TMVA - Toolkit for Multivariate Data Analysis, PoS ACAT 040, arXiv:physics/070303

## MULTIVARIATE ANALYSIS APPLICATION FOR GEOGENY RADON POTENTIAL PREDICTION

**Sofija FORKAPIĆ<sup>1</sup>, Dimitrije MALETIĆ<sup>2</sup>, Jovica VASIN<sup>3</sup>, Kristina BIKIT<sup>1</sup>,  
Dušan MRDA<sup>1</sup>, Ištvan BIKIT<sup>1</sup>, Vladimir UDOVIČIĆ<sup>2</sup>, Radomir BANJANAC<sup>2</sup>**

1) *University of Novi Sad, Faculty of Sciences, Novi Sad, Serbia, [sofija@df.uns.ac.rs](mailto:sofija@df.uns.ac.rs)*

2) *University of Begrade, Institute of Physics, Belgrade, Serbia, [maletic@ipb.ac.rs](mailto:maletic@ipb.ac.rs)*

3) *Institute of Field and Vegetable Crops, Novi Sad, Serbia,  
[jovica.vasin@ifvcns.ns.ac.rs](mailto:jovica.vasin@ifvcns.ns.ac.rs)*

### **ABSTRACT**

*The most dominant source of indoor radon is the underlying soil, so the enhanced levels of radon are usually expected in mountain regions and geology units with high radium and uranium content in surface soils. Laboratory for radioactivity and dose measurement, Faculty of Sciences, University of Novi Sad has rich databases of natural radionuclides concentrations in Vojvodina soil and also of indoor radon concentrations for the region of Vojvodina, Northern Province of Serbia. In this paper, we present the results of correlative and multivariate analysis of these results and geochemical characteristics of soil in order to estimate the geogenic radon potential. The correlative and multivariate analysis were done using Toolkit for Multivariate Analysis software package TMVA package, which uses several comparable multivariate methods for our analysis. The evaluation ranking results based on the best signal efficiency and purity, show that the Boosted Decision Trees (BDT) and Multi Layer Preceptor (MLP), based on Artificial Neural Network (ANN), are multivariate methods which give the best results in the analysis. The BDTG multivariate method shows that variables with the highest importance are radio-nuclides activity on 30 cm depth. Moreover, the multivariate regression methods give a good approximation of radon activity using full set of input variables.*