

UNIVERZITET CRNE GORE
PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET

Jasmin Kuč

KONCENTRACIJE RADONA (^{222}Rn) U ZEMLJIŠTU PODGORICE

MAGISTARSKI RAD

PODGORICA, 2017.

UNIVERZITET CRNE GORE
PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET

Jasmin Kuč

KONCENTRACIJE RADONA (^{222}Rn) U ZEMLJIŠTU PODGORICE

MAGISTARSKI RAD

PODGORICA, 2017.

PODACI I INFORMACIJE O MAGISTRANDU

Ime i prezime: **Jasmin Kuč**

Datum i mjesto rođenja: **24. 05. 1992, Rožaje**

Naziv završenog osnovnog studijskog programa i godina završetka studija: **FIZIKA, 2015**

INFORMACIJE O MAGISTARSKOM RADU

Naziv postdiplomskog studija: **Akaderske magistarske studije FIZIKE**

Naslov rada: **Koncentracije radona (²²²Rn) u zemljištu Podgorice**

Fakultet/Akademija na kojem je rad odbranjen: **Prirodno-matematički fakultet**

UDK, OCJENA I ODBRANA MAGISTARSKOG RADA

Datum prijave magistarskog rada: **23. 11. 2016.**

Datum sjednice Vijeća na kojoj je prihvaćena tema: **09. 02. 2017. godine**

Komisija za ocjenu teme i podobnosti magistranda:

**prof. dr Nevenka Antović
prof. dr Nataša Raičević
prof. dr Perko Vukotić**

Mentor:

prof. dr Nevenka Antović

Komisija za ocjenu rada:

**prof. dr Nevenka Antović
prof. dr Nataša Raičević
prof. dr Perko Vukotić**

Komisija za odbranu rada:

**prof. dr Nevenka Antović
prof. dr Nataša Raičević
prof. dr Perko Vukotić**

Lektor:

prof. Lola Bulatović

Datum odbrane:

24. 05. 2017. godine

Datum promocije:

Predgovor

Ovaj magistarski rad je posvećen daljem prikupljanju podataka o koncentracijama radona u zemljištu na teritoriji Podgorice, imajući u vidu da je tlo glavni izvor ovog gasa u stambenom i radnom prostoru, i da je njegovo udisanje štetno po zdravlje.

Koristeći mjernu opremu Prirodno-matematičkog fakulteta Univerziteta Crne Gore i Centra za ekotoksikološka ispitivanja iz Podgorice, mjerenje koncentracije aktivnosti radona-222 je vršeno na terenu pomoću radonskog detektora RAD7, a u laboratoriji pomoću ORTEC HPGe, spektrometrijskog sistema, određivana je koncentracija aktivnosti prirodnog radionuklida radijuma-226, koji je roditelj radona.

Dio istraživanja i analiza rezultata, urađeni su u okviru projekta *Nuklearna spektrometrija i njen značaj za zaštitu životne sredine* (Ministarstvo nauke, Centar za ekotoksikološka ispitivanja).

Tokom izrade ovog rada, značajnu pomoć dobio sam i od Centra za ekotoksikološka ispitivanja (CETI), i to od Ranka Zekića i dr Nikole Svrkote. Ovom prilikom im se zahvaljujem na pomoći.

Jasmin Kuč, spec. fizike

U Podgorici, 21. 03. 2017. godine

Izvod rada

U radu su prikazani rezultati istraživanja koncentracija aktivnosti radona (^{222}Rn) u gasu u zemljištu Podgorice. Mjerenja su izvršena pomoću radonskog detektora RAD7 na 10 lokacija, javnih površina, na gradskom području Podgorice. Na istim lokacijama uzorkovano je zemljište, koje je analizirano pomoću ORTEC HPGe spektrometra, na koncentracije aktivnosti ^{226}Ra , radioaktivnog roditelja ^{222}Rn . Rezultati su korišćeni za procjene koncentracija radona u zemljištu na datim lokacijama.

Kao što je i bilo očekivano, dobijene su značajno veće koncentracije ^{222}Rn u gasu u zemljištu (mjerenja i procjene), od onih koje su izmjerene u zatvorenom prostoru.

Opseg izmjerenih koncentracija aktivnosti ^{222}Rn u zemljištu je od 97.3 Bq/m^3 do 45.4 kBq/m^3 , dok su srednje vrijednosti mjerenja pokazale minimum, maksimum, srednju vrijednost, standardnu devijaciju i medijanu u iznosu 5.1, 40.4, 19.1, 11.5 i 16.8 kBq/m^3 , respektivno. Geometrijska sredina je 16 kBq/m^3 , a geometrijska standardna devijacija – blizu 2. Ove koncentracije su manje od onih koje su na teritoriji Podgorice (u Berima, Tološima, Momišićima i Zabjelu) prethodno izmjerene pasivnim radiometrom.

Srednja vrijednost gustine fluksa radona na površini suvog zemljišta, $0.014 \text{ Bq/(m}^2\text{s)}$, pokazuje dobro slaganje sa srednjim fluksom koji je procijenjen za globalni nivo.

Procijenjene koncentracije ^{222}Rn (na osnovu ^{226}Ra u površinskom sloju zemljišta) pokazale su minimum, maksimum, srednju vrijednost, standardnu devijaciju i medijanu oko 15, 43.2, 27.9, 8.4 i 25.9 kBq/m^3 , respektivno. Geometrijska sredina je 26.8 kBq/m^3 , a geometrijska standardna devijacija 1.36. Srednja vrijednost procijenjene koncentracije radona pokazuje solidno slaganje sa srednjom koncentracijom radona, koja je prethodno, pasivnim radiometrom, izmjerena na području Zabjela (29 kBq/m^3).

Uočene su značajne razlike između procijenjenih i izmjerenih koncentracija ^{222}Rn , osim u slučaju zemljišta sa dubine (0.10-0.15) m na mjernoj tački park Gorica, gdje postoji gotovo idealno slaganje (99 %) procjena i rezultata mjerenja.

Abstract

The results of research on radon (^{222}Rn) activity concentrations in soil gas in Podgorica, are presented in this work. Measurements were performed using the RAD7 radon detector at 10 locations, public areas in the town of Podgorica. At the same locations, soils were sampled and then analyzed by the ORTEC HPGe spectrometer – on activity concentrations of ^{226}Ra , the radioactive parent of ^{222}Rn . The results were used to estimate radon concentrations in soil at given locations.

As it was expected, in compare to those measured indoor, significantly higher ^{222}Rn concentrations in soil gas were obtained (in measurements and estimations).

A range of measured ^{222}Rn activity concentrations in soil is found to be between 97.3 Bq/m³ and 45.4 kBq/m³, while average measured values showed minimum, maximum, arithmetic mean, standard deviation and median of 5.1, 40.4, 19.1, 11.5 and 16.8 kBq/m³, respectively. Geometric mean is 16 kBq/m³, and geometric standard deviation – close to 2. These concentrations are lower than those previously measured at the territory of Podgorica (in Beri, Tolosi, Momisici and Zabjelo) by the passive radiometer.

An average flux density of radon at the surface of dry soil, 0.014 Bq/(m²s), shows a good concordance with the estimated mean worldwide flux.

Estimated ^{222}Rn concentrations (based on ^{226}Ra in surface soil layer) showed minimum, maximum, arithmetic mean, standard deviation and median of about 15, 43.2, 27.9, 8.4 and 25.9 kBq/m³, respectively. Geometric mean is 26.8 kBq/m³, and geometric standard deviation 1.36. The mean of estimated radon concentrations shows a good agreement with a mean radon concentration previously measured by the passive radiometer in the area of Zabjelo (29 kBq/m³).

Significant differences between the estimated and measured ^{222}Rn concentrations are noted, except for the soil from depth of (0.10-0.15) m at the park Gorica measuring point, where there is almost perfect agreement (99 %) of estimations and measuring results.

Sadržaj

UVOD	6
1. RADON – KARAKTERISTIKE I IZVORI	8
1.1. Radon, aktinon i toron	8
1.2. Izvori radona, <i>outdoor</i> i <i>indoor</i> koncentracije	11
1.2.1. Doza od udisanja radona	13
2. TEHNIKE MJERENJA RADONA	15
2.1. Osnovne karakteristike uređaja RAD7	16
2.1.1. Detektor i spektar uređaja RAD7	17
2.1.2. Osnovne karakteristike RAD7 pri mjeranju koncentracija radona u zemljištu	18
2.2. Procjene koncentracija ^{222}Rn na osnovu koncentracija aktivnosti ^{226}Ra u zemljištu	20
2.2.1. Mjerenje koncentracija aktivnosti ^{226}Ra u zemljištu	20
2.2.2. HPGe spektrometri u Centru za ekotoksikološka ispitivanja	21
3. PODACI O KONCENTRACIJAMA RADONA U CRNOJ GORI	23
3.1. Radon u vazduhu <i>indoor</i>	23
3.2. Mjerenje radona u zemljištu u Crnoj Gori	29
4. LOKACIJE I ODREĐIVANJE KONCENTRACIJA RADONA U ZEMLJIŠTU	31
4.1. Mjerne lokacije	32

4.2. Postupci mjerenja	33
4.2.1. Mjerenje koncentracija radona u zemljištu	33
4.2.2. Mjerenje koncentracija aktivnosti ^{226}Ra u uzorcima zemljišta	36
5. REZULTATI MJERENJA I DISKUSIJA REZULTATA	40
5.1. Radijum-226 u zemljištu Podgorice	40
5.2. Radon-222 u zemljištu Podgorice	43
5.2.1. Izmjerene koncentracije ^{222}Rn u zemljištu	43
5.3. Odnos izmjerenih i procijenjenih koncentracija ^{222}Rn	51
5.3.1. Procjene koncentracija ^{222}Rn pomoću parametara iz UNSCEAR 2000	53
5.3.2. Procjene koncentracija ^{222}Rn na osnovu aktivnosti ^{226}Ra u zemljištu Podgorice	61
5.3.3. Gustina fluksa radona na površini suvog zemljišta	69
5.3.4. Poređenja koncentracija ^{222}Rn u zemljištu Podgorice i indoor koncentracija u Podgorici	70
6. ZAKLJUČAK	73
Literatura	75
Popis tabela i slika	79

UVOD

Radon je prirodni radioaktivni gas, bez mirisa i boje. Njegov hemijski simbol je Rn, a redni broj $Z = 86$.

Postoji veći broj izotopa radona, ali su najznačajni – aktinon (^{219}Rn), toron (^{220}Rn) i radon (^{222}Rn), koji potiču iz radioaktivnih nizova ^{235}U , ^{232}Th i ^{238}U , respektivno. Imajući u vidu zastupljenost u prirodi, i dominantnu prisutnost ^{238}U u odnosu na ^{235}U u prirodnom uranu (~99.27 % naprema ~0.72 %), kao i karakteristike raspada, izotop ^{222}Rn , koji se i zove radon, je najznačajniji i najčešće se proučava.

Inhalacija ^{222}Rn daje godišnju dozu zračenja koja je gotovo jednaka dozi koju stanovništvo prima od svih ostalih prirodnih izvora jonizujućih zračenja. Istovremeno, zbog karakteristika produkata raspada, njegovo udisanje nosi rizik od kancera pluća. Prema dosadašnjim saznanjima, inhalacija ^{222}Rn je glavni uzročnik kancera pluća kod nepušača, dok je kod pušača ona na drugom mjestu, poslije pušenja.

Zbog toga se međunarodne organizacije, kao što su Svjetska zdravstvena organizacija – WHO (World Health Organization), Naučni komitet za efekte zračenja Ujedinjenih nacija – UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation), Međunarodna komisija za radiološku zaštitu – ICRP (International Commission on Radiological Protection), Savjet Evropske unije i druge, bave radonom i njegovim koncentracijama, preporučuju dozvoljene nivoe izlaganja i slično, a i države pojedinačno, nacionalnim propisima (zakonima i pravilnicima), shodno preporukama međunarodnih organizacija, propisuju dozvoljene nivoe izlaganja i obavezna mjerenja koncentracija radona u stambenom i radnom prostoru.

Zbog navedenog, istraživanja radona i njegovih koncentracija su u mnogim aspektima aktuelna i značajna (razvoj metoda mjerenja, sama mjerenja, analize i interpretacija rezultata, itd.). Treba napomenuti da je koncentracija radona, tj. koncentracija aktivnosti radona, koja je predmet ovog rada, tzv. zapreminska koncentracija (izražena u $[\text{Bq}/\text{m}^3]$), za razliku od koncentracije aktivnosti njegovog roditelja radijuma, koja je masena (izražena u $[\text{Bq}/\text{kg}]$), a koja se takođe razmatra u ovom radu.

U Crnoj Gori su do sada intenzivno ispitivane koncentracije aktivnosti radona u stambenom prostoru – *indoor*, ali postoji mali broj podataka o koncentraciji radona u gasu u zemljištu, tj. u tlu, koje faktički predstavlja njegov glavni izvor, i odakle on u najvećoj mjeri dopijeva u građevinske objekte.

Predmet ovog rada su koncentracije radona u zemljištu. Njegov cilj je da se u tom smislu ispita određen broj lokacija na gradskom području Podgorice.

Pretpostavka je da su koncentracije radona u zemljištu (tj. u gasu u zemljištu) znatno veće od izmjerenih koncentracija radona u vazduhu *indoor*, kao i da ne postoji jednostavna korelacija između koncentracija aktivnosti ^{226}Ra (roditelja) u zemljištu i ^{222}Rn (potomka) u gasu u zemljištu, na datoj lokaciji. Zbog toga su koncentracije radona izmjerene direktno uređajem RAD7 i procijenjene na osnovu koncentracija aktivnosti njegovog roditelja ^{226}Ra u zemljištu na istom mjernom mjestu.

U radu su razmatrane karakteristike i izvori radona (glava 1), kao i korišćene tehnike mjerenja (glava 2), s posebnim osvrtom na karakteristike uređaja RAD7 i njegovo korišćenje za mjerenje koncentracija aktivnosti radona u zemljištu. Dostupni podaci o koncentracijama radona u Crnoj Gori navedeni su u glavi 3, a zatim su (u glavi 4) opisane mjerne lokacije i mjerenja sprovedena u okviru ovog rada. Rezultati mjerenja i diskusija rezultata, uključujući i koncentracije aktivnosti ^{226}Ra u zemljištu izabranih lokacija, dati su u glavi 5. Slijedi zaključak (glava 6), a zatim i popis korišćene literature i tabela i slika sadržanih u radu.

1. RADON – KARAKTERISTIKE I IZVORI

Radon je element koji se nalazi u osamnaestoj grupi Periodnog sistema. Prirodni je inertni gas i ima ga svugdje gdje postoje izotopi od kojih nastaje.

1.1. Radon, aktinon i toron

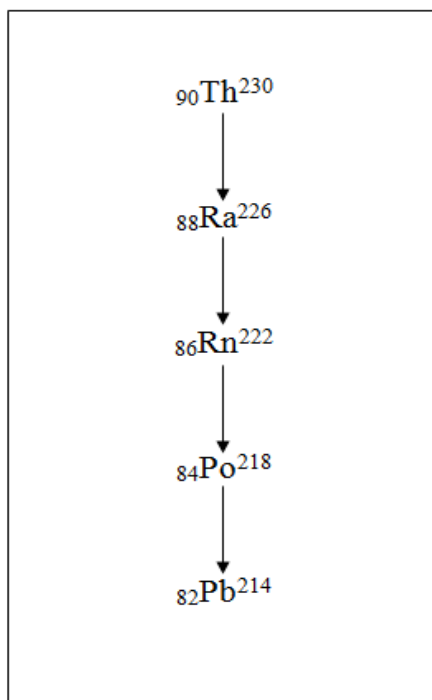
Među izotopima radona najznačajniji su oni koji se javljaju u prirodnim radioaktivnim nizovima. Iako se radi o istom elementu (isti redni broj), jezgra i svojstva izotopa su drugačija, jer imaju različiti broj neutrona, tj. različit maseni broj (zbir broja protona i broja neutrona) [1]. Treba napomenuti i da je alfa radioaktivnost proces transformacije jezgra putem alfa raspada, kada se primarno jezgro transformiše u jezgro elementa rednog broja manjeg za 2 (i masenog broja manjeg za 4), uz emisiju α -čestice, koju čine 2 protona i 2 neutrona [1].

Uran-radijumski niz počinje rodonačelnikom – ^{238}U , koji ima period poluraspada $4.47 \cdot 10^9$ godina [2], a zadnje u nizu je olovo ^{206}Pb , koje je stabilno. U ovom nizu postoji 18 radioizotopa (^{234}Th , $^{234}\text{Pa}/^{234\text{m}}\text{Pa}$, ^{234}U , ^{230}Th , ^{226}Ra , ^{222}Rn , ^{218}Po , ^{218}At , ^{218}Rn , ^{214}Pb , ^{214}Bi , ^{214}Po , ^{210}Tl , ^{210}Pb , ^{210}Bi , ^{210}Po , ^{206}Hg , ^{206}Tl), koji se transformišu putem α - ili β -raspada [3].

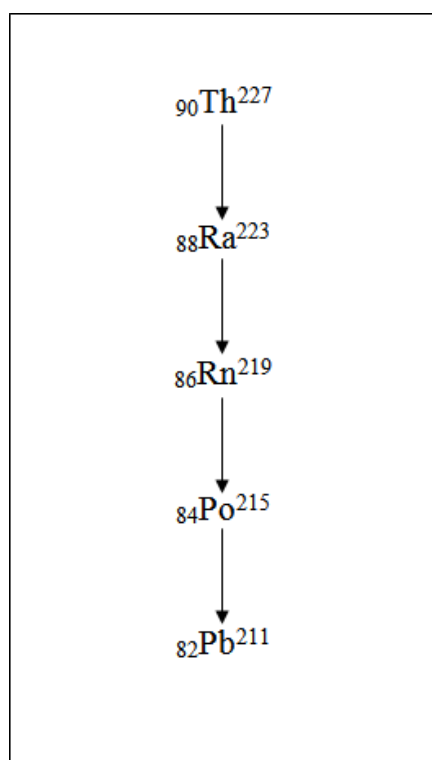
Uran-aktinijumski niz počinje izotopom urana ^{235}U , koji ima period poluraspada $7.04 \cdot 10^8$ godina [2], a zadnji u nizu je stabilni izotop ^{207}Pb . U ovom nizu se javlja 15 radioizotopa (^{231}Th , ^{231}Pa , ^{227}Ac , ^{227}Th , ^{223}Fr , ^{223}Ra , ^{219}At , ^{219}Rn , ^{215}Bi , ^{215}Po , ^{215}At , ^{211}Pb , ^{211}Bi , ^{211}Po , ^{207}Tl), koji se transformišu putem α - ili β -raspada, a ^{227}Ac , ^{223}Fr , ^{219}At , ^{215}Po i ^{211}Bi se transformišu na oba načina [3].

Rodonačelnik torijumskog niza je ^{232}Th , koji ima period poluraspada $1.4 \cdot 10^{10}$ godina [2]. Završni izotop u nizu je stabilno olovo ^{208}Pb . U nizu se javlja 10 radioizotopa (^{228}Ra , ^{228}Ac , ^{228}Th , ^{224}Ra , ^{220}Rn , ^{216}Po , ^{212}Pb , ^{212}Bi , ^{212}Po , ^{208}Tl), od kojih se samo jedan raspada na dva načina, i to ^{212}Bi [3].

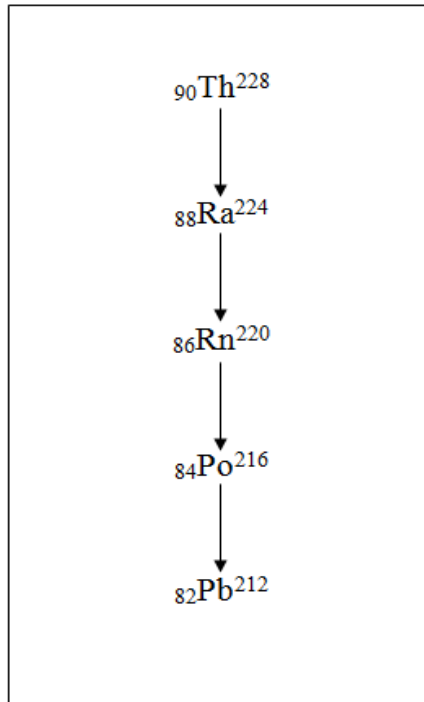
Djelovi nizova u kojima se javljaju izotopi radona, gasoviti, su predstavljeni na slikama 1.1, 1.2, 1.3.



Slika 1.1. Dio uran-radijumskog niza u kojem se javlja radon (${}^{222}\text{Rn}$).



Slika 1.2. Dio uran-aktinijumskog niza u kojem se javlja izotop radona aktinon (${}^{219}\text{Rn}$).



Slika 1.3. Dio torijumskog niza u kojem se javlja izotop radona toron (${}^{220}\text{Rn}$).

Izotopi radona nastaju α -raspadom pojedinih izotopa radijuma, a i sami se dalje transformišu istim tipom radioaktivnog raspada.

Izotop ${}^{222}\text{Rn}$ nastaje nakon α -raspada ${}^{226}\text{Ra}$ (slika 1.1.), a sam se dalje transformiše u ${}^{218}\text{Po}$. Na slici 1.2. se vidi da se drugi izotop radijuma (${}^{223}\text{Ra}$) α -raspadom transformiše u aktinon (${}^{219}\text{Rn}$), koji se α -raspadom transformiše u ${}^{215}\text{Po}$, a na slici 1.3. se vidi da toron (${}^{220}\text{Rn}$) nastaje od ${}^{224}\text{Ra}$ i da se dalje α -raspadom transformiše u ${}^{216}\text{Po}$ [3].

U tabelama 1.1. i 1.2, prikazane su osnovne karakteristike izotopa radona [2, 4, 5].

Tabela 1.1. Osnovne karakteristike izotopa radona [2, 4, 5].

Izotop radona	Naziv	Z (broj protona u jezgru)	N (broj neutrona u jezgru)	Maseni broj A= Z+N	Period poluraspada
${}^{222}\text{Rn}$	Radon	86	136	222	3.82 d
${}^{220}\text{Rn}$	Toron	86	134	220	55.6 s
${}^{219}\text{Rn}$	Aktinon	86	133	219	3.96 s

Tabela 1.2. Najintenzivniji zraci iz raspada izotopa radona [2].

Izotop radona	Alfa emisije		Gama emisije			X emisije	
	E_α [keV]	I_α [%]	E_γ [keV]	I_γ [%]	Tip raspada	E_x [keV]	I [%]
^{222}Rn	5489.52	99.92	511	0.076	α	-	-
	4987	0.078					
	4827	~0.0005					
^{220}Rn	6288.1	99.886	549.76	0.114	α	79.29	$9.8 \cdot 10^{-4}$
		76.863				$5.8 \cdot 10^{-4}$	
	11.13	$3.6 \cdot 10^{-4}$					
	5747	0.114				13.443	$2.8 \cdot 10^{-4}$
	86.807	$2.2 \cdot 10^{-4}$					
	89.256	$1.17 \cdot 10^{-4}$					
13.328	$9.1 \cdot 10^{-5}$						
^{219}Rn	6819.1	79.4	271.23	10.8	α	79.29	0.9
	6552.6	12.9	401.81	6.37	α	76.863	0.54
	6425.0	7.5	130.59	0.119	α	11.13	0.38
	6529.0	0.12	293.54	0.073	α	13.443	0.327
	6311.8	0.054	517.63	0.0443	α	89.807	0.206
	6158.6	0.0174	221.5	0.03	α	89.256	0.108
	6000.8	0.0044	676.64	0.0205	α	13.328	0.095

1.2. Izvori radona, *outdoor* i *indoor* koncentracije

Svi materijali koji sadrže uran (radijum), sadrže i radon – stijene, zemljište, građevinski materijali, kao i voda, prirodni gas. Od karakteristika zemljišta i stijena ispod njega, sadržaja urana (tj. ^{226}Ra) i načina kako se radon nastao raspadom ^{226}Ra kreće kroz ove strukture, zavisi i nivo njegove koncentracije – u zemljištu, vodi, u atmosferi i slično. Nivo njegovih koncentracija u zatvorenom prostoru zavisi i od drugih faktora – emanacije iz tla (što zavisi od koncentracije aktivnosti radijuma, permeabilnosti i vlažnosti zemljišta, vegetacije, vremenskih prilika [4, 5]), ulaska u prostor, pozicije prostora (poznato je da su najveće koncentracije u podrumskim prostorijama, prizemlju ili prvom spratu – jer je glavni izvor radona u zatvorenom prostoru najčešće podloga ispod građevine), ventilacije [4, 5].

Svi tipovi stijena sadrže neku koncentraciju urana (u srednjem, od 1 ppm do 3 ppm [6]). Uopšteno, koncentracije urana u stijenama i u zemljištu izvedenom iz tih stijena mogu biti približno jednake. Neke stijene imaju povećane koncentracije urana, kao što su: svijetle vulkanske stijene, granit, tamni škriljac, sedimentne stijene koje sadrže fosfat i metamorfne stijene. Koncentracija urana u ovim stijenama (i njihovim zemljištima) može dostići vrijednost i 100 ppm [6]. Kako se navodi u literaturi [7], depoziti crvenih boksita, karakteristični na primjer za područje Nikšića, imaju sadržaj urana (4-14) $\mu\text{g/g}$, što je znatno više od srednjeg u kori Zemlje (2.5 $\mu\text{g/g}$).

Radon, nastao raspadom radijuma, relativno lako napušta stijene i zemljište, zahvaljujući porama i pukotinama [6, 8]. Podloge koje su rastresite i imaju više pora, kao što su šljunak i pijesak, „propuštaju“ radon, dok one koje imaju manje pora, kao što je glina, „otežavaju“ njegovo kretanje. Kretanje radona zavisi od količine vode koja se nalazi u porama, procenta pora u zemljištu (poroznosti), propustljivosti (permeabilnosti) zemljišta [6]. Vlažnost zemljišta igra važnu ulogu u emanaciji radona i njegovoj difuziji u zemljištu [8].

U izvještaju UNSCEAR 2000 [8], navodi se da su radonske koncentracije u zemljištu, u okviru nekoliko metara površinskog dijela tla, veoma važne za određivanje ulaska radona u pore i, zatim, u atmosferu. One zavise od distribucije i koncentracije roditelja (^{226}Ra) u stijenama, permeabilnosti zemljišta i slično. Uopšte, granit ima relativno visok, sedimentne i metamorfne stijene – srednji, a bazaltne i većina krečnjačkih – nizak sadržaj radijuma [8], iako je to gruba generalizacija, jer postoje široki opsezi za svaki od navedenih tipova. Kad su zemljišta u pitanju, generalizacija je još složenija [8].

Kada se govori o koncentraciji radona, razlikuju se dvije vrste koncentracija, i to: *outdoor* i *indoor*. *Outdoor* je koncentracija radona na otvorenom prostoru, tj. u spoljašnjoj sredini, a *indoor* je koncentracija radona u zatvorenom prostoru. Prema UNSCEAR izvještaju iz 2006. godine, koji je posvećen radonu u stambenom i radnom prostoru (aneks E) [9], koncentracije radona napolju zavise, ne samo od brzine emisije iz podloge, nego i od uslova u atmosferi. Na primjer, solarno zagrijavanje tokom dana izaziva turbulencije i radon brže ide nagore i dalje od podloge. Noću i rano ujutro, atmosferska (temperaturna) inverzija „drži“ radon bliže podlozi [9]. Tipični *outdoor* nivoi radona i torona su reda 10 Bq/m^3 [9], ali zbog te inverzije, koncentracije mogu varirati i za faktor 10. Uočene su i značajne sezonske varijacije u koncentracijama radona, a u tom izvještaju UNSCEAR se navodi da su *outdoor* nivoi radona – osnova za *indoor* nivoe, kao i da su u tropima *indoor* i *outdoor* koncentracije suštinski jednake, zbog brzih izmjena unutrašnjeg i spoljašnjeg vazduha [9].

Kad je riječ o *indoor* koncentracijama, one su veće, a glavni razlozi ulaska gasa radona iz podloge su: razlika u vazдушnim pritiscima između zemljišta i kuće, prisustvo otvora u podlozi i povećanje permeabilnosti oko podruma (ako postoji) [6]. Odnosno, u kućama sa visokim nivoima radona, glavni mehanizam ulaska je protok (usljed razlike u pritiscima) gasa kroz pukotine u podu [9]. On, takođe, iz zemljišta u zgradu prodire i kroz veze između zidova i ploča, odvodne cijevi, podne slivnike, itd. [4].

Vazduh unutar kuće je uobičajeno na nešto nižem pritisku nego vazduh napolju, pa razlika u pritiscima pokreće radon. Ovaj potpritisak je posljedica toga što je vazduh u unutrašnjosti nešto topliji nego napolju. Posebno u umjerenim zonama, ovo izaziva konvektivni protok („efekat dimnjaka“), koji, zajedno sa efektom vjetra preko dimnjaka i drugih otvora („Venturijev efekat“), pokreće i uvodi zemljišni gas i radon u zgradu [9]. Dodatno, drugi faktori, kao što su i relativna vlažnost i vlažnost zemljišta, takođe utiču na nivo radona u zgradama [9]. Takođe, neki porozni građevinski materijali, sa visokim nivoima sadržaja radijuma, mogu biti značajan izvor radona *indoor*. Poznato je i da podzemne vode, posebno u granitnim područjima, mogu imati visoke nivo radona [9].

Na svjetskom nivou, medijana aritmetičkih sredina *indoor* radonskih koncentracija iznosi 46 Bq/m^3 , geometrijskih sredina 37 Bq/m^3 , a maksimalno izmjenjenih vrijednosti – 480 Bq/m^3 [8].

1.2.1. Doza od udisanja radona

Prema izvještaju UNSCEAR 2008, najveća doza koja dolazi od prirodnih izvora zračenja (tabela 1.3.) je od udisanja radona [10]. Na svjetskom nivou, srednja godišnja efektivna doza koju čovjek prima od svih prirodnih izvora zračenja iznosi 2.4 mSv , od čega čovjek udisanjem radona za godinu primi 1.15 mSv [8, 10]. Iz tabele 1.3, vidi se da udisanje radona doprinosi srednjoj godišnjoj efektivnoj dozi od svih prirodnih izvora oko 47.92 %. Izotopi radona (radon i toron), koji daju 99.2 % inhalacione doze (a sam radon – oko 91.3 %), na svjetskom nivou sumarno doprinose srednjoj godišnjoj efektivnoj dozi jonizujućih zračenja od prirodnih izvora oko 52.1 %. Doprinos torona ukupnoj inhalacionoj izloženosti je 7.94 %, dok je doprinos njegove inhalacije ukupnoj srednjoj godišnjoj efektivnoj dozi 4.17 %.

Često se (UNSCEAR) koncentracije radona ili torona navode u smislu tzv. ravnotežne ekvivalentne koncentracije (EEC, equilibrium-equivalent concentration). Radi se o koncentraciji produkata raspada u ravnoteži sa gasom roditeljem [9]:

$$EEC (^{222}\text{Rn}) = 0.105 (^{218}\text{Po}) + 0.516 (^{214}\text{Pb}) + 0.379 (^{214}\text{Bi}) \quad (1.1)$$

$$EEC (^{220}\text{Rn}) = 0.91 (^{212}\text{Pb}) + 0.087 (^{212}\text{Bi}), \quad (1.2)$$

gdje su ^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi , ^{212}Pb , ^{212}Bi i EEC izraženi u Bq/m^3 [9].

Tabela 1.3. Godišnje efektivne doze od prirodnih izvora zračenja [10].

Izvor	Godišnja efektivna doza [mSv]	
	Srednja vrijednost	Opseg
<i>Kosmičko zračenje</i>		
Direktno jonizujuće i fotonska komponenta	0.28	
Neutronska komponenta	0.10	
Kosmogeni radionuklidi	0.01	
Ukupno	0.39	0.3-1.0
<i>Spoljašnje terestrijalno zračenje</i>		
<i>Outdoors</i>	0.07	
<i>Indoors</i>	0.41	
Ukupno	0.48	0.3-1.0
<i>Inhalacija</i>		
Nizovi urana i torijuma	0.006	
Radon	1.15	
Toron	0.10	
Ukupno	1.26	0.2-10
<i>Ingestija</i>		
K-40	0.17	
Nizovi urana i torijuma	0.12	
Ukupno	0.29	0.2-1.0
Ukupno	2.4	1-13

Iako doze i rizik od radona nijesu predmet ovog rada, treba reći da je u kućama, rudnicima i na drugim mjestima gdje je slaba ventilacija prostora, povećana koncentracija radona i torona u vazduhu, a tim i njihovih produkata. Sa povećanom koncentracijom radona u vazduhu povećava se i rizik od kancera pluća. Zbog toga, najveći rizik oboljenja od kancera pluća imaju ljudi sa radnim mjestom u rudnicima, pećinama, metroima, podzemnim garažama, tj. sa radnim mjestima ispod površine zemlje [9].

2. TEHNIKE MJERENJA RADONA

Princip mjerenja koncentracija aktivnosti izotopa radona zasnovan je na detekciji zračenja iz njihovih raspada, ili zračenja iz raspada njihovih potomaka. Za njihovu registraciju koriste se različiti tipovi detektora: detektori tragova, termoluminiscentni detektori, jonizacione komore, proporcionalni gasni brojači, scintilacioni detektori, poluprovodnički detektori sa površinskom barijerom, i drugi [4, 5, 11].

Pošto se izotopi radona raspadaju putem alfa raspada, za njihovu detekciju su pogodni detektori α -zračenja. Kod elektronskih radonskih monitora, na primjer, najčešće se koriste scintilacione (Lukasove) ćelije, jonizacione komore i čvrsti (*solid state*) alfa detektori. Mogu se koristiti i detektori β - i γ -zračenja (posebno kad je uspostavljena radioaktivna ravnoteža [12], pa se aktivnost roditelja može odrediti preko aktivnosti potomaka, čiji su gama zraci većih intenziteta). Koriste se i apsorberi sa ugljem, koji se zatim analiziraju pomoću gama spektrometara [9].

Za mjerenje radona koriste se razne tehnike i metode. I podjele tehnika mjerenja su različite, ali se generalno prema vremenu ekspozicije (mjerenja) one dijele na ekspresne i integralne, a važna je i podjela na aktivne i pasivne tehnike (kakva je, na primjer, primjena detektora tragova za registraciju α -čestica iz raspada radona, kod kojih se, na primjer, detektor mjesecima izlaže α -zračenju iz raspada radona u vazduhu).

Za mjerenje radona koje je predmet ovog rada, korišćen je RAD7 *DURRIDGE Radon Detector*, pa će taj uređaj biti detaljnije opisan.

Koncentracije radona u gasu u zemljištu procjenjuju se i na osnovu koncentracije aktivnosti ^{226}Ra u uzorcima zemljišta sa datog mjernog mjesta, koju je moguće odrediti standardnim gama spektrometrijskim mjerenjem. Zbog toga će biti opisani i gama spektrometri, koji su korišćeni u ovom istraživanju.

2.1. Osnovne karakteristike uređaja RAD7

Uređaj RAD7 *DURRIDGE Radon Detector* je elektronski detektor za mjerenje koncentracije radona u realnom vremenu. Koristi se u laboratorijama i istraživanjima širom svijeta – za mjerenje radona u vazduhu, vodi, zemljištu [13].

Dimenzije detektora RAD7 su 29.5 cm x 21.5 cm x 27.9 cm, a njegova masa iznosi 4.35 kg. Detektor ima visok unutrašnji napon (može biti i više od 2500 V), a tip baterije je *Gates Monobloc* od 6 V, odnosno 2.5 Ah [13].

Po specifikaciji proizvođača, radni uslovi detektora su pri temperaturi između 0 °C i 45 °C i vlažnosti vazduha do 100 %. Detektor mjeri koncentracije radona koje se kreću u rasponu od 4.0 do 750 000 Bq/m³, i posjeduje LCD ekran sa dva reda sa po šesnaest karaktera, a takođe i bežični infracrveni štampač marke Omniprint OM1000 [13].

Detektor može da odvoji „stari“ radon od „novog“ radona (zahvaljujući različitim prozorima u radonskim spektrima, kojih ima četiri – A, B, C, D), a može se dobiti i kombinacija spektara (na primjer, A – novi radon sa novim toronom, B – ekvilibrijumski (ravnotežni) radon sa novim toronom, C – ekvilibrijumski radon sa ekvilibrijumskim toronom, D – ekvilibrijumski radon sa starim toronom, E – stari radon sa starim toronom, F – novi radon sa starim toronom, G – novi toron sa starim radonom). Dostupno je nekoliko režima rada: *sniff* režim – koji vrši brzo mjerenje radona i može se koristiti za određivanje tačaka ulaska radona u prostoriju, *thoron* režim – pomoću koga se toron i radon mjere u isto vrijeme, nezavisno jedan od drugog, *normal* režim – pomoću kojeg se mjeri radon sa visokom osjetljivošću, *auto* režim – koji nakon tri sata automatski mijenja *sniff* na *normal* režim, a zatim i *grab* režim, kao i *wat* – za automatsku analizu uzoraka vode [13].

Treba napomenuti da je mjerenje torona (²²⁰Rn) otežano, kako zbog prisustva radona (²²²Rn), tako i zbog kratkog vremena poluraspada. Za mnoge detektore, mjerenje torona i radona istovremeno je nemoguće ili veoma otežano (zbog njihove međusobne interferencije), ali detektor RAD7 to uspješno prevazilazi zahvaljujući mogućnosti razdvajanja izotopa na osnovu energije njihovih α -čestica. Čvrsti detektor, poluprovodnički materijal (Si), konvertuje α -zračenje u električni signal, sa sposobnošću uređaja da elektronski odredi energiju svake α -čestice, na osnovu čega se može znati o kom izotopu se radi (²¹⁸Po, ²¹⁴Po, itd.) [13].

Nominalna osjetljivost uređaja kod *sniff* režima iznosi 0.0067 imp/min/(Bq/m³), a kod *normal* režima 0.013 imp/min/(Bq/m³), dok se tačnost procjenjuje na $\pm 5\%$ [13]. Preciznost (zasnovana na statistici odbroja), u režimu *normal*, na primjer, sa osjetljivošću 0.5

imp/min/(pCi/L) ($1 \text{ pCi/L} = 37 \text{ Bq/m}^3$), data kao nesigurnost 2σ (interval povjerenja 95 %) u jedinicama pCi/L (%), pri koncentracijama na nivou 1 pCi/L, kreće se od 0.37 (37 %) – za 1 sat mjerenja, do 0.04 (4.3 %) – za 72 sata mjerenja; a pri nivou 100 pCi/L, kreće se od 3.65 (3.7 %) – za 1 sat, do 0.43 (0.4 %) – za 72 sata [13].

Kako se i navodi u specifikaciji uređaja [13], RAD7 može da se koristi za: kontinualni monitoring radona u vazduhu, *sniffing* za radon i/ili toron, testiranje uzoraka vazduha, mjerenje radona u vodi, testiranje zemljišnog gasa, mjerenja emisija radona i torona iz nekog objekta i sa neke površine.

Detektor posjeduje i pumpu pomoću koje usisava vazduh iz neke prostorije, iz neke dubine u zemljištu ili iz vode. Protok ove pumpe iznosi 800 mL/min (u *thoron* protokolu). Tipični srednji protok je manji od 0.2 L/min [13].

Uređaj posjeduje i hardver za povezivanje sa računarom [13], a propisani su i protokoli za različita mjerenja (na primjer, za kontinualni monitoring – prostorija mora biti zatvorena 12 sati prije mjerenja, itd.). Nakon povezivanja sa računarom, softver DURRIDGE CAPTURE omogućava različite dodatne proračune i korekcije (na primjer, na vlažnost).

2.1.1. Detektor i spektar uređaja RAD7

Uređaj RAD7 ima hemisfernu ćeliju zapremine 0.7 L, koja je obložena električnim provodnicima i u čijem centru se nalazi planarni silicijumski alfa detektor. Električno polje (kreirano potencijalima 2000 V do 2500 V u odnosu na detektor) unutar ćelije usmjerava pozitivno nalektrisanje na detektor [13].

Jezgro ^{222}Rn se raspada u ćeliji i ostavlja ^{218}Po kao pozitivan jon. Električno polje unutar ćelije prenosi pozitivni jon do detektora. Kratkoživeće jezgro ^{218}Po se raspada na površini detektora, njegova alfa čestica ima vjerovatnoću od 50 % da uđe u detektor i produkuje električni signal, jačine koja je proporcionalna njenoj energiji [13]. Iz pomenutog jezgra ^{218}Po , raspadom mogu nastati beta čestice koje se ne detektuju, ili alfa čestice koje imaju različite energije. Različiti izotopi imaju različite energije alfa čestica i proizvode različite jačine signala u detektoru, a detektor RAD7 pojačava, filtrira i svrstava signale po njihovim jačinama [13].

Detektor RAD7 (u *sniff* režimu) koristi samo signale ^{218}Po za mjerenje koncentracije radona, i signale ^{216}Po za mjerenje koncentracije torona, ignorišući ostale (dugoživeće)

potomke radona. Na ovaj način se ostvaruje brzi odgovor na promjene u koncentracijama radona, i brzi oporavak od visokih koncentracija [13].

Spektar uređaja predstavlja „skalu alfa energija od 0 do 10 MeV“, a energije alfa čestica koje emituju potomci radona i torona od interesa, su između 6 MeV i 9 MeV [13].

Kada se potomci radona i torona deponuju na površini detektora, njihovim daljim raspadom emituju se alfa čestice karakterističnih energija, koje se detektuju i pri tome proizvode električni signal, koji sistem zatim prevodi u digitalni signal. Mikroprocesor RAD7 izdvaja signale i smješta ih u posebno mjesto u memoriji, prema energiji čestica. Akumulacijom mnogo signala nastaje spektar. Skala, od 0 do 10 MeV, podijeljena je na 200 individualnih kanala, svaki energije 0.05 MeV [13].

Kombinacija različitih alfa emitera u spektru se javlja kao niz različitih pikova. Na primjer, kombinacija jednakih količina ^{218}Po i ^{214}Po (kao u slučaju ravnoteže potomaka radona), javlja se kao kombinacija dva (alfa) pika (blizanca). Za ^{218}Po , centar pika je na 6 MeV, a za ^{214}Po – na 7.69 MeV [13].

Alfa čestice energije 5.49 MeV, koje se emituju pri raspadu ^{222}Rn , ne pojavljuju se u spektru RAD7, jer se stvaraju u vazduhu, a ne na površini detektora. Atom ^{222}Rn je inertan i elektroneutralan, i ne može biti pokrenut do detektora. Dakle, spektar RAD7 pokazuje potomke radona, a ne sam radon [13].

2.1.2. Osnovne karakteristike RAD7 pri mjerenju koncentracija radona u zemljištu

Koncentracija radona u zemljištu (gasu u zemljištu) u blizini neke kuće je jedan od važnih parametara od kojih zavisi njegova koncentracija *indoor*, a time i rizik po zdravlje od njegovog udisanja. Bez obzira na to što su i drugi parametri, kao što su konstrukcija stambenog objekta, poroznost zemljišta, podzemne vode i slično, jako bitni, uvijek je od interesa izmjeriti koncentraciju radona u zemljištu na mjestu gdje se planira izgraditi stambeni objekat [13].

Gas u zemljištu ima visoku koncentraciju radona, pa, za postizanje preciznosti u mjerenju, nije potrebno dugo trajanje ciklusa u *sniff* opciji. Dovoljno je da se ciklusi podese na po 5 minuta [13].

Na prozoru LCD ekrana pri mjerenju koncentracije radona može se očitati temperatura, relativna vlažnost, napon baterije, jačina struje pumpe. Jedan od važnih parametara je vlažnost, koju treba postepeno smanjivati ispod 10 % i tako je održavati. Važan

parametar je i jačina struje pumpe, koja, ako počne da raste iznad 100 mA, sugeriše da zemljište nije porozno, što može da znači da se gas iz zemljišta ne može izvući (bez obzira kolika je snaga pumpe). Takođe, kada je jačina struje pumpe kod RAD7 iznad 100 mA, brzina protoka vazduha se značajno smanjuje (od nominalne 1 L/min). Ovo neće uticati na očitavanje radona, ali će smanjiti efektivnu osjetljivost na toron [13]. Moguće je koristiti i dodatnu pumpu, tako da RAD7 radi na normalnom pritisku. Kada se koristi spoljašnja pumpa, pumpa RAD7 se čak može i sasvim isključiti [13].

Kao i uvijek u *sniff* režimu, dva početna ciklusa (po 5 minuta) se zanemaruju, a sljedeći se usrednjavaju da bi se došlo do radonske koncentracije.

Neke procjene za toron moraju biti urađene za vrijeme uzorkovanja, tj. nakon što uzorak napusti zemlju i dospijeva do RAD7. Na primjer, ako je ukupna zapremina (puta) uzorka 2 L, sa protokom od 0.5 L/min, tada će „kašnjenje“ uzorka biti oko 4 minuta. Ako se uzme da je vrijeme poluraspada torona jedan minut, tada će za četiri minuta koncentracija biti samo 1/16 koncentracije koja je uzrokovana (tj. one u zemljištu), zbog čega se koncentracija torona izmjerena RAD7 množi sa 16 [13].

Za eksperimentalna istraživanja u okviru ovog rada korišćen je RAD7 Prirodno-matematičkog fakulteta u Podgorici (serijski broj 2197) – slika 2.1, dok je za poređenja korišćen i RAD7 Centra za ekotoksikološka ispitivanja (serijski broj 0595). Osnovni uređaj (2197) je posljednji put kalibrisan 21. 10. 2015. godine u Berlinu, Njemačka (Bundesamt für Strahlenschutz, Radon-Kalibreirlaboratorium).



Slika 2.1. RAD7 Prirodno-matematičkog fakulteta.

2.2. Procjene koncentracija ^{222}Rn na osnovu koncentracija aktivnosti ^{226}Ra u zemljištu

Koncentracija radona u gasu u zemljištu (C_{Rn}), u odsustvu transporta radona, računa se na osnovu koncentracije aktivnosti radijuma, pošto je radon njegov direktan potomak. Formula po kojoj se računa koncentracija radona je [8]:

$$C_{\text{Rn}} = C_{\text{Ra}} f \rho_s \varepsilon^{-1} (1 - \varepsilon) (m [K_T - 1] + 1)^{-1}, \quad (2.1)$$

gdje je C_{Ra} koncentracija aktivnosti radijuma u zemljištu (Bq/kg), f je faktor emanacije, ρ_s je gustina zemljišta (zrna) (2700 kg/m^3), ε je ukupna poroznost (uključujući obje faze – i vodu i gas), m je vodom ispunjena frakcija (poroznosti), tj. frakcija saturacije, i K_T je particioni koeficijent za radon između tečne (voda) i gasne faze [8]. Za suva zemljišta, m je nula i posljednji dio u formuli se može izostaviti. Za topla, vlažna zemljišta ($25 \text{ }^\circ\text{C}$), parametri su: $K_T = 0.23$, $m = 0.95$, $f = 0.2$ i $\varepsilon = 0.25$. Za ista zemljišta u uslovima suvog i hladnog vremena ($0 \text{ }^\circ\text{C}$) parametri su: $K_T = 0.53$, $m = 0.05$ [8].

Znajući ove parametre, nakon mjerenja koncentracija aktivnosti ^{226}Ra u uzorku zemljišta, moguće je procijeniti i koncentraciju ^{222}Rn u istom.

Kako se navodi u izvještaju UNSCEAR 2000, osnovni mehanizam ulaska radona u atmosferu je molekularna difuzija. Za poroznu masu homogenog materijala, gustina fluksa radona (iz tla) na površini suvog zemljišta (J_D , u $\text{Bq}/(\text{m}^2\text{s})$) je [8]:

$$J_D = C_{\text{Ra}} \lambda_{\text{Rn}} f \rho_s (1 - \varepsilon) L, \quad (2.2)$$

gdje je C_{Ra} koncentracija aktivnosti radijuma (Bq/kg), λ_{Rn} je konstanta raspada ^{222}Rn ($2.1 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$), f je faktor emanacije (0.2), ρ_s je gustina zemljišta (zrna) (2700 kg/m^3), ε je poroznost suvog materijala (0.25), L je difuziona dužina jednaka $(D_e/\lambda_{\text{Rn}})^{1/2}$, D_e je efektivni difuzioni koeficijent, koji, za date vrijednosti f i ε , iznosi $2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ [8].

2.2.1. Mjerenje koncentracija aktivnosti ^{226}Ra u zemljištu

Mjerenje ^{226}Ra u različitim uzorcima vršeno je različitim mjernim sistemima i tehnikama – alfa spektrometrijom, gama spektrometrijom, uključujući višedetektorsku

spektrometriju i primjenu koincidentnih metoda, tj. mjerenja gama-gama koincidencija [14-18], kao i Čerenkovljevim brojačima [19], tečnim scintilacionim brojačima [20], uključujući i detekciju α - β koincidencija [21].

Ukoliko se koristi standardna gama spektrometrija (na primjer, poluprovodnički detektor, tj. HPGe (*High Purity Germanium*) spektrometerski sistem), nakon odgovarajućeg uzorkovanja i pripreme uzorka za mjerenje [22, 23], i nakon uspostavljanja radioaktivne ravnoteže između radijuma i njegovih potomaka, pri hermetizaciji uzorka (koja sprečava emanaciju radona) tokom 38 i više dana [1] – aktivnost ^{226}Ra u uzorku zemljišta može se odrediti na osnovu gama zračenja iz raspada njegovih potomaka (^{214}Pb , ^{214}Bi , na primjer [5]).

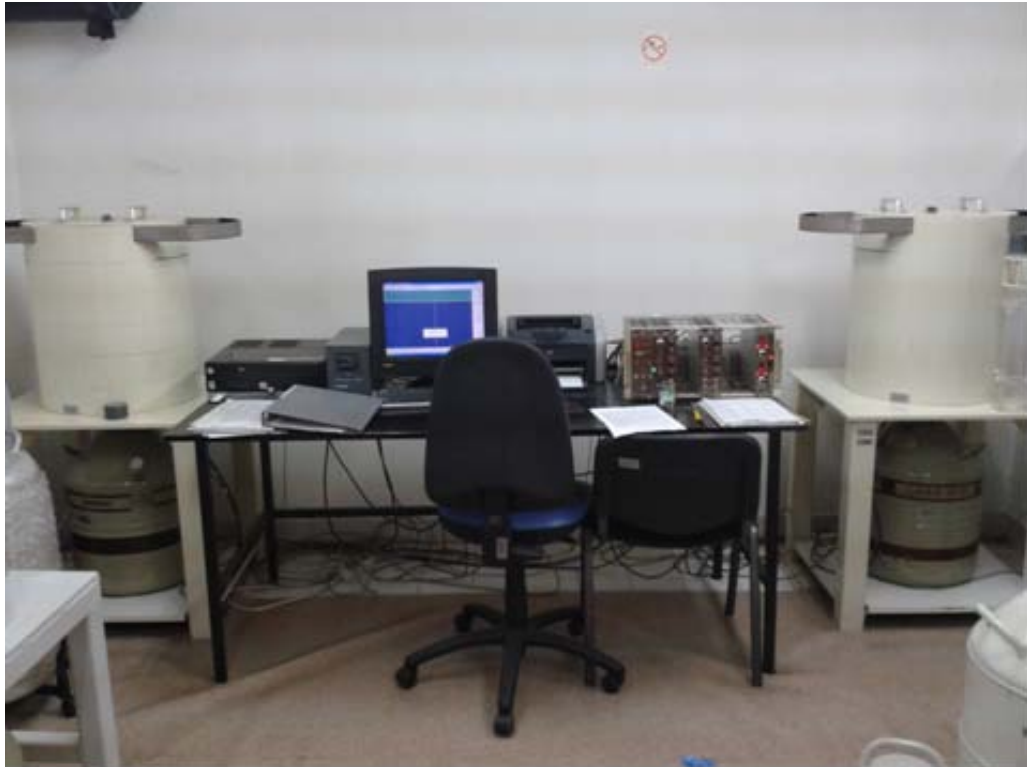
Za istraživanja u ovom radu, odnosno za mjerenja koncentracija aktivnosti ^{226}Ra u uzorcima zemljišta, korišćeni su HPGe spektrometri Centra za ekotoksikološka ispitivanja (Podgorica).

2.2.2. HPGe spektrometri u Centru za ekotoksikološka ispitivanja

U Centru za ekotoksikološka ispitivanja u Podgorici koriste se dva ORTEC spektrometra (slika 2.2.), energetskog opsega od 40 keV do 3000 keV, koji pokriva glavne gama linije većine radionuklida od interesa [24]. Oba pripadaju XLB (Extra Low Background) klasi i imaju po 16 000 kanala [24]. Radi se o niskofonskom koaksijalnom GEM – 30185-S i koaksijalnom GEM – 40190 detektoru, relativne efikasnosti 35 % i 40 %, respektivno.

HPGe detektor relativne efikasnosti 35 % ima FWHM 1.72 keV na 1.33 MeV (^{60}Co), FWHM od 700 eV na 122 keV (^{57}Co), i fon 0.98 imp/s, dok HPGe detektor relativne efikasnosti 40 % ima FWHM 1.80 keV na 1.33 MeV (^{60}Co), FWHM 840 eV na 122 keV (^{57}Co), a fon je 1.23 imp/s [24].

Za rad gama spektrometara potrebna je odgovarajuća kalibracija, odnosno snimanje spektara standarda koji sadrže izotope poznatih aktivnosti, na osnovu kojih se definiše „odgovor“ spektrometra, tj. odnos energija-kanal, efikasnost-energija. Kako je za analize gama zračenja jednodetektorskim poluprovodničkim sistemima neophodno kalibraciju raditi u odgovarajućoj „geometriji“, istoj kao i u slučaju uzorka koji se ispituje na aktivnosti radionuklida (^{226}Ra i drugih), u Centru za ekotoksikološka ispitivanja se koriste različiti kalibracioni multistandardi [24]: tačkasti, u Marineli posudama od 0.5 L i 1 L, u cilindričnim posudama 0.2 L.



Slika 2.2. ORTEC HPGe spektrometri GEM – 30185-S i GEM – 40190.

Za istraživanja u okviru ovog rada kalibracija uređaja je urađena pomoću standarda MBSS 2 (300415-1503041), proizvođača Czech Metrology Institute, u Marineli posudi od 0.5 L. Radi se o miks radionuklida čija je ukupna aktivnost, po specifikaciji, 01. 06. 2015. godine, bila 41.46 kBq. Za kalibraciju, snimanje uzoraka zemljišta u Marineli posudama od 0.5 L i analizu snimljenih spektara, korišćen je softver Gamma Vision 32 [25]. Za statističke analize rezultata, korišćen je Microsoft Office Excel 2007.

3. PODACI O KONCENTRACIJAMA RADONA U CRNOJ GORI

3.1. Radon u vazduhu *indoor*

Radon u Crnoj Gori je uglavnom razmatran preko njegovih koncentracija aktivnosti u stambenom prostoru (*indoor*). Na primjer, primjenjujući detektore tragova i višemjesečne (godišnje) ekspozicije, izmjerene su koncentracije radona u stanovima u Nikšiću, na Primorju Crne Gore, centralnom dijelu Crne Gore i u Podgorici [7, 26-28].

Za mjerenje *indoor* koncentracije radona u stanovima 2002-2003. godine, korišćeni su pasivni dozimetri, slični pasivnim dozimetrima proizvodnje Karlsruhe (Njemačka), snabdjeveni nuklearnim detektorima tragova (CR-39: 25 mm x 25 mm; INTERCAST – Italija), a koji su u ljetnjem i zimskom periodu (ukupno: godinu dana) bili postavljeni u stanovima, odnosno prostorijama u prizemlju ili na prvom spratu (dnevna ili spavaća soba) – na mjestima koja su udaljena od prozora i vrata, na 1.5 m visine iznad poda i 0.5 m od zida [7, 26-28].

Pregled literature pokazuje da su mjerenja *indoor* koncentracija radona u Nikšiću vršena u 62 stana u ljetnjem periodu, u 58 stanova u zimskom periodu, a u 55 stanova mjerenje je vršeno u toku cijele godine. Srednja vrijednost, standardna devijacija, geometrijska sredina, geometrijska standardna devijacija, minimalna vrijednost, maksimalna vrijednost kao i medijana *indoor* koncentracija radona za ljetnji period, bile su: 99.1 Bq/m³, 162.0 Bq/m³, 51.2 Bq/m³, 2.98, 6.5 Bq/m³, 1092 Bq/m³ i 44.0 Bq/m³, respektivno [7]. U zimskom periodu, ove vrijednosti su bile: 137.9 Bq/m³, 187.2 Bq/m³, 68.8 Bq/m³, 3.27, 5.2 Bq/m³, 839 Bq/m³ i 64.4 Bq/m³, respektivno, a za godišnja izlaganja: 122.7 Bq/m³, 166.7 Bq/m³, 66.2 Bq/m³, 3.00, 10.0 Bq/m³, 966 Bq/m³ i 61.7 Bq/m³, respektivno [7].

U istom periodu, na Primorju Crne Gore su izmjerene koncentracije aktivnosti radona u 126 stanova u ljetnjem periodu, 116 – u zimskom, i u 107 stanova tokom cijele godine [26]. Rezultati tih mjerenja (iz literature [26]) su sumirani u tabeli 3.1. Iste skraćenice će biti korišćene i kod tabela koje slijede.

Tabela 3.1. *Indoor* koncentracije radona u stanovima na Primorju Crne Gore [26].

Područje, <i>ekspozicija</i>	BM	SV [Bq/m ³]	SD [Bq/m ³]	GS [Bq/m ³]	GSD	MIN [Bq/m ³]	MAX [Bq/m ³]	MED [Bq/m ³]
H. Novi, <i>ljetnja</i>	32	19.5	11.9	15.1	2.5	≤ 1.5	60	17.2
<i>zimski</i>	37	39.8	60.7	24.6	2.4	5	344	22.3
<i>godišnja</i>	32	32.0	36.4	23.5	2.0	9	202	20.0
Kotor, <i>ljetnja</i>	14	26.8	22.6	16.6	3.1	3	65	18.0
<i>zimski</i>	7	47.8	46.2	31.7	2.6	11	128	25.3
<i>godišnja</i>	6	30.8	23.3	25.6	1.8	14	76	22.4
Tivat, <i>ljetnja</i>	8	15.5	9.2	13.1	1.9	4	33	13.0
<i>zimski</i>	6	29.2	20.0	21.7	2.6	4	61	27.8
<i>godišnja</i>	6	21.1	11.2	17.3	2.2	4	37	22.1
Budva, <i>ljetnja</i>	22	21.7	17.3	13.8	3.5	≤ 1.5	62	14.1
<i>zimski</i>	18	61.4	52.7	44.7	2.3	12	201	45.2
<i>godišnja</i>	17	43.3	27.9	35.9	1.9	12	106	34.8
Bar, <i>ljetnja</i>	30	27.5	32.4	17.4	2.8	≤ 1.5	175	19.7
<i>zimski</i>	29	46.6	22.4	42.0	1.6	17	104	37.1
<i>godišnja</i>	27	37.4	21.8	32.7	1.6	13	107	31.2
Ulcinj, <i>ljetnja</i>	20	22.1	27.3	11.3	3.6	≤ 1.5	99	10.7
<i>zimski</i>	19	31.4	25.0	21.3	2.7	4	92	25.4
<i>godišnja</i>	19	26.5	20.1	17.9	2.8	3	65	19.9
Primorje, <i>ljetnja</i>	126	22.2	20.1	14.6	2.9	≤ 1.5	175	15.4
<i>zimski</i>	116	42.7	37.8	31.0	2.4	4	344	30.5
<i>godišnja</i>	107	31.8	23.4	25.5	2.1	3	202	25.1

BM – broj mjerenja; SV – srednja vrijednost, tj. aritmetička sredina; SD – standardna devijacija; GS – geometrijska srednja vrijednost, tj. geometrijska sredina; GSD – geometrijska standardna devijacija; MIN – minimalna izmjerena vrijednost; MAX – maksimalna izmjerena vrijednost; MED – medijana

Predmet ovog rada su koncentracije radona u zemljištu Podgorice, pa je važno navesti podatke u vezi sa *indoor* koncentracijama radona, koje su 2002-2003. godine izmjerene u Podgorici, u 89 stanova u toku cijele godine, 94 stana u ljetnjem periodu i 90 stanova u zimskom periodu. Dobijeni su rezultati dati u tabeli 3.2, [27].

Iz tabele 3.2, vidi se da je maksimalna vrijednost *indoor* koncentracije radona u Podgorici dobijena u zimskom periodu (851 Bq/m³), dok su ljetnje koncentracije znatno manje.

Tabela 3.2. *Indoor* koncentracije radona u stanovima u Podgorici [27].

Izlaganje dozimetara	BM	SV [Bq/m ³]	SD [Bq/m ³]	GS [Bq/m ³]	GSD	MIN [Bq/m ³]	MAX [Bq/m ³]	MED [Bq/m ³]
<i>Ljetnje</i>	94	34.9	41.3	21.8	2.6	2.9	262	21.6
<i>Zimsko</i>	90	107	162	47.8	3.4	5.3	851	39.3
<i>Godišnje</i>	89	70	97	36.4	3.0	6.4	557	33.2

Centralni dio Crne Gore je analiziran na koncentracije radona u stambenom prostoru – po opštinama (Cetinje, Podgorica, Danilovgrad, Nikšić) i kao cijeli region, a rezultati tih analiza su dati u tabeli 3.3, [28]. Za taj region i opštine pojedinačno rađene su i posebne analize urbanog i ruralnog područja (tabela 3.4. i tabela 3.5, respektivno).

Tabela 3.3. *Indoor* koncentracije radona u stanovima u centralnom dijelu Crne Gore [28].

Područje, <i>ekspozicija</i>	BM	SV [Bq/m ³]	SD [Bq/m ³]	GS [Bq/m ³]	GSD	MIN [Bq/m ³]	MAX [Bq/m ³]	MED [Bq/m ³]
Cetinje, <i>ljetnja</i>	47	95.7	121	54.1	2.8	8	504	52.5
	<i>zimsko</i>	45	130	185	76.3	2.8	1178	92.6
	<i>godišnja</i>	42	117	141	73.4	2.6	803	81.8
Podgorica, <i>ljetnja</i>	145	47.1	64.5	26.9	2.8	2	551	25.0
	<i>zimsko</i>	137	113	176	51.8	≤ 1.5	1108	50.0
	<i>godišnja</i>	134	79.2	114	42.3	4	829	39.6
Danilovgrad, <i>ljetnja</i>	14	118	171	57.0	3.3	10	595	53.6
	<i>zimsko</i>	12	207	237	115	3.1	711	102
	<i>godišnja</i>	12	170	173	100	3.1	557	89.0
Nikšić, <i>ljetnja</i>	103	142	214	70.1	3.2	6	1423	66.2
	<i>zimsko</i>	98	217	397	87.0	3	2992	78.1
	<i>godišnja</i>	92	187	301	89.0	3.3	2208	74.4
Region, <i>ljetnja</i>	309	89.3	149	43.5	3.2	2	1423	36.8
	<i>zimsko</i>	292	154	277	66.7	≤ 1.5	2992	65.4
	<i>godišnja</i>	280	124	206	58.9	4	2208	55.4

Tabela 3.4. *Indoor* koncentracije radona u stanovima u urbanom području centralne Crne Gore [28].

Područje, ekspozicija	BM	SV [Bq/m ³]	SD [Bq/m ³]	GS [Bq/m ³]	GSD	MIN [Bq/m ³]	MAX [Bq/m ³]	MED [Bq/m ³]	
Cetinje,	<i>ljetnja</i>	18	54.7	82.0	34.1	2.4	8	369	32.4
	<i>zimski</i>	18	100	102	65.7	2.6	16	438	92.3
	<i>godišnja</i>	17	75.7	90.9	50.9	2.3	17	404	52.7
Podgorica,	<i>ljetnja</i>	100	43.3	67.9	24.0	2.8	3	551	22.9
	<i>zimski</i>	96	122	193	51.4	3.5	5	1108	43.9
	<i>godišnja</i>	95	82.2	126	39.7	3.2	6	829	34.3
Danilovgrad,	<i>ljetnja</i>	4	66.9	66.8	46.0	2.7	15	164	44.4
	<i>zimski</i>	4	147	194	79.9	3.4	23	437	64.9
	<i>godišnja</i>	4	107	130	64.2	3.1	19	300	54.6
Nikšić,	<i>ljetnja</i>	63	98.1	161	51.0	2.9	6	1092	42.8
	<i>zimski</i>	59	136	186	67.6	3.3	5	839	63.1
	<i>godišnja</i>	56	121	166	65.3	2.9	10	965	61.0
Region,	<i>ljetnja</i>	185	63.6	112	32.6	2.9	3	1092	32.0
	<i>zimski</i>	177	125	183	58.9	3.4	5	1108	55.6
	<i>godišnja</i>	172	94.8	138	48.4	3.1	6	965	42.8

Tabela 3.5. *Indoor* koncentracije radona u stanovima u ruralnom području centralne Crne Gore [28].

Područje, ekspozicija	BM	SV [Bq/m ³]	SD [Bq/m ³]	GS [Bq/m ³]	GSD	MIN [Bq/m ³]	MAX [Bq/m ³]	MED [Bq/m ³]	
Cetinje,	<i>ljetnja</i>	29	121	136	72.0	2.8	14	504	81.0
	<i>zimski</i>	27	150	224	84.3	2.9	9	1178	92.6
	<i>godišnja</i>	25	145	162	94.0	2.6	19	803	99.5
Podgorica,	<i>ljetnja</i>	45	55.8	55.8	34.8	2.8	2	260	32.2
	<i>zimski</i>	41	90.5	125	52.4	3.0	≤ 1.5	767	56.0
	<i>godišnja</i>	39	71.8	79.2	49.2	2.4	4	478	48.1
Danilovgrad,	<i>ljetnja</i>	10	138	198	62.0	3.7	10	595	53.6
	<i>zimski</i>	8	237	263	138	3.1	25	711	133
	<i>godišnja</i>	8	201	191	126	3.0	19	557	96.9
Nikšić,	<i>ljetnja</i>	40	210	265	116	3.1	9	1423	110
	<i>zimski</i>	39	338	569	127	4.5	3	2992	127
	<i>godišnja</i>	36	290	417	144	3.4	18	2208	141
Region,	<i>ljetnja</i>	124	128	186	63.6	3.3	2	1423	61.4
	<i>zimski</i>	115	199	375	84.7	3.6	≤ 1.5	2992	83.4
	<i>godišnja</i>	108	171	276	87.6	3.1	4	2208	86.2

Istraživanja *indoor* koncentracija radona u stambenom prostoru u Crnoj Gori su nastavljena, i prema najavama u medijima, Crna Gora bi trebalo da uskoro dobije „radonsku mapu“. Odnosno, radonska mapa Crne Gore će biti mapa zasnovana na koncentracijama radona *indoor*, ali treba napomenuti da su u mnogim zemljama Evrope radonske mape napravljene na osnovu koncentracija radona u gasu u zemljištu, iz razloga što je osnovni izvor radona *indoor* – najčešće zemljište (tj. tlo) ispod zgrade.

U tabeli 3.6. su predstavljene koncentracije radona u stanovima u evropskim državama, iz izvještaja UNSCEAR 2000 [8].

Na svjetskom nivou, kao što je već rečeno, na osnovu istog izvještaja UNSCEAR [8], medijana srednjih vrijednosti (aritmetičkih sredina) iznosi 46 Bq/m^3 , geometrijskih sredina 37 Bq/m^3 , najvećih izmjerenih koncentracija 480 Bq/m^3 , a geometrijskih standardnih devijacija 2.2. Treba napomenuti i da su rezultati mjerenja *indoor* koncentracija radona distribuirani u skladu sa log-normalnom raspodjelom [8].

Rezultati mjerenja radona u stanovima u Podgorici (tabela 3.2.) pokazali su srednju vrijednost godišnje koncentracije radona *indoor* 70 Bq/m^3 , što je identično sa situacijom u Švajcarskoj, a slično sa podacima koji se odnose na Norvešku, Grčku i Italiju. Geometrijska sredina od 36.4 Bq/m^3 uporediva je sa podacima za Irsku, kao i sa medijanom geometrijskih sredina na svjetskom nivou.

Kao što je rečeno u **Uvodu**, države sopstvenim propisima definišu dozvoljene nivoe izlaganja radonu. U Crnoj Gori je ova oblast još uvijek uređena starim pravilnikom, tj. Pravilnikom o granicama izlaganja jonizujućim zračenjima Savezne Republike Jugoslavije iz 1998. godine („Sl. list SRJ“, br. 32/98) [29]. U tom Pravilniku je propisano [29]:

„Interventni nivoi za hronično izlaganje radonu u stanovima jednaki su godišnjoj prosječnoj koncentraciji od 200 Bq/m^3 radona, u vazduhu u novoizgrađenim stanovima, a 400 Bq/m^3 radona, u vazduhu za postojeće stambene objekte.

Interventni nivo za hronična izlaganja radonu na radnom mestu jednak je srednjoj godišnjoj koncentraciji 1000 Bq/m^3 radona u vazduhu.“

S druge strane, nove Direktivne Evropske unije ograničavaju koncentraciju radona na 300 Bq/m^3 – i na radnom mjestu i u stanovima [30].

Tabela 3.6. Koncentracije radona u stanovima u evropskim državama [8].

Region	Država	Koncentracija radona [Bq/m ³]			Geometrijska standardna devijacija
		Srednja vrijednost	Geometrijska srednja vrijednost	Maksimalna vrijednost	
Sjeverna Evropa	Danska	53	29	600	2.2
	Estonija	120	92	1390	
	Finska	120	84	20 000	2.1
	Litvanija	55	22	1860	
	Norveška	73	40	50 000	
	Švedska	108	56	85 000	
Zapadna Evropa	Austrija		15	190	2.0
	Belgija	48	38	12 000	
	Francuska	62	41	4690	
	Njemačka	50	40	>10 000	
	Irska		37	1700	
	Luksemburg	110	70	2500	
	Holandija	23	18	380	
	Švajcarska	70	50	10 000	
	Velika Britanija	20		10 000	
Istočna Evropa	Bugarska		22	250	2.7
	Češka	140		20 000	
	Mađarska	107	82	1990	
	Poljska	41	32	432	
	Rumunija	45		1025	
	Slovačka	87		3750	
Južna Evropa	Albanija	120	105	270	2.0
	Hrvatska	35	32	92	
	Kipar	7	7	78	
	Grčka	73	52	490	
	Italija	75	57	1040	
	Portugalija	62	45	2700	
	Slovenija	87	60	1330	
	Španija	86	42	15 400	
Medijana na svjetskom nivou		46	37	480	2.2

3.2. Mjerenje radona u zemljištu u Crnoj Gori

Mjerenja *indoor* koncentracija radona, kao što je prethodno rečeno, u Crnoj Gori su vršena sistematski i na velikom broju lokacija. S druge strane, podataka o koncentracijama radona u zemljištu je veoma malo. Jedini objavljeni podaci se odnose na Podgoricu i oni su dati u literaturi [31] i [32]. Literatura govori o mjerenjima na četiri lokacije (oblasti) – Tološi, Beri, Momišići i Zabjelo [31, 32].

Kako se navodi u [31], mjerenja su izvršena u decembru 1994. godine, a istraživanje je sprovedeno da bi se saznao: „nivo koncentracija radona u zemljištu gradskog područja; da li su u blizini diskontinuiteta u reljefu gradskog područja (ravnicabrdo) povećane koncentracije radona u zemljištu. Ovo radi toga što su prospekcijska „indoor“ mjerenja zapreminske aktivnosti Rn-222 u zgradama u Podgorici, rađena ekspresnim metodom, pokazala povećane koncentracije na pojedinim mjestima u takvim zonama...; da li regionalni geološki rasjedi na području Podgorice, u aseizmičkim uslovima, uslovljavaju osjetno drugačiju koncentraciju u površinskom sloju zemljišta direktno iznad njih u odnosu na neki od susjednih lokaliteta.“

Koncentracija radona u zemljištu mjerena je pomoću pasivnog radiometra RRC „Instituta Kurčatov“, koji je specijalno dizajniran da spriječi da toron, prašina i vlaga uđu u detektorsku komoru [32]. Radiometar je imao aluminijsku cilindričnu komoru, zapremine 17 cm³ i unutrašnjeg prečnika 3.2 cm.

Komora je imala 12 otvora čiji su prečnici po 6 mm, prekriveni slojem polietilena (debljine 35 μm), kroz koje ulazi radon. Radon prodire u radiometar difuzijom kroz polietilenski sloj. Sam detektor alfa čestica je bio nitrocelulozni, na postolju u centralnom dijelu komore, prekrivenom celofanskom folijom sa 13 μm naparenog aluminijuma [31].

U radovima se navodi da je ovaj radiometar veoma pogodan za mjerenje aktivnosti radona u vlažnom zemljištu. Njegova osjetljivost je (0.7 ± 0.2) (trag/cm²)/(kBq·h/m³), a greška mjerenja radona je oko 30 %. Sa povećanjem dubine, koncentracija radona u zemljištu se povećava i otuda zavisnost koncentracije radona od dubine. Zbog toga su radiometri postavljani na dubinu (70-80) cm [31, 32].

Aritmetička sredina koncentracija radona u zemljištu (30 detektora), u Tološima (Tološkom polju) je bila 39 kBq/m³, sa standardnom devijacijom 14 kBq/m³ i medijanom 37.2 kBq/m³ [31, 32].

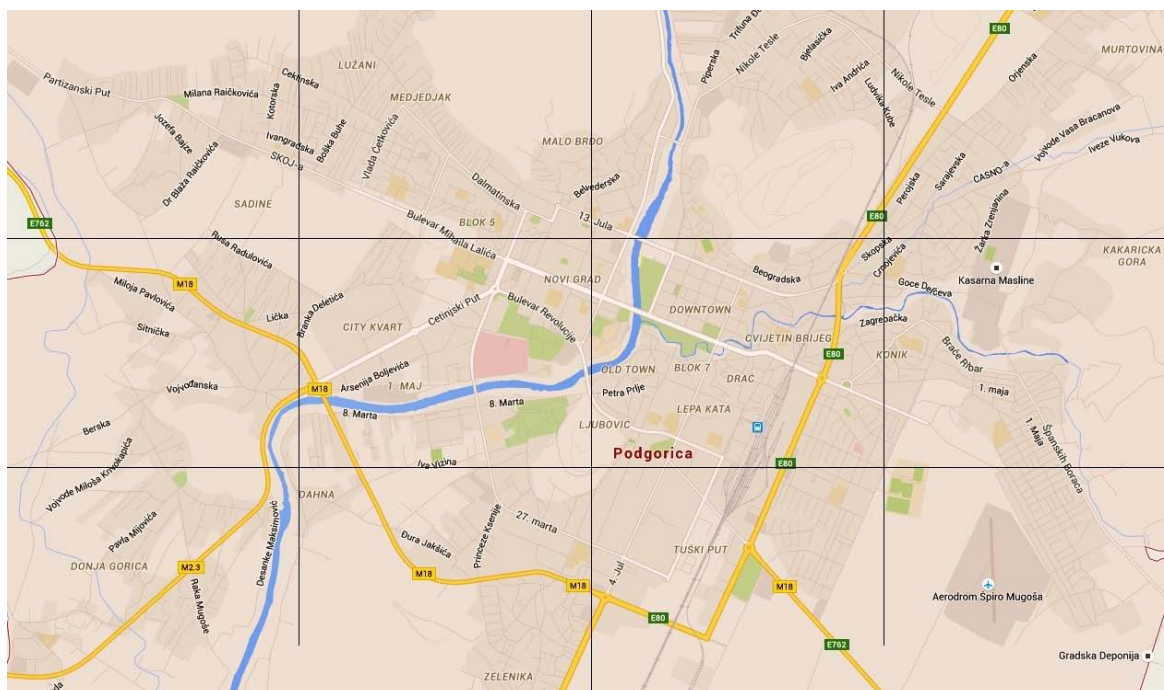
U Berima (14 detektora), srednja vrijednost koncentracije radona, standardna devijacija i medijana, bile su 34 kBq/m^3 , 12 kBq/m^3 i 32.0 kBq/m^3 , respektivno [31, 32].

Srednja vrijednost koncentracije radona, standardna devijacija i medijana, u Momišićima (kod Malog brda, 10 detektora) su bile 49 kBq/m^3 , 25 kBq/m^3 i 46.1 kBq/m^3 , respektivno, dok su na Zabjelu (kod Dajbabske gore, 13 detektora) ove vrijednosti bile 29 kBq/m^3 , 17 kBq/m^3 i 24.5 kBq/m^3 , respektivno [31, 32]. Ovi detektori bili su na dubini (50-70) cm.

Srednja vrijednost koncentracije radona u zemljištu, dobijena iz svih mjerenja u Podgorici (67), iznosila je 37 kBq/m^3 , sa standardnom devijacijom 16 kBq/m^3 i medijanom 34.2 kBq/m^3 [31, 32].

4. LOKACIJE I ODREĐIVANJE KONCENTRACIJA RADONA U ZEMLJIŠTU

Na karti Podgorice (slika 4.1.) kvadratima su označene oblasti unutar kojih je, na javnoj površini, birana jedna tačka na kojoj je izvršeno mjerenje koncentracija radona u zemljištu. Na istim lokacijama, u okviru drugog istraživanja, izvršena su i mjerenja doza terestrijalnog gama zračenja.



Slika 4.1. Karta Podgorice [33].

Teritorija opštine Podgorica je površine 1441 km². Ova opština po broju stanovnika je najveća u Crnoj Gori, i po statistici iz 2012. godine [34], broj stanovnika je 185 937. Nadmorska visini na kojoj se nalazi je oko 45 m.

Poznato je da sadržaj prirodnih radionuklida (u ovom slučaju ²²⁶Ra i ²²²Rn), i njihove koncentracije aktivnosti, zavise od geološke podloge i tipa i karakteristika zemljišta.

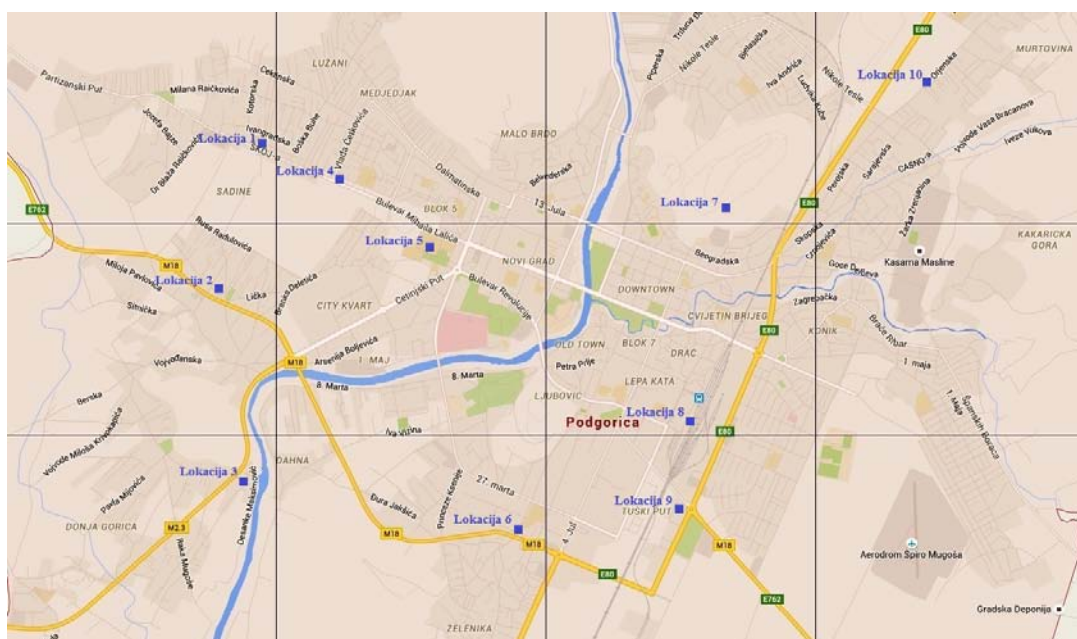
Prema literaturi [28], područje grada Podgorice je geološki uglavnom izgrađeno od fluvio-glacijalnih sedimenata kvartara, čija debljina iznosi i do 30 m, kao i karbonatnih sedimenata gornje jure. Smeđe zemljište na fluvio-glacijalnim depozitima dominira u ravničarskoj oblasti teritorije Podgorice, dok je na brdima prisutna kamenita i humusna *tera rosa*, kao i eroziona *tera rosa*.

Generalno se, na osnovu podataka iz literature, može reći da region Podgorice i njegovo okruženje čine karbonatne stijene gornje jure, sa nižim djelovima kvartarnih sedimenata – konglomerata i šljunaka, debljine 20 do 40 m [32]. Krečnjaci i dolomiti gornje jure imaju brojne pukotine, a samo zemljište (debljine do 2 m) je pjeskovita glina. Podaci pokazuju da je sadržaj urana u ovim stijenama (gornjokredni krečnjaci Crne Gore) 1.2 $\mu\text{g/g}$, a u zemljištu – do 5 $\mu\text{g/g}$ [31]. Sadržaj torijuma u istim stijenama je 0.06 $\mu\text{g/g}$, a u zemljištu je njegov srednji sadržaj 11 $\mu\text{g/g}$ [31]. Prema izvještaju UNSCEAR [8], kora Zemlje generalno sadrži između 0.05 i 5 ppm urana (uz maseni odnos $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ oko 0.0073, i odnos aktivnosti – 0.046 [35]), a torijuma – između 2 i 20 ppm.

4.1. Mjerne lokacije

Na slici 4.1. je karta Podgorice koja je izdijeljena na 12 kvadrata, unutar kojih je bilo potrebno naći (na javnoj površini) mjernu lokaciju. Uslov za mjerenje radona u zemljištu je dubina, jer je potrebno da se gas iscrpi iz zemljišta. Na dvije lokacije, zbog strukture samog zemljišta, nije bilo moguće sondu (u obliku šipke), na koju se nadovezuje pumpa, zabosti u zemljište, a da ne dođe do oštećenja. Kako se ne bi rizikovalo oštećenje sonde, mjerenje je urađeno na 10 lokacija (slika 4.2.).

Koordinate mjernih tačaka su određene pomoću GPS uređaja i predstavljene su u tabeli 4.1.



Slika 4.2. Karta Podgorice sa označenim lokacijama mjerenja.

Tabela 4.1. Koordinate mjernih tačaka u Podgorici.

Mjerna tačka	Naziv lokacije	Koordinate	
		Latituda	Longituda
1	Vrtić Luna	N 42° 27' 04.8''	E 19° 13' 44.7''
2	Kruševac	N 42° 26' 24.6''	E 19° 13' 48.4''
3	Ambulanta Lješkopolje	N 42° 25' 34.4''	E 19° 13' 40.6''
4	OŠ Radojica Perović	N 42° 26' 53.9''	E 19° 14' 15.8''
5	Prirodno-matematički fakultet	N 42° 26' 35.5''	E 19° 14' 43.3''
6	OŠ Oktoih	N 42° 25' 20.4''	E 19° 15' 09.9''
7	Park Gorica	N 42° 26' 37.7''	E 19° 16' 20.5''
8	Željeznička stanica	N 42° 25' 48.1''	E 19° 16' 23.0''
9	CETI	N 42° 25' 37.7''	E 19° 16' 20.6''
10	OŠ Dragiša Ivanović	N 42° 27' 37.7''	E 19° 17' 57.2''

Površina koja je obuhvaćena istraživanjem iznosi približno 15 km².

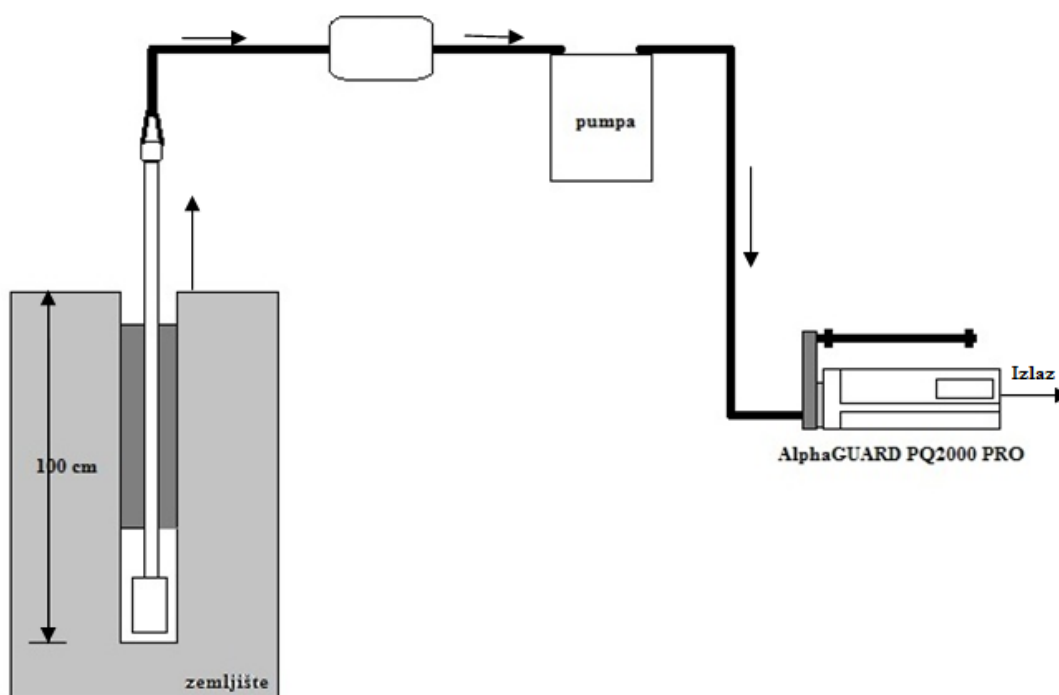
Na svim lokacijama izvršeno je i uzorkovanje zemljišta za određivanje koncentracija aktivnosti ²²⁶Ra. Na svim lokacijama su uzeti površinski slojevi zemljišta (do 0.05 m), a na lokacijama 7, 9 i 10, i uzorci zemljišta iz slojeva na dubini između 0.05 i 0.10 m i između 0.10 i 0.15 m.

4.2. Postupci mjerenja

4.2.1. Mjerenje koncentracija radona u zemljištu

Kao što je već rečeno, mjerenje radona u zemljištu (koncentracija aktivnosti u gasu u zemljištu) je vršeno pomoću uređaja RAD7. Mjerenja su izvršena u periodu jun-jul 2016. godine.

Treba napomenuti da se za ekspresna mjerenja koncentracija radona u gasu u zemljištu, uz RAD7, još češće koristi uređaj AlphaGuard, a šema mjerenja (iz, na primjer, [36, 37]), koja podrazumijeva crpljenje gasa sa dubine od najmanje 0.5 m, pa do 0.8 m, predstavljena je na slici 4.3.



Slika 4.3. Mjerenje radona u zemljištu pomoću uređaja AlphaGuard [36, 37].

Kao i kod uređaja RAD7, i ovdje imamo sondu kojom se buši zemlja i koja na vrhu ima otvor kroz koji ulazi gas, odnosno smjesa gasova koja se nalazi u zemljištu. Sonda se zabada na dubinu (na primjer) 0.8 m, nakon čega je treba izvući 2 ili 3 cm. Gornji otvor te sonde je pomoću cijevi povezan sa pumpom koja crpi gas iz zemljišta. Na ovaj način je radon isisan iz okolnog tla i usisan u jonizacionu komoru. Da bi se iz uzorkovanog gasa odredila koncentracija radona, pošto on sadrži i toron, uobičajeno se jonizaciona komora zatvori oko 10 minuta (dok se toron ne raspadne) i onda se na monitoru očita koncentracija ^{222}Rn [36]. Na primjer, pri mjerenju koncentracija radona u zemljištu u Sloveniji [37], uređajem AlphaGuard, radon je registrovan u jednom minutnim intervalima tokom 20 minuta.

Istraživanje u okviru ovog rada, podrazumijevalo je takođe crpljenje gasa sa dubine od najmanje pola metra (0.5-0.6 m). Nije korišćena dodatna pumpa. Na pojedinim lokacijama su urađena i test mjerenja na različitim dubinama, ali se često nije mogla iskoristiti dubina veća od 0.5 m. Na slici 4.4, prikazan je RAD7 pri mjerenju na mjernom mjestu 5 (kod zgrade Tehničkih fakulteta Univerziteta Crne Gore, u blizini laboratorije za fiziku 044).



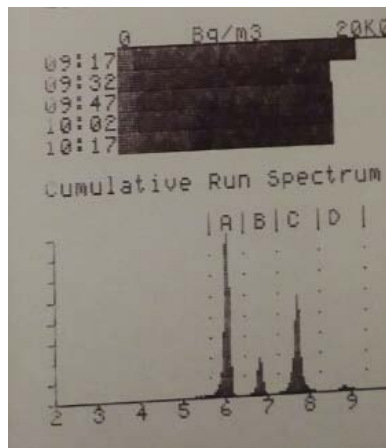
Slika 4.4. RAD7 na lokaciji 5.

Na lokacijama 2, 4, 5, 8 i 9, mjerenja su izvršena pomoću dva radonska detektora RAD7, serijskih brojeva 2197 i 0595 (slika 4.5.), dok je na ostalim lokacijama mjerenje izvršeno samo pomoću jednog detektora (serijskog broja 2197). Ovo je urađeno da bi se uporedila pokazivanja dva uređaja i dobili podaci za buduća istraživanja.

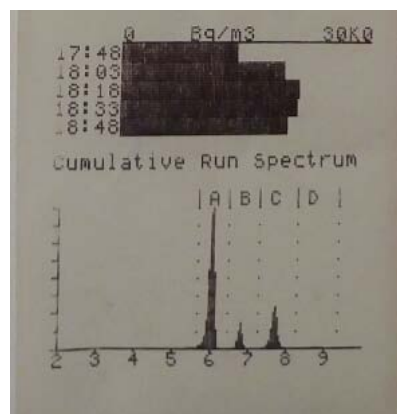


Slika 4.5. Dva uređaja RAD7 na mjernejoj lokaciji.

Mjerenje na svakoj lokaciji je vršeno u 5 ciklusa po 15 minuta. Nakon svakih 15 minuta, printer štampa izvještaj o koncentracijama radona sa standardnom devijacijom za svaki ciklus, i na kraju mjerenja – srednju vrijednost svih izmjerenih koncentracija, kao i njihov spektar. Primjeri djelova izvještaja (spektara) su dati na slikama 4.6. i 4.7.



Slika 4.6. Dio iz izvještaja o mjerenju na lokaciji 1.



Slika 4.7. Dio iz izvještaja o mjerenju na lokaciji 2.

4.2.2. Mjerenje koncentracija aktivnosti ^{226}Ra u uzorcima zemljišta

Za uzorkovanje zemljišta, pripremu i mjerenje koncentracija aktivnosti ^{226}Ra , korišćene su standardne procedure [22, 23]. Na mjernim lokacijama izvršeno je uzorkovanje zemljišta tako što je sa površine (0.25 m x 0.25 m) uklonjen površinski sloj (trava, kamenje,...), a zatim uzet uzorak sa dubine do 0.05 m, a na tri lokacije (7, 9 i 10) i uzorci sa još dvije dubine (0.05-0.1) m i (0.1-0.15) m. Uzorci se standardno potom suše prirodno, ili u sušnici, 8 sati na 100 °C. Kada se završi proces sušenja, uzorci se prosiju kroz sito od 2 mm,

izmjeri se masa prosijanog uzorka. Nakon toga se uzorak pakuje u posude (na primjer, standardne Marineli posude od 1 L ili 0.5 L, u slučaju HPGe spektrometara koji su korišćeni u ovom radu), hermetizuje (silikonskim ljepilom), a mjerenje uzorka i određivanje aktivnosti ^{226}Ra se vrši nakon što se uspostavi radioaktivna ravnoteža sa potomcima, koji se raspadaju uz emisiju gama zračenja. Slika 4.8. predstavlja uzorkovanje zemljišta na lokaciji 2, dok su na slici 4.9. dati uzorci u toku sušenja, a na slici 4.10. uzorak nakon sušenja i prosijavanja. Svi uzorci su sušeni prirodno i mjereni po 30 000 s živog vremena.



Slika 4.8. Uzorkovanje zemljišta na lokaciji 2.



Slika 4.9. Uzorci u toku sušenja.



Slici 4.10. Uzorak zemljišta nakon sušenja i prosijavanja kroz sito otvora 2 mm.

Sekularna radioaktivna ravnoteža između radijuma i potomaka uspostavlja se pri uslovu $\lambda_{Ra}N_{Ra} = \lambda_{Rn}N_{Rn}$, gdje je λ konstanta raspada, a N – broj jezgara, tj. pri uslovu jednakosti aktivnosti, $A_{Ra} = A_{Rn}$ [1]. Već je rečeno da je to standardna procedura za gama spektrometrijske analize [22], kao i da za više od 40 dana (10 perioda poluraspada ^{222}Rn), biva uspostavljena radioaktivna ravnoteža (pod uslovom da radon, pošto je gas, ne izlazi iz uzorka).

Pri ovim uslovima, aktivnost ^{214}Pb i ^{214}Bi , na primjer, [5], određena iz spektara gama zračenja koje prati njihove raspade, predstavlja i aktivnost ^{226}Ra . Među gama zracima koji prate beta minus raspad ^{214}Bi u ^{214}Po , najveći intenzitet ima zrak energije 609 keV (46.1 %) [2], i pikovi tog zraka u snimljenim spektrima zemljišta analizirani su softverom Gamma Vision 32. Za uzorke koji nijesu hermetizovani, ili koji su mjereni odmah, bez uspostavljanja ravnoteže između ^{226}Ra i njegovih potomaka, analiza pika na energiji 609 keV daje samo aktivnost ^{214}Bi [5].

Aktivnost je, uobičajeno, dobijena pomoću formule:

$$A = \frac{N}{\varepsilon \cdot I \cdot t}, \quad (4.1)$$

gdje je N – broj impulsa u fotopiku (neto, nakon oduzimanja fona), ε – efikasnost registracije gama zraka u fotopiku, I – relativni intenzitet gama zraka, t – živo vrijeme mjerenja.

Koncentracija aktivnosti ^{226}Ra (C_{Ra}), koja se dalje koristi za procjene po formulama (2.1) i (2.1), dobijena je kao odnos izmjerene aktivnosti i mase suvog uzorka zemljišta.

Među gama zracima koji prate beta minus raspad ^{214}Pb u ^{214}Bi , najveći intenzitet ima zrak energije 352 keV (37.6 %) [2], pa su pikovi tog zraka u snimljenim spektrima zemljišta takođe analizirani softverom Gamma Vision 32, na isti način. Na isti način su analizirani i pikovi ostalih gama zraka većih intenziteta iz ova dva raspada.

Odnosno, uzorci zemljišta sa mjernih lokacija u Podgorici, pripremljeni su i spakovani u Marineli posude 0.5 L, i mjereni nakon uspostavljanja ravnoteže između ^{226}Ra i njegovih potomaka, pa je njegova aktivnost u svakom od uzoraka određena kao srednja aktivnost koja se dobija iz pikova na energijama koje su date u tabeli 4.2.

Tabela 4.2. Gama zraci čiji su pikovi korišćeni za analizu aktivnosti ^{226}Ra u spektrima uzoraka zemljišta.

Energija [keV]	Intenzitet [%]
Raspad ^{214}Pb	
352	37.6
295	19.3
Raspad ^{214}Bi	
609	46.1
1764	15.4
1120	15.1

5. REZULTATI MJERENJA I DISKUSIJA REZULTATA

5.1. Radijum-226 u zemljištu Podgorice

Izmjerene aktivnosti i koncentracije aktivnosti ^{226}Ra u uzorcima zemljišta prikazane su u tabelama 5.1. i 5.2.

Softver Gamma vision 32, korišćen za analizu spektara uzoraka zemljišta, aktivnosti pokazuje sa dvije decimale, ali su vrijednosti ovdje zaokružene, kao što su zaokružene i srednje vrijednosti aktivnosti, iako su izračunate na osnovu podataka (aktivnosti) koje je dao softver.

Tabela 5.1. Izmjerene aktivnosti ^{226}Ra u uzorcima zemljišta.

Lokacija	Dubina sloja [m]	Aktivnost [Bq]	Srednja vrijednost aktivnosti [Bq]
1	0-0.05	19.3 ± 0.5	19.3 ± 0.5
2	0-0.05	12.5 ± 0.4	12.5 ± 0.4
3	0-0.05	18.5 ± 0.4	18.5 ± 0.4
4	0-0.05	20.1 ± 0.5	20.1 ± 0.5
5	0-0.05	23.0 ± 0.5	23.0 ± 0.5
6	0-0.05	18.6 ± 0.4	18.6 ± 0.4
7	0-0.05	26.6 ± 0.5	29.7 ± 0.6
	0.05-0.10	29.3 ± 0.6	
	0.10-0.15	33.3 ± 0.6	
8	0-0.05	32.0 ± 0.6	32.0 ± 0.6
9	0-0.05	36.0 ± 0.5	44.6 ± 0.6
	0.05-0.10	42.2 ± 0.6	
	0.10-0.15	55.6 ± 0.7	
10	0-0.05	25.9 ± 0.5	24.6 ± 0.5
	0.05-0.10	23.0 ± 0.5	
	0.10-0.15	25.0 ± 0.5	

Tabela 5.2. Koncentracije aktivnosti ^{226}Ra u uzorcima zemljišta.

Lokacija	Dubina sloja [m]	Masa [kg]	Koncentracija aktivnosti ^{226}Ra (C_{Ra}) [Bq/kg]	Srednja vrijednost koncentracije aktivnosti [Bq/kg]
1	0-0.05	0.500	38.7 ± 1.0	38.7 ± 1.0
2	0-0.05	0.502	24.9 ± 0.8	24.9 ± 0.8
3	0-0.05	0.545	33.9 ± 0.7	33.9 ± 0.7
4	0-0.05	0.511	39.4 ± 1.0	39.4 ± 1.0
5	0-0.05	0.583	39.5 ± 0.9	39.5 ± 0.9
6	0-0.05	0.647	28.8 ± 0.6	28.8 ± 0.6
7	0-0.05	0.636	41.9 ± 0.8	41.7 ± 0.8
	0.05-0.10	0.724	40.4 ± 0.8	
	0.10-0.15	0.778	42.8 ± 0.8	
8	0-0.05	0.530	60.4 ± 1.1	60.4 ± 1.1
9	0-0.05	0.531	67.8 ± 0.9	76.9 ± 0.9
	0.05-0.10	0.673	62.8 ± 0.9	
	0.10-0.15	0.554	100 ± 1	
10	0-0.05	0.856	30.2 ± 0.6	35.9 ± 0.7
	0.05-0.10	0.626	36.7 ± 0.8	
	0.10-0.15	0.616	40.6 ± 0.8	

Na osnovu podataka iz tabele 5.1, minimum, maksimum, srednja vrijednost, standardna devijacija i medijana aktivnosti ^{226}Ra u površinskom sloju zemljišta (do 0.05 m), iznose 12.5, 36, 23.2, 7.01 i 21.5 Bq, respektivno. Na osnovu podataka iz tabele 5.2, minimum, maksimum, srednja vrijednost, standardna devijacija i medijana koncentracija aktivnosti ^{226}Ra u sloju zemljišta do 0.05 m, iznose 24.9, 67.8, 40.5, 13.6 i 39.0 Bq/kg, respektivno.

Iz tabele 5.1, radeći sa srednjim vrijednostima aktivnosti na lokacijama na kojima je uzorkovano zemljište, srednja vrijednost aktivnosti ^{226}Ra iznosi 24.3 Bq, sa standardnom devijacijom 9.13 Bq. Minimalna vrijednost aktivnosti je 12.5 Bq, dok maksimalna vrijednost iznosi 44.6 Bq. Medijana je 21.5 Bq.

Iz tabele 5.2, opet radeći sa svim srednjim vrijednostima koncentracija aktivnosti na lokacijama na kojima je uzorkovano zemljište, srednja vrijednost koncentracije aktivnosti ^{226}Ra iznosi 42.0 Bq/kg, sa standardnom devijacijom 15.5 Bq/kg. Minimalna i maksimalna vrijednost koncentracije aktivnosti iznose 24.9 Bq/kg i 76.9 Bq/kg, respektivno, dok je medijana 39.0 Bq/kg. Usrednjavanje zbog tri lokacije na kojima je uzorkovano zemljište iz tri sloja, nije značajno promijenilo podatke. Srednja vrijednost je veća za 1.5 Bq/kg, a medijana je ostala ista.

Ako se ovi podaci uporede sa podacima za teritoriju opštine Nikšić, gdje srednja vrijednost koncentracije aktivnosti ^{226}Ra iznosi 60.2 Bq/kg, standardna devijacija 39.5 Bq/kg, medijana 48.6 Bq/kg, a minimalna i maksimalna vrijednost iznose 26.3 i 136.8 Bq/kg, respektivno [38], vidi se da su koncentracije aktivnosti ^{226}Ra u zemljištu Podgorice niže. Srednja vrijednost koncentracije aktivnosti ^{226}Ra na teritoriji Nikšića je 1.4 puta veća nego na teritoriji Podgorice (uzevši 42.0 Bq/kg), standardna devijacija je takođe veća, i to 2.5 puta, maksimalna vrijednost 1.8 puta, minimalna vrijednost 1.1 put, dok su medijane slične (razlikuju se za 0.5 Bq/kg). Veće koncentracije aktivnosti ^{226}Ra na teritoriji Nikšića mogle bi se objasniti onim što je prethodno rečeno, tj. da tamo postoje depoziti crvenih boksita, sa sadržajem urana (4-14) $\mu\text{g/g}$, dok je u slučaju teritorije Podgorice, za koju su karakteristični gornjokredni krečnjaci, sadržaj urana 1.2 $\mu\text{g/g}$ [31].

Na teritoriji opštine Mojkovac je takođe izvršeno određivanje koncentracije aktivnosti ^{226}Ra u zemljištu, i dobijene su sljedeće vrijednosti za srednju vrijednost, standardnu devijaciju, medijanu, minimalnu i maksimalnu vrijednost: 28.6, 4.3, 28.6, 20.5 i 38.3 Bq/kg, respektivno [39]. Ako se uradi poređenje sa podacima dobijenim u ovom radu, uviđa se da su vrijednosti za srednju koncentraciju aktivnosti ^{226}Ra veće, i to 1.5 puta. Takođe, veće su i vrijednosti za standardnu devijaciju, medijanu, kao i za minimalnu i maksimalnu vrijednost, i to 3.5, 1.4, 1.2 i 2 puta, respektivno.

Na osnovu vrijednosti koncentracije aktivnosti ^{226}Ra u površinskom sloju zemljišta, na teritoriji Crne Gore, dobijeno je da srednja vrijednost koncentracije aktivnosti ^{226}Ra iznosi 39.9 Bq/kg [40], što je manje 1.1 put od srednje vrijednosti dobijene u ovom radu. Takođe, manje vrijednosti dobijene tada (vezano za teritoriju Crne Gore), u odnosu na vrijednosti u ovom radu (vezano za gradsko područje Podgorice), su dobijene i za minimalnu vrijednost (11 Bq/kg) i medijanu (27 Bq/kg), i to 2.3 i 1.4 puta, respektivno. Maksimalna vrijednost koncentracije aktivnosti ^{226}Ra u zemljištu Crne Gore od 216 Bq/kg [40] je 2.8 puta veća od maksimalne koja je izmjerena u okviru ovog istraživanja.

Na pojedinim područjima u Crnoj Gori, kao što su Durmitorska tektonska jedinica, Visoki krš, Jadransko-jonska zona, Bukovik i Bukovica [41, 42], srednje koncentracije aktivnosti ^{226}Ra u zemljištu su 34.9, 111, 182, 41.9 i 25.3 Bq/kg, respektivno. Iz ovoga slijedi da je srednja koncentracija ^{226}Ra u zemljištu Podgorice, za 10 lokacija na gradskom području, praktično ista kao ona u Bukoviku.

Na globalnom nivou, medijana srednjih vrijednosti koncentracija aktivnosti ^{226}Ra u zemljištu iznosi 35 Bq/kg [8], što je ispod vrijednosti za Podgoricu koje su dobijene u ovom radu. U zemljama južne Evrope, Hrvatskoj, Kipru, Grčkoj, Portugaliji, Sloveniji i Španiji, srednje vrijednosti koncentracija aktivnosti ^{226}Ra , prema izvještaju UNSCEAR 2000 [8], su 54, 17, 25, 44, 41 i 32 Bq/kg, respektivno.

5.2. Radon-222 u zemljištu Podgorice

5.2.1. Izmjerene koncentracije ^{222}Rn u zemljištu

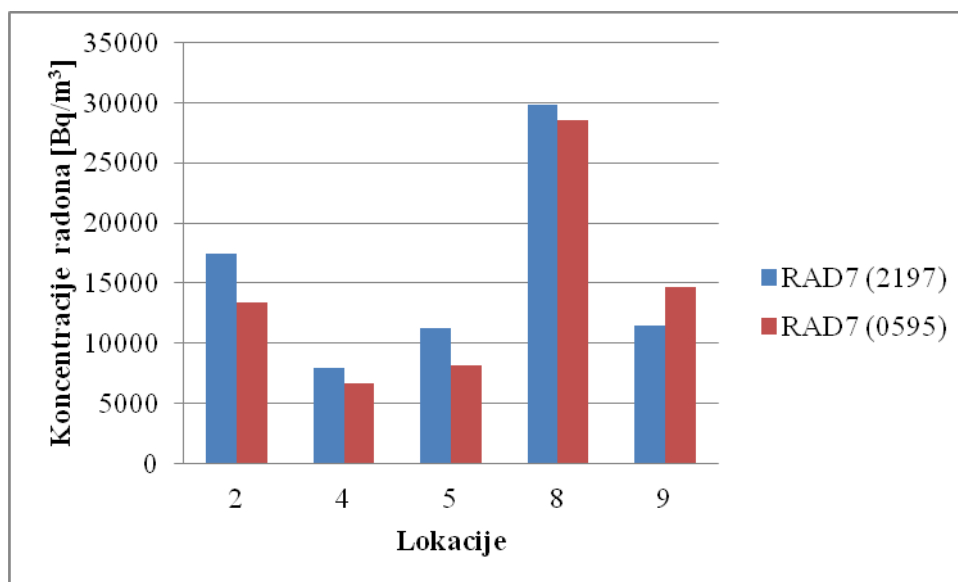
U tabeli 5.3. su prikazane srednje vrijednosti koncentracija aktivnosti radona u gasu u zemljištu, sa standardnim devijacijama i opsezima, izmjerene pomoću dva uređaja RAD7.

Na lokacijama 2, 4, 5, 8 i 9, koncentracije radona su mjerene pomoću dva ista detektora (RAD7), što je predstavljeno i na slici 5.1. Odnos srednjih vrijednosti koncentracija radona dobijenih pomoću ova dva detektora na navedenim lokacijama je 1.3, 1.2, 1.4, 1.05 i 0.8, respektivno.

Na slici 5.1. se jasno vidi da su srednje vrijednosti koncentracija radona u zemljištu izmjerene pomoću RAD7 serijskog broja 2197 veće, osim na lokaciji 9, gdje je RAD7 serijskog broja 0595 pokazao veću koncentraciju radona u zemljištu (otprilike za onoliko veću koju, u relativnom odnosu, RAD7 (2197) pokazuje na lokacijama 2 i 4). Ovo pokazuje da dva ista uređaja, na istoj lokaciji, ipak pokazuju različite koncentracije radona. Ne može se reći da jedan uvijek pokazuje veće koncentracije aktivnosti radona (dokaz je lokacija 9). Treba imati u vidu da se radi o visokim koncentracijama radona (desetine kBq/m³), kao i da se za konkretno mjerenje zrak nanovo crpi iz zemljišta. Interesantno je i slično (s obzirom na vrijednost koncentracije radona) pokazivanje dva uređaja na lokaciji 8.

Tabela 5.3. Koncentracije aktivnosti radona izmjerene u zemljištu Podgorice.

Lokacija	RAD7 (2197)			RAD7 (0595)		
	Srednja vrijednost [Bq/m ³]	Standardna devijacija [Bq/m ³]	Opseg ($\cdot 10^3$) [Bq/m ³]	Srednja vrijednost [Bq/m ³]	Standardna devijacija [Bq/m ³]	Opseg ($\cdot 10^3$) [Bq/m ³]
1	16 300	881	15.8 – 17.9			
2	17 400	2610	12.9 – 19.4	13 400	3010	9 – 17
3	5070	9680	0.0973 – 22.3			
4	7970	1330	5.67 – 8.99	6620	1700	4 – 8
5	11 300	3400	5.29 – 13.6	8200	2990	3 – 11
6	32 000	7230	19.3 – 36.8			
7	40 400	8250	25.9 – 45.4			
8	29 800	5980	19.1 – 33.1	28 500	7120	17 – 35
9	11 500	533	10.7 – 12.1	14 700	747	14 – 16
10	19 600	3190	14.1 – 21.9			



Slika 5.1. Srednja koncentracija radona na lokacijama 2, 4, 5, 8 i 9.

Kao što je prethodno navedeno, mjerenja pomoću dva uređaja su urađena da bi se dobili podaci za buduća istraživanja. Ta istraživanja treba da uključe veći broj istovremenih

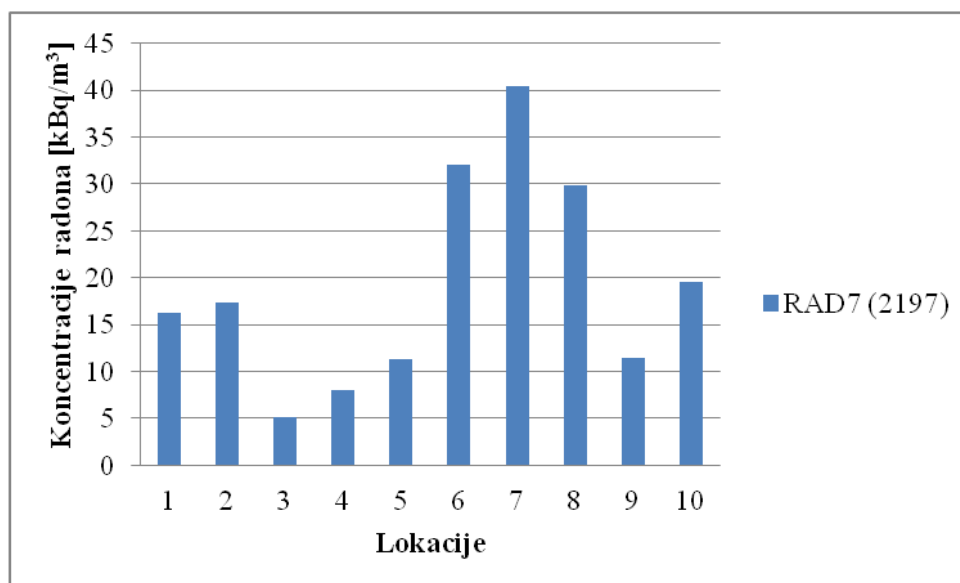
mjerenja (radona u vazduhu *indoor*, u zemljištu, vodi), kao i poređenja podataka iz kalibracija ta dva uređaja.

U tabeli 5.4. su izdvojene i ponovo prikazane srednje koncentracije radona, standardne devijacije, minimalna i maksimalna koncentracija, koje su izmjerene pomoću RAD7 serijskog broja 2197, jer će one biti korišćene za dalje analize i poređenja. Srednje vrijednosti koncentracija radona su prikazane i na slici 5.2.

Tabela 5.4. Vrijednosti koncentracija aktivnosti radona izmjerene pomoću RAD7 (2197).

Lokacija	Srednja vrijednost [Bq/m ³]	Standardna devijacija [Bq/m ³]	Minimalna izmjerena koncentracija [Bq/m ³]	Maksimalna izmjerena koncentracija [Bq/m ³]
1	16 300	881	15 800	17 900
2	17 400	2610	12 900	19 400
3	5070	9680	97.3	22 300
4	7970	1330	5670	8990
5	11 300	3400	5290	13 600
6	32 000	7230	19 300	36 800
7	40 400	8250	25 900	45 400
8	29 800	5980	19 100	33 100
9	11 500	533	10 700	12 100
10	19 600	3190	14 100	21 900

Iz tabele 5.4, najniže vrijednosti koncentracije radona su na lokacijama 3 i 4, 5070 i 7970 Bq/m³, respektivno, i one su značajno niže od koncentracija na ostalim lokacijama. Posmatrajući ove lokacije, kao i lokacije 5 i 9, na kojima su izmjerene sljedeće najniže, a slične, srednje koncentracije radona (11 300 i 11 500 Bq/m³, respektivno), zajedničko im je to što na njima zemljište nije „prirodno“, već je nasipano. Moglo bi se zaključiti da u takvim slučajevima, rastresitijeg i „neslegnutnog“ zemljišta, radon lakše izlazi iz dubine zemljišta, iako, kako je prethodno rečeno, njegova koncentracija zavisi od geološke podloge, kao i vrste zemljišta i drugih faktora.



Slika 5.2. Srednje koncentracije radona izmjerene pomoću RAD7 (2197).

Najveća koncentracija radona u zemljištu izmjerena je na lokacijama 6, 7 i 8 – 32 000, 40 400 i 29 800 Bq/m³, respektivno. Posmatrajući vrste zemljišta na ovim lokacijama, one su različite. Na lokacijama 6 i 8 je crnica, a na lokaciji 7 je uočljiva glina, i prema rezultatima obje vrste zemljišta slabo propuštaju radon.

Minimum, maksimum, srednja vrijednost, standardna devijacija i medijana za sve lokacije (srednje vrijednosti iz tabele 5.4.) iznose oko 5.1, 40.4, 19.1, 11.5 i 16.8 kBq/m³, respektivno.

U tabeli 5.5, dati su rezultati prethodnih mjerenja radona u zemljištu Podgorice ([31]) i rezultati mjerenja izvršenih u okviru ovog rada.

Tabela 5.5. Koncentracije radona izmjerene u zemljištu Podgorice.

Područje (broj mjerenja)	SV [kBq/m ³]	SD [kBq/m ³]	GS [kBq/m ³]	GSD	MIN [kBq/m ³]	MAX [kBq/m ³]	MED [kBq/m ³]	Literatura
Tološi (30)	39	14	-	-	-	-	37.2	[31]
Beri (14)	34	12	-	-	-	-	32.0	[31]
Momišići (10)	49	25	-	-	-	-	46.1	[31]
Zabjelo (13)	29	17	-	-	-	-	24.5	[31]
Podgorica (67)	37	16	-	-	-	-	34.2	[31]
Podgorica (10)	19.1	11.5	16	1.92	5.1	40.4	16.8	Ovaj rad

Iz tabele 5.5. se vidi da je srednja vrijednost koncentracija radona na 10 lokacija, iz ovog rada, 1.9 puta manja od srednje vrijednosti koncentracija koje su ranije izmjerene na lokacijama Beri, Tološi, Momišići i Zabjelo (zajedno). Takođe, standardna devijacija je oko 1.4 puta manja, a medijana oko 2 puta.

Ukoliko se uporedi srednja vrijednost koncentracije radona u zemljištu Podgorice koja je dobijena u ovom radu, sa pojedinačnim srednjim vrijednostima u Tološima, Berima, Momišićima i Zabjelu, vidi se da je ta vrijednost manja 2.04, 1.78, 2.56 i 1.5 puta, respektivno. Takođe, vrijednost standardne devijacije rezultata je manja 1.22, 1.04, 2.17 i 1.48 puta, respektivno. I vrijednost medijane je manja, i to 2.2, 1.9, 2.7 i 1.5 puta, respektivno.

Ovdje treba naglasiti da su različiti instrumenti i različite metode korišćene za mjerenje koncentracija aktivnosti radona u zemljištu prethodno ([31, 32]) i u ovom radu.

Maksimalna, u okviru ovog rada izmjerena, srednja koncentracija radona je 40.4 kBq/m³, na lokaciji 7 (park Gorica), na kojoj je izmjerena i generalno najveća vrijednost koncentracije od 45.4 kBq/m³, za koju se može reći da je uporediva sa podacima koji su dobijeni za Momišiće [31].

Poredeći dalje rezultate dobijene u ovom radu, odnosno koncentracije radona u zemljištu na gradskom području Podgorice, sa nekim drugim podacima iz literature, zaključuje se sljedeće.

U odnosu na podatke koji se odnose na Srbiju, koji su, na primjer, dobijeni pri mjerenjima radona (detektorima tragova CR-39) u zemljištu u okolini termoelektrane Nikola Tesla (broj mjerenja – 27), gdje minimum, maksimum, srednja vrijednost i medijana iznose 0.8, 24.9, 6.6 i 3.9 kBq/m³, respektivno [43], minimum, maksimum, srednja vrijednost i medijana iz ovog rada (statistika srednjih vrijednosti) su veći, i to 6.4, 1.6, 2.9 i 4.3 puta, respektivno. Geometrijska sredina tamo je bila 3.9 kBq/m³, a geometrijska standardna devijacija 3 [43], a za rezultate mjerenja radona pomoću RAD7 na 10 lokacija u Podgorici, one su 16 kBq/m³ i 1.92, respektivno.

U Bugarskoj, gdje su koncentracije radona u zemljištu na 64 lokacije u 13 urbanih sredina mjerene pomoću AlphaGuard PQ 2000 radonskog monitora [36], dobijeni su rezultati predstavljeni u tabeli 5.6.

Minimum, maksimum, standardna devijacija i medijana srednjih koncentracija radona u zemljištu urbanih sredina u Bugarskoj, na osnovu podataka iz tabele 5.6, [36], iznose 4, 52, 16.5 i 21 kBq/m³, respektivno.

Ukoliko se uporedi srednja vrijednost koncentracije radona u zemljištu Podgorice sa srednjom u Bugarskoj, vidi se da je ona manja oko 1.4 puta.

Srednja vrijednost koncentracije radona u zemljištu na 10 lokacija u Podgorici je u odnosu na 7 urbanih sredina u Bugarskoj (BS, CM, EL, PS, PV, SA i SO) manja (odnos koncentracije radona u zemljištu tih sredina i u zemljištu Podgorice je 1.1, 2.6, 2.7, 1.6, 2.7, 1.2 i 1.8, respektivno), dok je u odnosu na preostalih 6 (AG, BG, PK, SM, SZ i VA) veća (odnosi: 0.7, 0.5, 0.9, 0.9, 0.2 i 0.7, respektivno).

Tabela 5.6. Koncentracije radona u zemljištu u Bugarskoj [36].

Urbana sredina	Koncentracija ^{222}Rn u gasu u zemljištu	
	Opseg [kBq/m ³]	Srednja vrijednost [kBq/m ³]
Asenovgrad (AG)	11 – 18	14
Botevgrad (BG)	4 – 19	10
Burgas (BS)	3 – 50	21
Chernomorec (CM)	24 – 67	50
Eleshnica (EL)	12 – 97	52
Pernik (PK)	11 – 21	17
Peshtera (PS)	22 – 49	30
Plovdiv (PV)	28 – 66	52
Sandanski (SA)	13 – 40	22
Smolian (SM)	12 – 27	17
Sofia (SO)	23 – 41	34
Stara Zagora (SZ)	4 – 5	4
Varna (VA)	7 – 22	13
Ukupno	3 – 97	26

U Sloveniji (Ravne), gdje su mjerenja takođe izvršena uređajem AlphaGuard PQ 2000 [37], dobijene su koncentracije aktivnosti radona u gasu u zemljištu, koje su date u tabeli 5.7.

Tabela 5.7. Koncentracije radona u zemljištu u Sloveniji (Ravne) [37].

Lokacija	Koncentracija aktivnosti ^{222}Rn u gasu u zemljištu [kBq/m ³]
1	8.4
2	2.1
3	16.7
4	22.9
5	9.8
6	16.0
7	5.0
8	1.8
9	4.8
10	14.8
11	1.9
12	14.7
13	2.0
14	18.9
15	8.9
16	0.9
17	9.2
18	2.0

Ukoliko se uporedi srednja vrijednost koncentracije radona u zemljištu Podgorice, sa srednjom vrijednošću koja je dobijena za Ravne u Sloveniji (8.9 kBq/m³, slijedi iz tabele 5.7.), vidi se da je srednja vrijednost dobijena u ovom radu veća 2.1 put. Međutim, u toj literaturi [37] se navodi da je dobijeni opseg (0.9-22.9) kBq/m³, ispod srednje vrijednosti za

Sloveniju (40.1 kBq/m^3 , na osnovu mjerenja na 70 tačaka širom Slovenije). Standardna devijacija i medijana koncentracija radona u zemljištu iz tabele 5.7. iznose 6.9 i 8.65 kBq/m^3 , respektivno.

Ako se podaci za minimum, maksimum, standardnu devijaciju i medijanu koncentracija radona u zemljištu u Sloveniji (Ravne) i u Podgorici uporede, onda su vrijednosti za Podgoricu, dobijene u ovom radu, veće, i to 5.7, 1.8, 1.7 i 1.9 puta, respektivno.

Pregled literature pokazuje da su, u evropskim zemljama, mjerenja radona u gasu u zemljištu pokazala rezultate predstavljene u tabeli 5.8, [44]. Publikacija Evropske komisije [44] je iz 2005. godine, a u njoj nema podataka za radon u zemljištu u: Velikoj Britaniji, Švajcarskoj, Španiji, Sloveniji, Srbiji i Crnoj Gori, Rumuniji, Portugaliji, Norveškoj, Malti, Italiji, Irskoj, Mađarskoj, Grčkoj, Makedoniji, Finskoj, Danskoj, Kipru i Belgiji, a za Holandiju su rezultati dati u Bq/kg.

Tabela 5.8. Koncentracije radona u zemljištu u pojedinim evropskim zemljama [44].

Zemlja	Broj mjerenja	Srednja vrijednost koncentracije radona	Minimalna vrijednost koncentracije radona	Maksimalna vrijednost koncentracije radona
Albanija	200	$75\ 000 \text{ Bq/m}^3$	$40\ 000 \text{ Bq/m}^3$	$600\ 000 \text{ Bq/m}^3$
Češka Republika	9000	$28\ 074 \text{ Bq/m}^3$	1000 Bq/m^3	$1\ 663\ 900 \text{ Bq/m}^3$
Estonija	507	$49\ 000 \text{ Bq/m}^3$	$< 1000 \text{ Bq/m}^3$	$2\ 112\ 000 \text{ Bq/m}^3$
	566	$62\ 500 \text{ Bq/m}^3$	1000 Bq/m^3	$2\ 224\ 000 \text{ Bq/m}^3$
Francuska	460	$58\ 000 \text{ Bq/m}^3$	0 Bq/m^3	$598\ 000 \text{ Bq/m}^3$
Holandija	475	25 Bq/kg	6 Bq/kg	72 Bq/kg
Hrvatska	38	$26\ 300 \text{ Bq/m}^3$	6300 Bq/m^3	$53\ 500 \text{ Bq/m}^3$
Letonija	-	-	2000 Bq/m^3	$52\ 000 \text{ Bq/m}^3$
Litvanija	70	$18\ 500 \text{ Bq/m}^3$	1000 Bq/m^3	$60\ 000 \text{ Bq/m}^3$
Luksemburg	> 3000	$45\ 000 \text{ Bq/m}^3$	-	$120\ 000 \text{ Bq/m}^3$
Njemačka	24 000	$55\ 000 \text{ Bq/m}^3$	$< 5000 \text{ Bq/m}^3$	$> 1\ 000\ 000 \text{ Bq/m}^3$
Poljska	126	$16\ 000 \text{ Bq/m}^3$	120 Bq/m^3	$66\ 700 \text{ Bq/m}^3$
	180	$38\ 730 \text{ Bq/m}^3$	3172 Bq/m^3	$89\ 020 \text{ Bq/m}^3$
Slovačka	-	$21\ 600 \text{ Bq/m}^3$	500 Bq/m^3	$712\ 400 \text{ Bq/m}^3$

Srednja vrijednost koncentracije radona u zemljištu Podgorice (19.1 kBq/m^3), koja je dobijena u ovom radu, je približna srednjoj vrijednosti u Litvaniji (18.5 kBq/m^3). I geometrijska sredina za rezultate u toj zemlji (14.4 kBq/m^3) [44], ne razlikuje se mnogo od one koja je dobijena u ovom radu (16 kBq/m^3), kao ni geometrijska sredina rezultata za Češku Republiku (18.8 kBq/m^3) [44].

Ukoliko se uporedi srednja vrijednost koncentracija radona u zemljištu Podgorice iz ovog rada, sa srednjom vrijednošću iste koncentracije u susjednim zemljama, Albaniji i Hrvatskoj, uvida se da je ona manja 3.9 i 1.4 puta, respektivno.

5.3. Odnos izmjerenih i procijenjenih koncentracija ^{222}Rn

Za koncentracije radona u zemljištu i njihove analize, važni su i podaci o tipu i karakteristikama stijena u podlozi, tipu i karakteristikama zemljišta, kao što su vlažnost, permeabilnost, itd., ali su u okviru ovog rada njegove koncentracije uglavnom diskutovane u odnosu na sadržaj, odnosno aktivnost njegovog roditelja ^{226}Ra .

Posmatranje odnosa koncentracija aktivnosti ^{226}Ra i ^{222}Rn (ne samo za prvi u zemljištu, a drugi u vazduhu *indoor*, nego i kad se oba razmatraju za zemljište) je vrlo složen zadatak i zahtijeva posmatranje mnogih parametara, različita mjerenja i proračune [4].

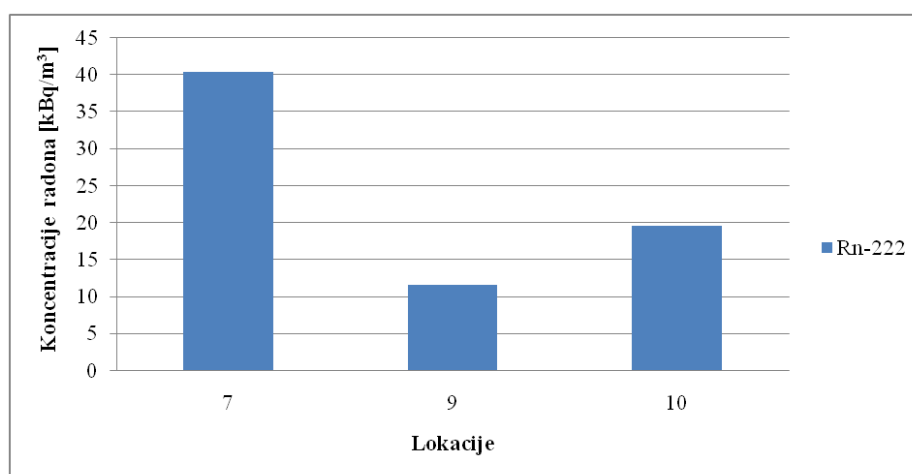
Kao početno istraživanje, korišćeni su podaci o izmjerenim koncentracijama aktivnosti radijuma u zemljištu na lokacijama na kojima je uzorkovanje zemljišta urađeno za dubinu do 0.15 m (lokacije 7, 9 i 10 u tabeli 5.2.) i izmjerenim koncentracijama radona u zemljištu na istim lokacijama (tabela 5.4.). Takođe, razmatrane su koncentracije radijuma izmjerene u površinskom sloju zemljišta sa deset lokacija, u odnosu na izmjerene koncentracije radona u zemljištu na tim lokacijama (slika 5.2.).

U tabeli 5.9, prikazane su srednje vrijednosti koncentracija aktivnosti ^{226}Ra i ^{222}Rn na lokacijama 7, 9 i 10 (park Gorica, CETI i OŠ Dragiša Ivanović, respektivno), a i na slici 5.3. su izdvojene srednje vrijednosti izmjerene koncentracije ^{222}Rn na tim lokacijama.

U tabeli 5.10. su date koncentracije aktivnosti ^{226}Ra u površinskom sloju zemljišta sa 10 lokacija u Podgorici, i koncentracije ^{222}Rn u zemljištu na tim lokacijama, izmjerene pomoću RAD7.

Tabela 5.9. Srednje vrijednosti koncentracija aktivnosti ^{226}Ra i ^{222}Rn na tri lokacije.

Lokacija	Srednja vrijednost koncentracije aktivnosti ^{226}Ra [Bq/kg]	Srednja vrijednost koncentracije aktivnosti ^{222}Rn [kBq/m ³]
7	41.7	40.4
9	76.9	11.5
10	35.9	19.6



Slika 5.3. Srednje vrijednosti izmjerenih koncentracija ^{222}Rn u zemljištu na lokacijama 7, 9 i 10.

Tabela 5.10. Koncentracije aktivnosti ^{226}Ra u površinskom sloju zemljišta i izmjerene koncentracije ^{222}Rn u zemljištu.

Lokacija	Koncentracija aktivnosti ^{226}Ra [Bq/kg]	Srednja vrijednost izmjerene koncentracije aktivnosti ^{222}Rn [kBq/m ³]
1	38.7	16.3
2	24.9	17.4
3	33.9	5.07
4	39.4	7.97
5	39.5	11.3
6	28.8	32
7	41.9	40.4
8	60.4	29.8
9	67.8	11.5
10	30.2	19.6

Odnos između roditelja ^{226}Ra i potomka ^{222}Rn , tj. njihova veza, ovdje se razmatra uz niz pretpostavki.

Zemljište koje je uzorkovano je sušeno, prosijano, zatim i mjereno prema standardnoj proceduri koja se koristi kod HPGe spektrometra [5], a taj proces mijenja stanje zemljišta koje ono ima dok je u tlu, kada se u porama nalazi gas, voda (a postoje i sadržaji organskih i neorganskih supstanci).

5.3.1. Procjene koncentracija ^{222}Rn pomoću parametara iz UNSCEAR 2000

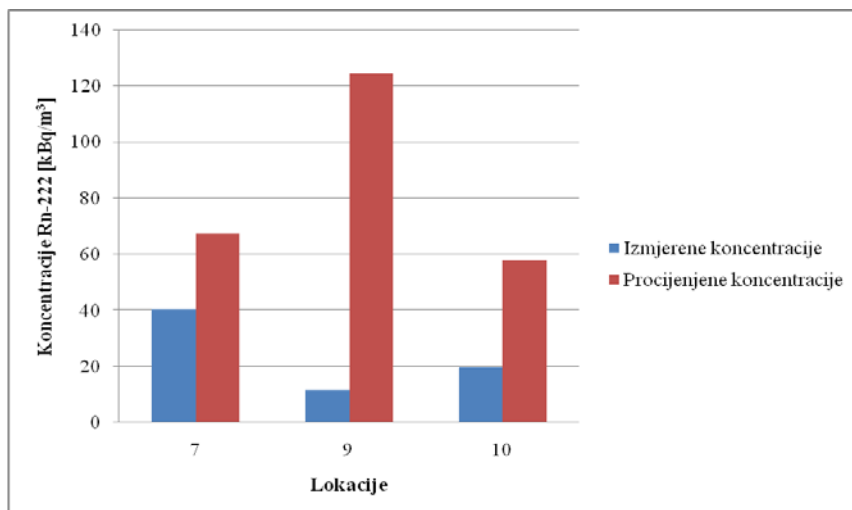
Najprije, ukoliko se uzme da je zemljište suvo ($m = 0$), izraz (2.1) postaje:

$$C_{\text{Rn}} = C_{\text{Ra}} f \rho_s \varepsilon^{-1} (1 - \varepsilon), \quad (5.1)$$

pa koristeći koncentracije aktivnosti ^{226}Ra izmjerene na lokacijama 7, 9 i 10, kao i vrijednosti koeficijenata iz izvještaja UNSCEAR 2000 [8], tj. $\rho_s = 2700 \text{ kg/m}^3$, $\varepsilon = 0.25$, $f = 0.2$, očekivane koncentracije radona su one date u tabeli 5.11. Za poređenje, ove procijenjene vrijednosti su na slici 5.4. date zajedno sa izmjerenim vrijednostima koncentracija radona u zemljištu na istim lokacijama.

Tabela 5.11. Procijenjene koncentracije ^{222}Rn za suva zemljišta, za nivo koncentracija aktivnosti ^{226}Ra izmjeren u Podgorici.

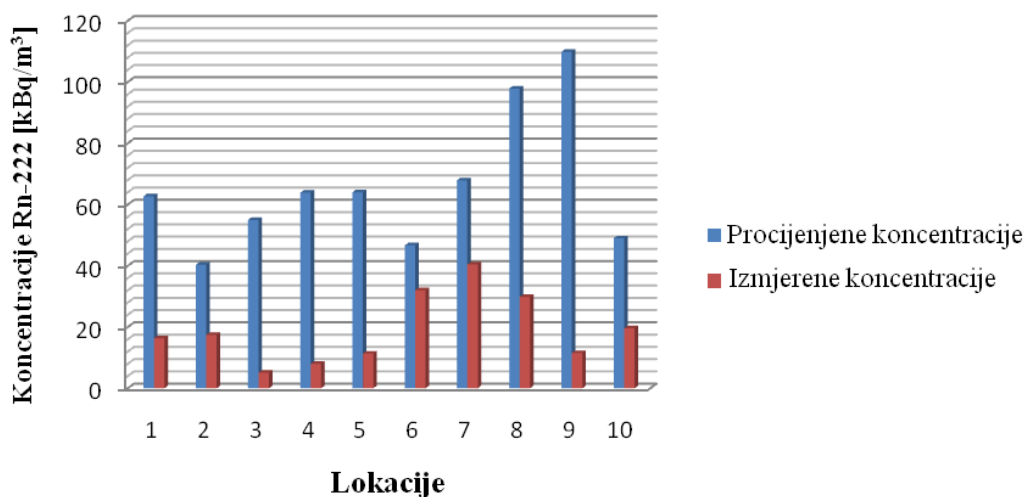
Lokacija	Vrijednosti koncentracije ^{222}Rn (u $[\text{kBq/m}^3]$) izračunate pomoću (5.1)
7	67.5
9	124.6
10	58.2



Slika 5.4. Izmjerene vrijednosti koncentracije ^{222}Rn u odnosu na procijenjene, za suva zemljišta i nivo koncentracija aktivnosti ^{226}Ra izmjeren u Podgorici.

Izmjerene vrijednosti koncentracije aktivnosti ^{222}Rn su manje od procijenjenih, i odnos izračunate (za suva zemljišta) i izmjerene (srednje) koncentracije radona u zemljištu Podgorice na lokacijama 7, 9 i 10 je 1.7, 10.8 i 3, respektivno.

Na isti način, koristeći koncentracije aktivnosti ^{226}Ra u površinskom sloju zemljišta (tabela 5.10.), procijenjene su koncentracije ^{222}Rn , a zatim upoređene, slika 5.5, sa koncentracijama radona koje su na tim lokacijama izmjerene pomoću RAD7.



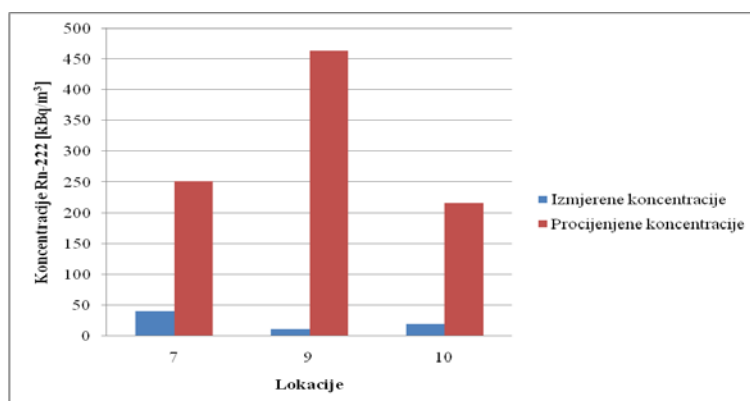
Slika 5.5. Izmjerene i procijenjene (izraz (5.1), aktivnost ^{226}Ra u površinskom sloju zemljišta) koncentracije ^{222}Rn u zemljištu.

U svim slučajevima, procijenjene koncentracije su veće od izmjerenih pomoću RAD7. Njihovi odnosi su od 1.46 (tj. skoro 146 %) na lokaciji 6, i 1.68 (tj. 168 %) na lokaciji 7, do 10.8 (tj. skoro 1100 %) na lokaciji 3.

Ukoliko se uzme da je zemljište toplo i vlažno, pri koncentracijama aktivnosti ^{226}Ra koje su dobijene na lokacijama 7, 9 i 10, i parametrima iz UNSCEAR 2000 [8], očekivane koncentracije radona su one date u tabeli 5.12. Za poređenje, ove procijenjene vrijednosti su na slici 5.6. date sa izmjerenim vrijednostima koncentracija radona u zemljištu.

Tabela 5.12. Procijenjene koncentracije ^{222}Rn za toplu i vlažna zemljišta, za nivo koncentracija aktivnosti ^{226}Ra izmjeren u Podgorici.

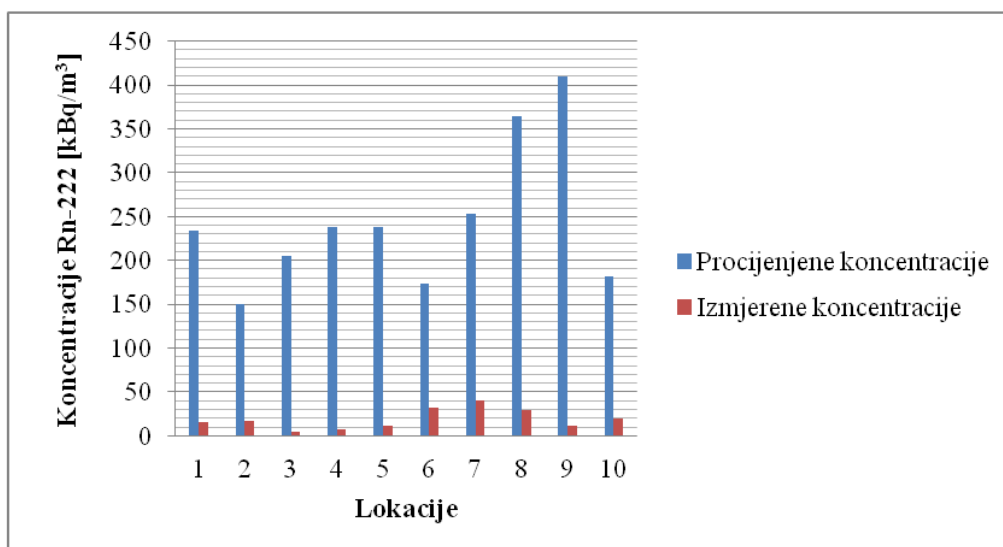
Lokacija	Vrijednosti koncentracije ^{222}Rn (u $[\text{kBq}/\text{m}^3]$) izračunate pomoću (2.1)
7	252
9	464
10	216



Slika 5.6. Izmjerene vrijednosti koncentracije ^{222}Rn u odnosu na procijenjene za toplu i vlažna zemljišta [8], za nivo koncentracija aktivnosti ^{226}Ra izmjeren u Podgorici.

Izmjerene vrijednosti koncentracije ^{222}Rn , na lokacijama 7, 9 i 10, u odnosu na procijenjene za toplu i vlažna zemljišta, su manje 6.2, 40.4 i 11 puta, respektivno.

Na isti način, koristeći koncentracije aktivnosti ^{226}Ra u površinskom sloju zemljišta, procijenjene su koncentracije ^{222}Rn , a zatim upoređene, slika 5.7, sa koncentracijama radona koje su na tim lokacijama izmjerene pomoću RAD7.



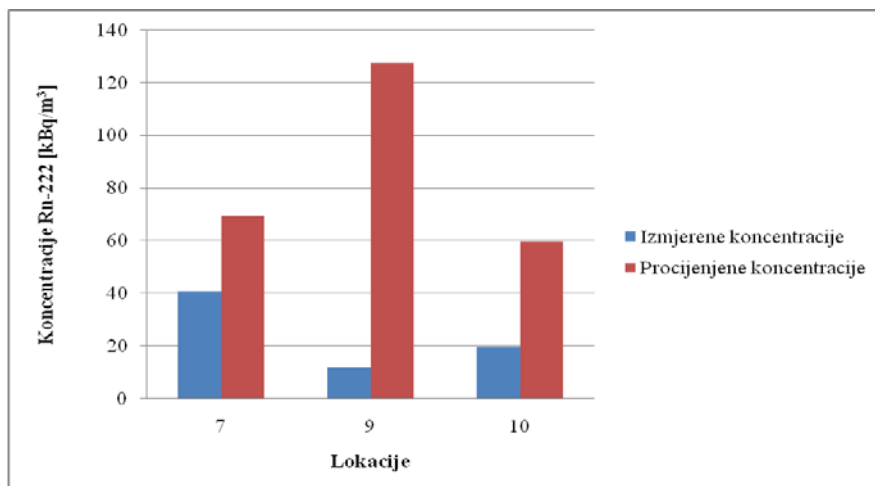
Slika 5.7. Izmjerene vrijednosti koncentracije ²²²Rn u odnosu na procijenjene za toplu i vlažna zemljišta [8], za nivo koncentracija aktivnosti ²²⁶Ra izmjeren u površinskom sloju zemljišta u Podgorici.

U svim slučajevima, procijenjene koncentracije su mnogo veće od izmjerenih. Odnosi su od 5.4 (tj. 543 %) na lokaciji 6, i 6.3 (tj. 626 %) na lokaciji 7, do 40.3 (tj. 4034 %) na lokaciji 3.

Ukoliko se uzme da je isto zemljište u uslovima suvog i hladnog vremena, pri koncentracijama aktivnosti ²²⁶Ra koje su dobijene na lokacijama 7, 9 i 10, očekivane koncentracije radona su one date u tabeli 5.13. Za poređenje, ove procijenjene vrijednosti su na slici 5.8. date sa izmjerenim vrijednostima koncentracija radona u zemljištu.

Tabela 5.13. Procijenjene koncentracije ²²²Rn u zemljištu u uslovima suvog i hladnog vremena, za nivo koncentracija aktivnosti ²²⁶Ra izmjeren u Podgorici.

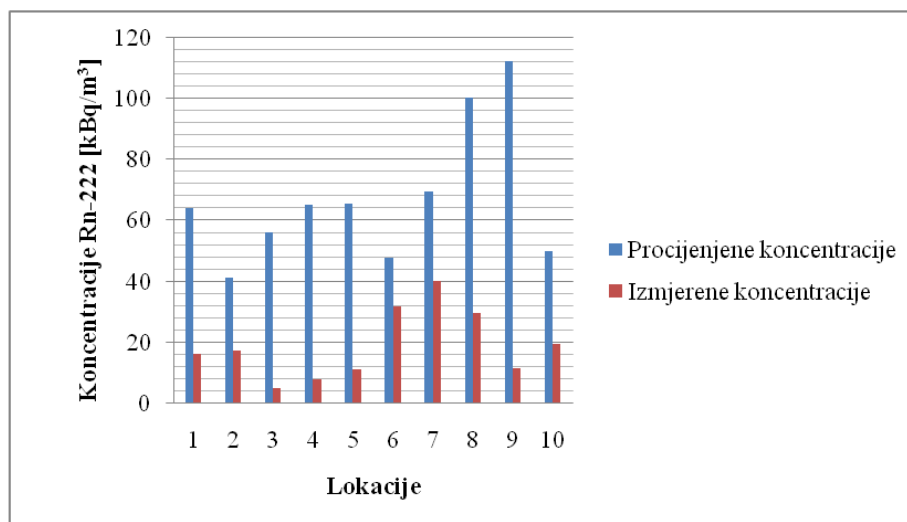
Lokacija	Vrijednosti koncentracije ²²² Rn (u [kBq/m ³]) izračunate pomoću (2.1)
7	69.2
9	128
10	59.6



Slika 5.8. Izmjerene vrijednosti koncentracije ^{222}Rn u odnosu na procijenjene u uslovima suvog i hladnog vremena [8], za nivo koncentracija aktivnosti ^{226}Ra izmjerjen u Podgorici.

Odnos procijenjene koncentracije ^{222}Rn u uslovima suvog i hladnog vremena [8], i izmjerene vrijednosti na lokacijama 7, 9 i 10, je 1.7, 11.1 i 3, respektivno.

Na isti način, koristeći koncentracije aktivnosti ^{226}Ra u površinskom sloju zemljišta, procijenjene su koncentracije ^{222}Rn , a zatim upoređene, slika 5.9, sa koncentracijama radona koje su na tim lokacijama izmjerene pomoću RAD7.



Slika 5.9. Izmjerene vrijednosti koncentracije ^{222}Rn u odnosu na procijenjene u uslovima suvog i hladnog vremena [8], za nivo koncentracija aktivnosti ^{226}Ra izmjerjen u površinskom sloju zemljišta u Podgorici.

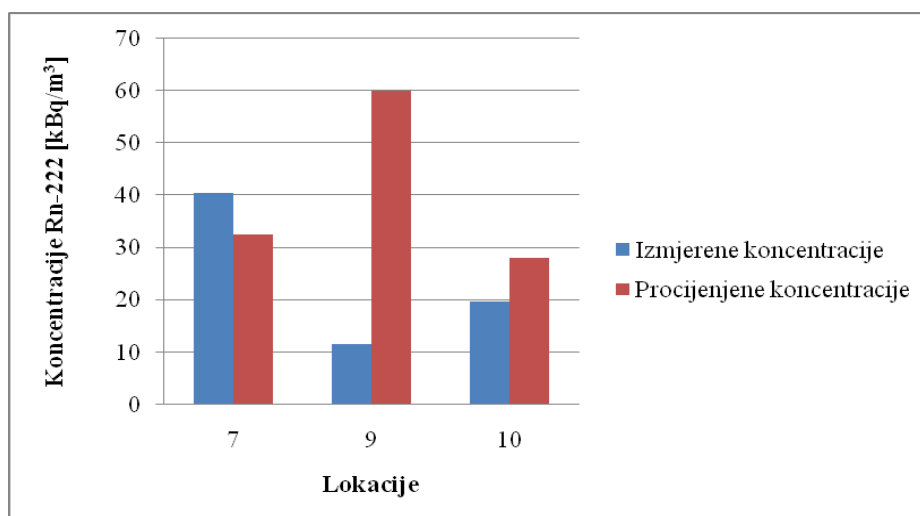
Kao što se vidi na slici 5.9, opet su, u svim slučajevima, procijenjene koncentracije veće od izmjerenih. Odnosi su od oko 1.5 (tj. skoro 150 %) na lokaciji 6, i 1.7 (tj. oko 172 %) na lokaciji 7, do 11.1 (tj. 1109 %) na lokaciji 3.

Sve procijenjene koncentracije radona su veoma visoke, u prvom redu zbog parametra ρ_s (2700 kg/m^3), kako je on dat u izvještaju UNSCEAR 2000 [8]. Kao primjer kako ta vrijednost utiče na procjene, uzeti su isti svi ostali uslovi i parametri, i za tri lokacije u Podgorici, na kojima je zemljište uzorkovano do dubine 0.15 m, i za koje je određena srednja koncentracija aktivnosti ^{226}Ra , urađena je procjena za gustinu $\rho_s = 1300 \text{ kg/m}^3$.

Odnosno, uzimajući iste uslove i parametre, osim za gustinu, proračun za suva zemljišta daje rezultate predstavljene u tabeli 5.14. i na slici 5.10, za toplu i vlažna zemljišta – u tabeli 5.15. i na slici 5.11, i za ista u uslovima suvog i hladnog vremena – u tabeli 5.16. i na slici 5.12.

Tabela 5.14. Procijenjene koncentracije ^{222}Rn za suva zemljišta gustine 1300 kg/m^3 , za nivo koncentracija aktivnosti ^{226}Ra izmjeren u Podgorici.

Lokacija	Vrijednosti koncentracije ^{222}Rn (u $[\text{kBq/m}^3]$) izračunate pomoću (5.1)
7	32.5
9	60
10	28

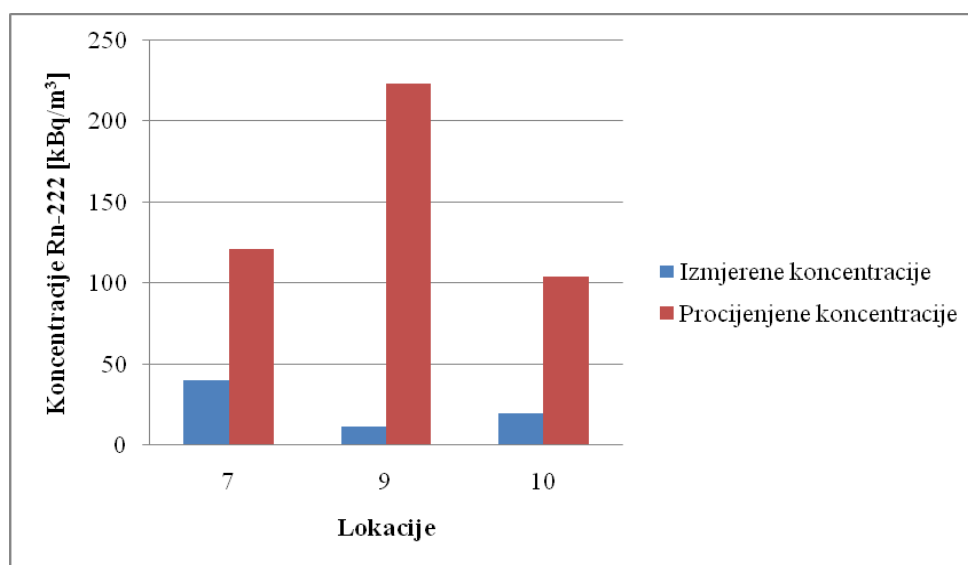


Slika 5.10. Izmjerene vrijednosti koncentracije ^{222}Rn u odnosu na procijenjene za suva zemljišta gustine 1300 kg/m^3 , za nivo koncentracija aktivnosti ^{226}Ra izmjeren u Podgorici.

Izmjerene vrijednosti koncentracije ^{222}Rn u odnosu na procijenjene za suva zemljišta gustine 1300 kg/m^3 , za nivo koncentracija aktivnosti ^{226}Ra izmjeren u Podgorici, na lokacijama 9 i 10 su manje 5.2 i 1.4 puta, respektivno, dok je na lokaciji 7 izmjerena vrijednost koncentracije ^{222}Rn veća 1.2 puta od procijenjene.

Tabela 5.15. Procijenjene koncentracije ^{222}Rn za topla i vlažna zemljišta gustine 1300 kg/m^3 , za nivo koncentracija aktivnosti ^{226}Ra izmjeren u Podgorici.

Lokacija	Vrijednosti koncentracije ^{222}Rn (u $[\text{kBq/m}^3]$) izračunate pomoću (2.1)
7	121
9	223
10	104

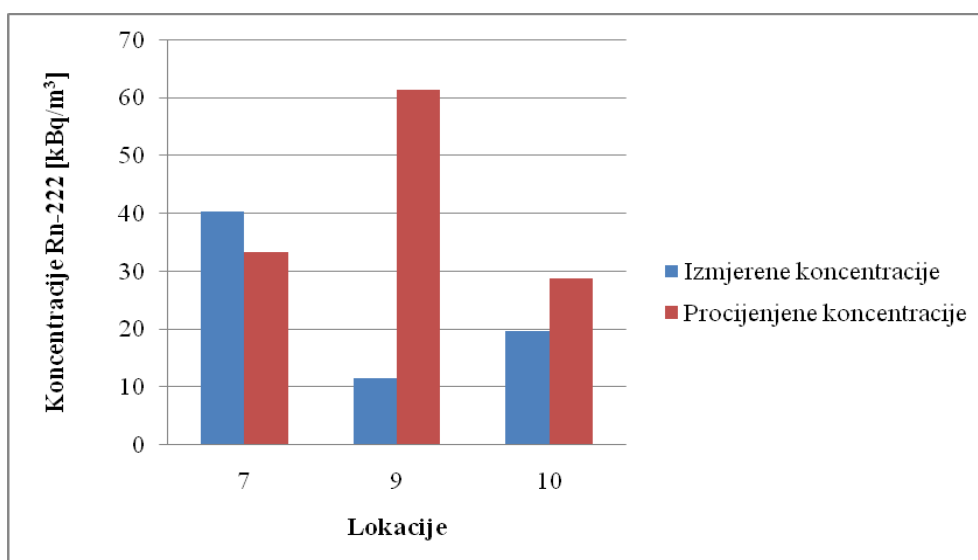


Slika 5.11. Izmjerene vrijednosti koncentracije ^{222}Rn u odnosu na procijenjene za topla i vlažna zemljišta gustine 1300 kg/m^3 , za nivo koncentracija aktivnosti ^{226}Ra izmjeren u Podgorici.

Odnosi procijenjenih, za topla i vlažna zemljišta gustine 1300 kg/m^3 , i izmjerenih koncentracija ^{222}Rn na lokacijama 7, 9 i 10, su 3, 19.4 i 5.3, respektivno.

Tabela 5.16. Procijenjene koncentracije ^{222}Rn za zemljište gustine 1300 kg/m^3 , u uslovima suvog i hladnog vremena, za nivo koncentracija aktivnosti ^{226}Ra izmjeren u Podgorici.

Lokacija	Vrijednosti koncentracije ^{222}Rn (u $[\text{kBq/m}^3]$) izračunate pomoću (2.1)
7	33.3
9	61.4
10	28.7



Slika 5.12. Izmjerene vrijednosti koncentracije ^{222}Rn u odnosu na procijenjene za zemljišta gustine 1300 kg/m^3 u uslovima suvog i hladnog vremena, za nivo koncentracija aktivnosti ^{226}Ra izmjeren u Podgorici.

Ukoliko se uporede izmjerene vrijednosti koncentracije ^{222}Rn sa procijenjenom za zemljišta gustine 1300 kg/m^3 u uslovima suvog i hladnog vremena, za koncentracije aktivnosti ^{226}Ra izmjerene u Podgorici na tri lokacije 7, 9 i 10, vidi se da je izmjerena vrijednost na lokaciji 9 i 10 manja od procijenjene, i to 5.3 i 1.5 puta, respektivno, dok na lokaciji 7 ona veća 1.2 puta od procijenjene.

Velika odstupanja procijenjenih od izmjerenih koncentracija radona se javljaju iz nekoliko razloga. Na primjer različite vrste i karakteristike zemljišta (uključujući gustinu), vremenski uslovi pri mjerenju i oni uzeti pri proračunu, različite zapremine, formula koja je korišćena za procjenu (2.1) koja se koristi „u odsustvu transporta radona“ [8].

5.3.2. Procjene koncentracija ^{222}Rn na osnovu aktivnosti ^{226}Ra u zemljištu Podgorice

Realnije poređenje izmjerenih koncentracija aktivnosti radona u zemljištu sa onim koje se dobijaju procjenama, može se dobiti uzimajući u obzir približno realne gustine zemljišta. Kao što je prethodno rečeno, uzorci zemljišta su pakovani u Marineli posude 0.5 L (tj. 0.5 dm^3). Posude su u potpunosti punjene, različitim masama (kako se vidi u tabeli 5.2.). Procjene gustina zemljišta su date u tabeli 5.17. U potpunosti tačni rezultati mogli bi se dobiti ako bi se gustine svakog uzorka izmjerile odgovarajućim metodom, a i kada bi se egzaktno, za konkretne slučajeve, odredili i drugi parametri.

Tabela 5.17. Procjene gustina zemljišta u uzorcima sa lokacija u Podgorici.

Lokacija	Dubina sloja [m]	Masa [kg]	Približna gustina [kg/m^3]	Koncentracija aktivnosti ^{226}Ra [Bq/kg]
1	0-0.05	0.500	1000	38.7 ± 1.0
2	0-0.05	0.502	1004	24.9 ± 0.8
3	0-0.05	0.545	1090	33.9 ± 0.7
4	0-0.05	0.511	1022	39.4 ± 1.0
5	0-0.05	0.583	1166	39.5 ± 0.9
6	0-0.05	0.647	1294	28.8 ± 0.6
7	0-0.05	0.636	1272	41.9 ± 0.8
	0.05-0.10	0.724	1448	40.4 ± 0.8
	0.10-0.15	0.778	1556	42.8 ± 0.8
8	0-0.05	0.530	1060	60.4 ± 1.1
9	0-0.05	0.531	1062	67.8 ± 0.9
	0.05-0.10	0.673	1346	62.8 ± 0.9
	0.10-0.15	0.554	1108	100 ± 1
10	0-0.05	0.856	1712	30.2 ± 0.6
	0.05-0.10	0.626	1252	36.7 ± 0.8
	0.10-0.15	0.616	1232	40.6 ± 0.8

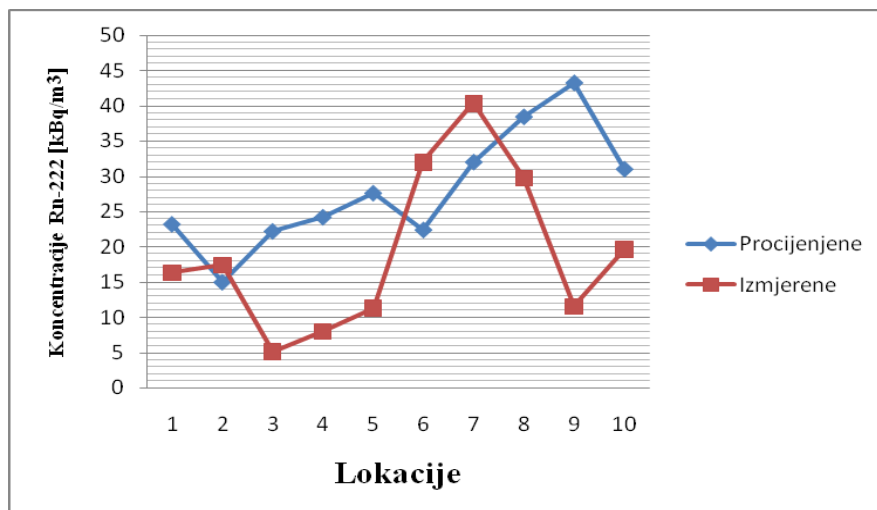
Pretpostavljajući da je na dubini od 0.5 m aktivnost ^{226}Ra ista kao srednja vrijednost na dubini do 0.15 m, i da je ravnomjerna i jednaka u cijeloj zapremini koja u tom slučaju iznosi 0.009375 m^3 ($0.15 \text{ m} \times 0.25 \text{ m} \times 0.25 \text{ m}$), uzimajući srednju gustinu zemljišta iz tri sloja (1425 kg/m^3 za lokaciju 7, 1172 kg/m^3 za lokaciju 9, 1399 kg/m^3 za lokaciju 10), procijenjene su koncentracije radona u zemljištu na tim lokacijama. Uz iste pretpostavke, korišćeni su i podaci o koncentracijama aktivnosti ^{226}Ra u površinskom sloju (uzimajući u obzir gustine zemljišta u tim uzorcima) za svih 10 lokacija.

Za procjene je korišćena formula (5.1), jer je frakcija m (u izrazu (2.1)) jednaka nuli ako je zemljište suvo, a uzorci zemljišta jesu bili osušeni prije mjerenja.

U tabeli 5.18. su dati rezultati procjena (^{226}Ra u površinskom sloju), a na slici 5.13, upoređene su procijenjene i izmjerene koncentracije radona u zemljištu (odnosi – u tabeli 5.19, pokazuju minimum, maksimum, srednju vrijednost, standardnu devijaciju i medijanu, u iznosu 0.7, 4.38, 2.03, 1.31 i 1.5, respektivno).

Tabela 5.18. Mjerenja i procjene za površinski sloj zemljišta (^{226}Ra , ^{222}Rn).

Lokacija	Koncentracija aktivnosti ^{226}Ra u površinskom sloju [Bq/kg]	Srednja vrijednost izmjerene koncentracije aktivnosti ^{222}Rn [kBq/m ³]	Procijenjena (izraz (5.1)) koncentracija aktivnosti ^{222}Rn [kBq/m ³]
1	38.7 ± 1.0	16.3 ± 0.9	23.2 ± 0.6
2	24.9 ± 0.8	17.4 ± 2.6	15.0 ± 0.5
3	33.9 ± 0.7	5.07 ± 9.68	22.2 ± 0.5
4	39.4 ± 1.0	7.97 ± 1.33	24.2 ± 0.6
5	39.5 ± 0.9	11.3 ± 3.4	27.6 ± 0.6
6	28.8 ± 0.6	32.0 ± 7.2	22.4 ± 0.5
7	41.9 ± 0.8	40.4 ± 8.2	32.0 ± 0.6
8	60.4 ± 1.1	29.8 ± 6.0	38.4 ± 0.7
9	67.8 ± 0.9	11.5 ± 0.5	43.2 ± 0.6
10	30.2 ± 0.6	19.6 ± 3.2	31.0 ± 0.6



Slika 5.13. Procijenjene i izmjerene koncentracije ²²²Rn na 10 lokacija u Podgorici.

Tabela 5.19. Odnos procijenjene i izmjerene koncentracije ²²²Rn na lokacijama u Podgorici.

Lokacija	Odnos procijenjene i izmjerene koncentracije ²²² Rn	Odnos procijenjene i izmjerene koncentracije ²²² Rn [%]
1	1.42	142
2	0.86	86
3	4.38	438
4	3.04	304
5	2.44	244
6	0.7	70
7	0.79	79
8	1.29	129
9	3.76	376
10	1.58	158

Podaci iz tabele 5.18. pokazuju da su minimum, maksimum, srednja vrijednost, standardna devijacija i medijana procijenjenih koncentracija radona (na osnovu koncentracija radijuma u površinskom sloju zemljišta): 15, 43.2, 27.9, 8.4 i 25.9 kBq/m³, respektivno. Geometrijska sredina iznosi 26.8 kBq/m³, a geometrijska standardna devijacija 1.36.

Srednja vrijednost procijenjene koncentracije radona pokazuje solidno slaganje sa srednjom koncentracijom radona koja je prethodno, pasivnim radiometrom, izmjerena na području Zabjela (29 kBq/m^3 [31]).

Sa slike 5.13. i iz tabele 5.19. se vidi, rezultati su najpribližniji za lokaciju 2, a najviše se razlikuju za lokacije 3 i 9. Ako se pogleda tabela 5.4, vidi se da je na lokaciji 3 maksimalna izmjerena vrijednost 22.3 kBq/m^3 , što je gotovo identično sa procjenom, dok je na lokaciji 9 i maksimalna izmjerena vrijednost mnogo manja od procijenjene.

Posmatrajući ostale lokacije, zaključuje se da je na lokaciji 1, maksimalna izmjerena vrijednost (17.9 kBq/m^3) bliža procjeni (23.2 kBq/m^3), na lokaciji 4 i maksimalna izmjerena vrijednost (8.99 kBq/m^3) je mnogo različita od procjene (24.2 kBq/m^3), kao i na lokaciji 5 (13.6 kBq/m^3 i 27.6 kBq/m^3 , respektivno).

Na lokaciji 6, minimalna izmjerena vrijednost (19.3 kBq/m^3) je bliža procjeni (22.4 kBq/m^3), kao i na lokaciji 7 (25.9 kBq/m^3 i 32.0 kBq/m^3 , respektivno). Na lokaciji 8, opet je maksimalna izmjerena vrijednost (33.1 kBq/m^3) bliža procjeni (38.4 kBq/m^3), koja je i na lokaciji 10 nešto bliža procjeni (21.9 kBq/m^3 i 31.0 kBq/m^3 , respektivno), dok na lokaciji 9 postoji ogromno odstupanje i maksimalne izmjerene vrijednosti u odnosu na procijenjenu (12.1 kBq/m^3 i 43.2 kBq/m^3 , respektivno).

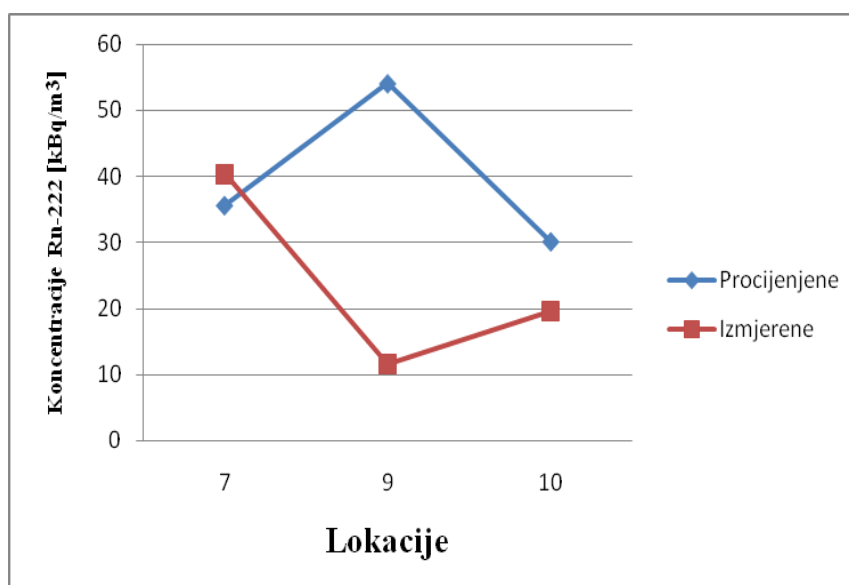
Za lokacije 7, 9 i 10, srednje gustine zemljišta i koncentracije aktivnosti ^{226}Ra , dobijeni su rezultati predstavljeni u tabeli 5.20. i na slici 5.14.

Odnosi procijenjene i izmjerene koncentracije radona na lokacijama 7, 9 i 10 su 0.88, 4.7 i 1.53, respektivno (tj. 88, 470 i 153 %, respektivno).

U poređenju sa procjenama na osnovu podataka za površinski sloj, u ovom slučaju se procijenjena koncentracija nešto približila izmjerenoj za lokaciju 7, i nešto (još manje) onoj koja je izmjerena na lokaciji 10. U slučaju lokacije 9, procijenjena koncentracija još više odstupa od izmjerene.

Tabela 5.20. Procjene za lokacije 7, 9 i 10 (^{226}Ra , ^{222}Rn).

Lokacija	Srednja koncentracija aktivnosti ^{226}Ra [Bq/kg]	Srednja vrijednost izmjerene koncentracije aktivnosti ^{222}Rn [kBq/m ³]	Procijenjena (izraz (5.1)) koncentracija aktivnosti ^{222}Rn [kBq/m ³]
7	41.7 ± 0.8	40.4 ± 8.2	35.6 ± 0.7
9	76.9 ± 0.9	11.5 ± 0.5	54.1 ± 0.6
10	35.9 ± 0.7	19.6 ± 3.2	30.1 ± 0.6

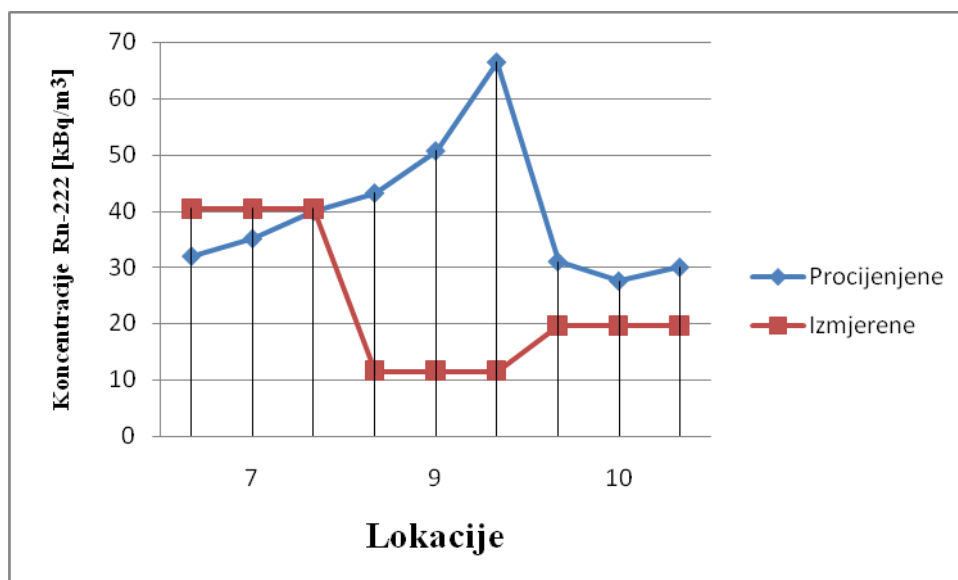


Slika 5.14. Izmjerene i procijenjene koncentracije ^{222}Rn na lokacijama 7, 9 i 10 (srednje aktivnosti ^{226}Ra i srednje gustine zemljišta za dubinu 0.15 m).

Posmatrajući koncentracije aktivnosti ^{226}Ra na različitoj dubini (tabela 5.2.), vidi se da na lokaciji 7 nema velike razlike (tj. koncentracije aktivnosti su približne). Na lokaciji 10, primjećuje se rast koncentracije aktivnosti radijuma sa dubinom, dok je na lokaciji 9, gdje je u površinskom sloju koncentracija veća nego u srednjem, u najdubljem sloju ona značajno veća. Procjene za slojeve pojedinačno, i poređenja sa izmjerenim koncentracijama radona, dati su u tabeli 5.21. i na slici 5.15.

Tabela 5.21. Procjene koncentracija radona za sve slojeve zemljišta na lokacijama 7, 9 i 10.

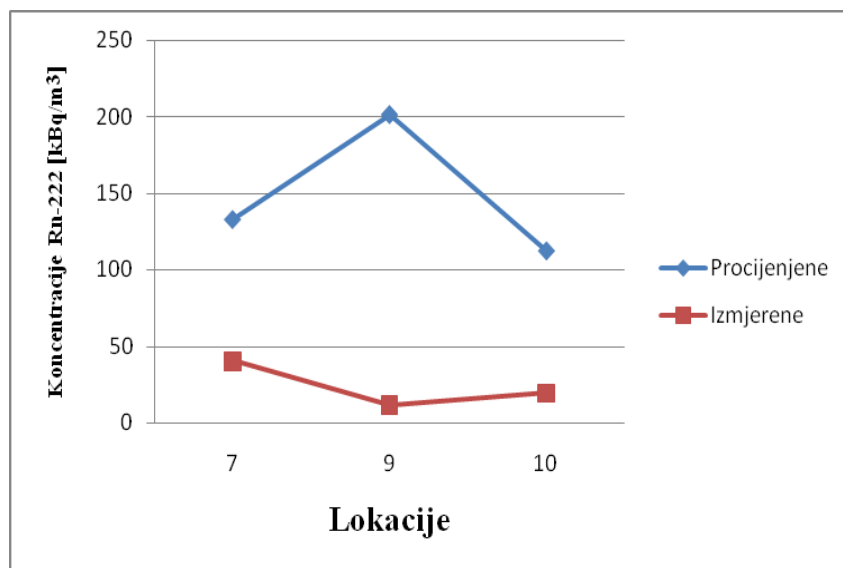
Lokacija	Dubina sloja [m]	Gustina [kg/m ³]	Koncentracija aktivnosti ²²⁶ Ra [Bq/kg]	Srednja vrijednost izmjerene koncentracije aktivnosti ²²² Rn [kBq/m ³]	Procijenjena (izraz (5.1)) koncentracija aktivnosti ²²² Rn [kBq/m ³]
7	0-0.05	1272	41.9 ± 0.8	40.4 ± 8.2	32.0 ± 0.6
	0.05-0.10	1448	40.4 ± 0.8		35.1 ± 0.7
	0.10-0.15	1556	42.8 ± 0.8		40.0 ± 0.7
9	0-0.05	1062	67.8 ± 0.9	11.5 ± 0.5	43.2 ± 0.6
	0.05-0.10	1346	62.8 ± 0.9		50.7 ± 0.7
	0.10-0.15	1108	100 ± 1		66.5 ± 0.7
10	0-0.05	1712	30.2 ± 0.6	19.6 ± 3.2	31.0 ± 0.6
	0.05-0.10	1252	36.7 ± 0.8		27.6 ± 0.6
	0.10-0.15	1232	40.6 ± 0.8		30.0 ± 0.6



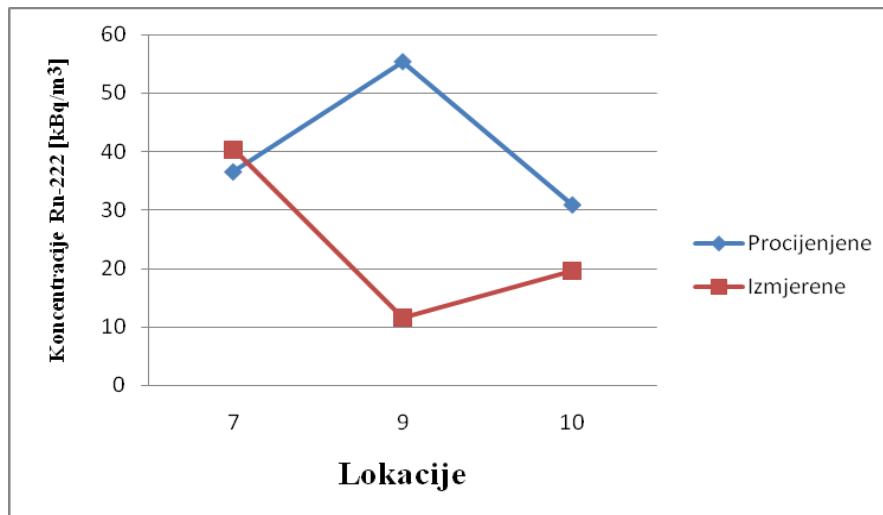
Slika 5.15. Poređenja koncentracija radona koje su procijenjene za sve slojeve zemljišta na lokacijama 7, 9 i 10, sa izmjerenim koncentracijama radona na tim lokacijama.

Gotovo idealno poklapanje (98.9 %) dobija se za sloj (0.10-0.15) m na lokaciji 7. Najveća odstupanja su na lokaciji 9 (za sve slojeve), a nešto manja na lokaciji 10 (opet za sve slojeve).

Kao dopuna, za ove tri lokacije, uzimajući srednje gustine zemljišta, urađene su i procjene prema parametrima UNSCEAR 2000 [8] – za topla i vlažna zemljišta, za zemljišta u uslovima suvog i hladnog vremena, koje se zatim (slika 5.16. i 5.17, respektivno) mogu uporediti sa izmjerenim koncentracijama radona.



Slika 5.16. Izmjerene vrijednosti koncentracije ^{222}Rn na lokacijama 7, 9 i 10, u odnosu na procijenjene za topla i vlažna zemljišta gustina 1425, 1172, 1399 kg/m^3 , respektivno, i nivo koncentracija aktivnosti ^{226}Ra koji odgovara srednjem izmjenom u sloju zemljišta 0.15 m na tim lokacijama.



Slika 5.17. Izmjerene vrijednosti koncentracije ^{222}Rn na lokacijama 7, 9 i 10, u odnosu na procijenjene u uslovima suvog i hladnog vremena, za zemljišta gustina 1425, 1172, 1399 kg/m^3 , respektivno, i nivo koncentracija aktivnosti ^{226}Ra koji odgovara srednjem izmjenom u sloju zemljišta 0.15 m na tim lokacijama.

Podaci predstavljeni na slici 5.16. pokazuju da su odnosi procijenjene i izmjerene koncentracije radona na lokacijama 7, 9 i 10, oko 3.3, 17.5 i 5.7, respektivno, a podaci predstavljeni na slici 5.17. pokazuju odnose – 0.9, 4.8 i 1.6, respektivno.

Generalno, posmatrajući sva poređenja procijenjenih i izmjerenih koncentracija ^{222}Rn u zemljištu na gradskom području Podgorice, slijedi da su odstupanja značajna, kao i da je najmanje odstupanje (odnos procijenjene i izmjerene koncentracije – oko 0.9) uočeno na lokaciji 7, kad se uzme srednja gustina zemljišta, i srednja koncentracija aktivnosti ^{226}Ra izmjerena u tri sloja (do dubine 0.15 m). Ovo su pokazale i procjene pomoću izraza (5.1), kao i primjena parametara iz izvještaja UNSCEAR 2000 [8], za uslove suvog i hladnog vremena. Još bolje poklapanje (skoro 99 %) dobija se za sloj (0.10-0.15) m na lokaciji 7 (park Gorica).

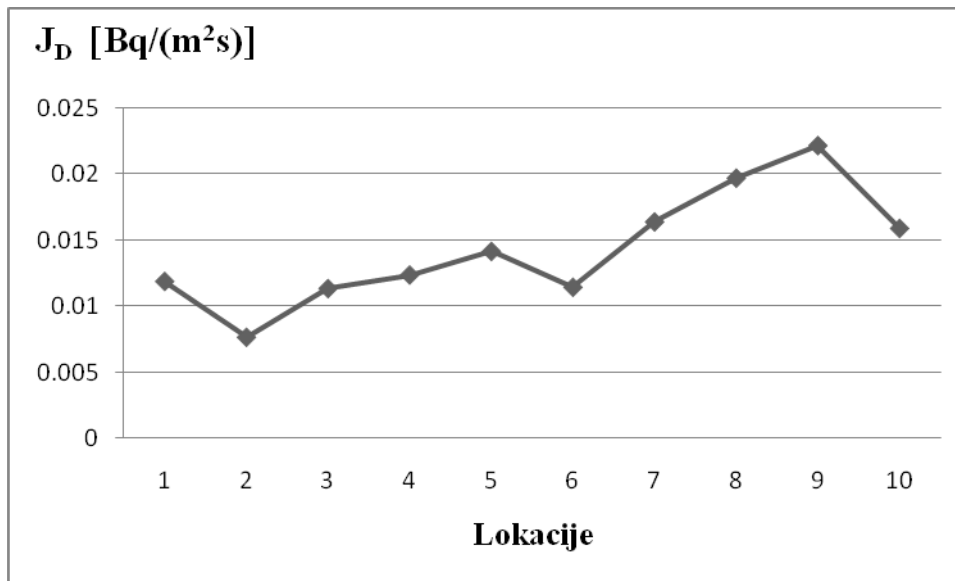
Istraživanja izvršena u okviru ovog rada su pokazala da je potrebno da se, između ostalog, koncentracije radona izmjere na različitim dubinama, da se zemljište uzorkuje sa veće dubine, a svaki uzorak odredi – u smislu gustine, tipa i drugih karakteristika zemljišta. Tada bi poređenja koncentracija radona, procijenjenih na osnovu koncentracija aktivnosti ^{226}Ra u zemljištu, i dobijenih mjerenjima (aktivnim ili pasivnim metodom), bila pouzdanija.

5.3.3. Gustina fluksa radona na površini suvog zemljišta

Proračuni gustine fluksa radona na površini suvog zemljišta (izraz (2.2)), predstavljeni su u tabeli 5.22. i na slici 5.18. Radi se o površinskom sloju zemljišta, tj. koncentracijama aktivnosti ^{226}Ra koje su u uzorku iz tog sloja izmjerene. Izraz (2.2) se može primijeniti samo za suvo zemljište, što je ovdje bio slučaj. Korišćeni su parametri UNSCEAR 2000 [8], osim za gustinu. Pri proračunima je korišćena gustina uzoraka koja je procijenjena u tabeli 5.17.

Tabela 5.22. Procjene gustine fluksa radona na površini suvog zemljišta na mjernim lokacijama u Podgorici.

Lokacija	Koncentracije aktivnosti ^{226}Ra u površinskom sloju [Bq/kg]	Procjene gustine fluksa radona (J_D , izraz (2.2)) na površini suvog zemljišta [Bq/(m ² s)]
1	38.7 ± 1.0	0.011897 ± 0.000307
2	24.9 ± 0.8	0.007685 ± 0.000247
3	33.9 ± 0.7	0.011359 ± 0.000235
4	39.4 ± 1.0	0.012378 ± 0.000314
5	39.5 ± 0.9	0.014158 ± 0.000323
6	28.8 ± 0.6	0.011456 ± 0.000239
7	41.9 ± 0.8	0.016384 ± 0.000313
8	60.4 ± 1.1	0.019682 ± 0.000358
9	67.8 ± 0.9	0.022135 ± 0.000294
10	30.2 ± 0.6	0.015894 ± 0.000316



Slika 5.18. Gustina fluksa radona na površini suvog zemljišta na mjernim lokacijama u Podgorici.

Statistička analiza podataka iz tabele 5.22, pokazuje da su minimum, maksimum, srednja vrijednost, standardna devijacija i medijana gustine fluksa radona približno 0.008, 0.022, 0.014, 0.004 i 0.013 Bq/(m²s), respektivno.

Poredeći ovu srednju vrijednost (0.014 Bq/(m²s)) sa vrijednošću koja se navodi u izvještaju UNSCEAR 2000 kao reprezentativna (0.033 Bq/(m²s) [8]), vidi se da je vrijednost za Podgoricu manja skoro 2.4 puta. Međutim, srednja vrijednost gustine fluksa radona određena u ovom radu vrlo dobro se slaže sa srednjim fluksom koji je procijenjen za globalni nivo (0.016 Bq/(m²s) [8]).

Procjene gustine fluksa radona mogu se uraditi i koristeći srednje koncentracije aktivnosti radijuma na lokacijama 7, 9 i 10, ali i na osnovu mjerenja koncentracija aktivnosti ²²⁶Ra u zemljištu na većem broju lokacija, u budućim istraživanjima.

5.3.4. Poređenja koncentracija ²²²Rn u zemljištu Podgorice i indoor koncentracija u Podgorici

Posmatrajući podatke o *indoor* koncentracijama radona na području Podgorice (tabele 3.2 – 3.5.), i upoređujući ih sa rezultatima mjerenja radona u zemljištu (tabela 5.5.), kao i urađenim procjenama koncentracija aktivnosti ²²²Rn na osnovu koncentracija aktivnosti ²²⁶Ra,

jasno je da su koncentracije radona u zemljištu mnogostruko veće od njegovih koncentracija u zatvorenom (stambenom) prostoru, što je bilo i očekivano.

Podaci iz izvještaja UNSCEAR iz 1988. godine [45], na primjer, pokazuju da u pojedinim zemljištima (u zavisnosti od karakteristika – tipa, vlažnosti, granulacije, poroznosti, i sadržaja urana), na dubini 1 m, koncentracije aktivnosti radona mogu dostići i hiljadu kBq/m³. Odnosno, ti podaci pokazuju da se, na primjer u zemljištu Švedske, kod pojedinih zemljišta opseg koncentracije radijuma kreće od 15 do 62 Bq/kg, a koncentracije radona od 5 do 30 kBq/m³, kod onih sa sadržajem granita, koncentracija radijuma se kreće od 30 do 125 Bq/kg, a koncentracija radona od 10 do 60 kBq/m³, kod onih sa granitom koji je bogat uranom, koncentracija radijuma kreće se od 125 do 360 Bq/kg, a koncentracija radona od 10 do 200 kBq/m³. Za šljunkovito zemljište, koncentracija radijuma kreće se od 30 do 75 Bq/kg, a koncentracija radona od 10 do 150 kBq/m³, a za pjeskovita zemljišta – od 6 do 70 Bq/kg i od 10 do 80 kBq/m³, respektivno. Za zemljišta sa škriljcem stipse, koncentracija radijuma se kreće od 175 do 2500 Bq/kg, a koncentracija radona od 50 do preko 1000 kBq/m³.

I u ovom radu dobijeni rezultati su potvrdili da korelacije između koncentracije aktivnosti ²²⁶Ra u zemljištu i koncentracije njegovog potomka ²²²Rn u gasu tog zemljišta – na istoj lokaciji, nijesu jednostavne, a tim više nijesu jednostavne veze između koncentracija aktivnosti ²²⁶Ra u zemljištu i koncentracija radona u bliskom zatvorenom prostoru, tj. *indoor*, bez obzira što je osnovni izvor radona *indoor* upravo tlo ispod građevinskog objekta.

Kao primjer može poslužiti lokacija 5, Prirodno-matematički fakultet, tj. prostor napolju, u blizini laboratorije za fiziku 044, u kojoj su prethodno ([11]) izvršena mjerenja *indoor* koncentracija ²²²Rn uređajem RAD7. U toj laboratoriji, detektovane su koncentracije radona u vazduhu u opsegu (23.8-90.9) Bq/m³, sa srednjom vrijednošću i standardnom devijacijom od 45.3 Bq/m³ i 16.1 Bq/m³, respektivno [11].

Rezultati dobijeni u ovom radu pokazuju da je koncentracija aktivnosti ²²⁶Ra u zemljištu u neposrednoj blizini 39.5 Bq/kg, da je izmjerena koncentracija ²²²Rn u zemljištu na istoj lokaciji 11 300 Bq/m³, a procijene te koncentracije na osnovu aktivnosti ²²⁶Ra su:

63 999 Bq/m³ – za suva zemljišta gustine 2700 kg/m³,

238 324 Bq/m³ – za topla i vlažna zemljišta gustine 2700 kg/m³,

65 530 Bq/m³ – za zemljišta gustine 2700 kg/m³, u uslovima suvog i hladnog vremena,

30 810 Bq/m³ – za suva zemljišta gustine 1300 kg/m³,

114 749 Bq/m³ – za topla i vlažna zemljišta gustine 1300 kg/m³,

31 551 Bq/m³ – za zemljišta gustine 1300 kg/m³, u uslovima suvog i hladnog vremena.

Srednja koncentracija radona u laboratoriji 044 iznosi 45.3 Bq/m³, što je za oko 249 puta manje od koncentracije radona koja je izmjerena u zemljištu u blizini te laboratorije, dok u odnosu na procijenjenu koncentraciju, na istoj lokaciji, koristeći parametre iz izvještaja UNSCEAR [8], za suva zemljišta gustine 2700 kg/m³, topla i vlažna zemljišta gustine 2700 kg/m³, zemljišta gustine 2700 kg/m³ u uslovima suvog i hladnog vremena, suva zemljišta gustine 1300 kg/m³, topla i vlažna zemljišta gustine 1300 kg/m³, zemljišta gustine 1300 kg/m³ u uslovima suvog i hladnog vremena, koncentracija radona u laboratoriji 044 je manja oko 1413, 5261, 1447, 680, 2533 i 696 puta, respektivno.

Gustina zemljišta na toj lokaciji (oko 1166 kg/m³), i procjene urađene sa tom gustinom, za suvi uzorak zemljišta, kakav je bio pri mjerenju koncentracije aktivnosti ²²⁶Ra, dale su vrijednost koncentracije radona u zemljištu 27 634 Bq/m³, što je 610 puta veća koncentracija od *indoor* koncentracije koja je izmjerena u obližnjem zatvorenom prostoru.

6. ZAKLJUČAK

Predmet ovog rada bile su koncentracije radona u zemljištu na 10 javnih površina na gradskoj teritoriji glavnog grada Crne Gore. U njemu su dati publikovani rezultati mjerenja *indoor* koncentracija radona u stanovima u Crnoj Gori, i rezultati jedinih dosadašnjih mjerenja radona u zemljištu, koji se odnose na Podgoricu. Takođe, dati su i određeni rezultati koji se odnose na zemlje regiona, Evrope i svijeta, koji se mogu naći u literaturi.

Mjerenja koncentracija radona izvršena su uređajem RAD7, a da bi se uradile procjene na osnovu koncentracija aktivnosti njegovog roditelja radijuma, izvršena su i mjerenja uzoraka zemljišta HPGe spektrometrom.

Rezultati ovog istraživanja pokazuju da su:

(i) minimum, maksimum, srednja vrijednost, standardna devijacija i medijana koncentracija aktivnosti ^{226}Ra u sloju zemljišta do 0.05 m na 10 lokacija, 24.9, 67.8, 40.5, 13.6 i 39.0 Bq/kg, respektivno. Na tri lokacije na kojima je zemljište uzorkovano do dubine 0.15 m, srednje koncentracije aktivnosti ^{226}Ra su 41.7, 76.9 i 35.9 Bq/kg;

(ii) minimum, maksimum, srednja vrijednost, standardna devijacija i medijana izmjerenih koncentracija radona u zemljištu, iznose oko 5.1, 40.4, 19.1, 11.5 i 16.8 kBq/m³, respektivno. Srednja vrijednost izmjerenih koncentracija je manja od onih koji su prethodno izmjerene pasivnim radiometrom, u Berima, Tološima, Momišićima i Zabjelu;

(iii) odnos koncentracija radona koje su procijenjene na osnovu aktivnosti radijuma u površinskom sloju zemljišta, i izmjerenih koncentracija radona, kreće se od 0.7 do skoro 4.4, sa srednjom vrijednošću oko 2. Gotovo idealno poklapanje izmjerene i procijenjene koncentracije radona u zemljištu (oko 99 %), dobijeno je za lokaciju park Gorica, za sloj zemljišta (0.10-0.15) m;

(iv) srednja vrijednost gustine fluksa radona na površini suvog zemljišta, određena u ovom radu (0.014 Bq/(m²s)), vrlo dobro se slaže sa srednjim fluksom koji je procijenjen za globalni nivo (0.016 Bq/(m²s)).

Dobijene koncentracije radona u gasu u zemljištu su mnogo veće od koncentracija u vazduhu *indoor*, koje su izmjerene u Podgorici, a nijesu uočene jednoznačne veze između koncentracije aktivnosti ^{226}Ra u zemljištu i koncentracije njegovog potomka ^{222}Rn u gasu tog zemljišta.

Istraživanja sprovedena u okviru ovog rada pokazala su da su neophodna dalja istraživanja, uključujući i statističke analize korelacija između koncentracija ^{226}Ra u zemljištu i ^{222}Rn u zemljišnom gasu;

mjerenja na većem broju lokacija, primjenom različitih – pasivnih i aktivnih metoda;

uzorkovanja zemljišta sa veće dubine i određivanja karakteristika zemljišta odgovarajućim metodima;

razmatranja parametara kao što su vlažnost, temperatura, itd.

Literatura

- [1] K. N. Mukhin. Experimental Nuclear Physics. Vol I, Mir Publishers, Moscow (1987).
- [2] <http://nucleardata.nuclear.lu.se/toi/nucSearch.asp> (*pregled: januar 2017*)
- [3] Nikola Svrkota. Razvoj koincidentnih metoda mjerenja na višedetektorskim gama-spektrometrima. *Doktorska disertacija*, Prirodno-matematički fakultet, Univerzitet Crne Gore (2013).
- [4] Nevenka Antović. Rn-222 (Radon – osobine, porijeklo i izvori, putevi ulaska u zgradu i faktori koji utiču na njegovu koncentraciju, dnevne i sezonske promjene koncentracije, uticaj na zdravlje ljudi) – *prezentacija*. Obuka *Tima za mitigaciju radona*, Građevinski fakultet, Univerzitet Crne Gore (2016).
- [5] Nevenka Antović. Materijali i prezentacije za studente Prirodno-matematičkog fakulteta – Laboratorijski praktikum III i IV (Nuklearna fizika) (2015-2016).
- [6] <https://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/39132/22-01Fall-2003/NR/rdonlyres/Nuclear-Engineering/22-01Introduction-to-Ionizing-RadiationFall2003/5DFA7557-1468-4200-9BF4-33F5E8B377AA/0/radon.pdf>
(*pregled: januar 2017*)
- [7] N. Antovic, P. Vukotic, R. Zekic, R. Ilic. Indoor radon concentrations in the town of Niksic, Montenegro. *Radiation Protection Dosimetry*, 124/4, 385-391 (2007).
- [8] Sources and effects of ionizing radiation, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes, Annex B: Exposures from natural radiation sources, Annex C: Occupational radiation exposures, United Nations, New York (2000).
- [9] Sources and effects of ionizing radiation, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). UNSCEAR 2006 Report to the General Assembly with Scientific Annexes, Annex E: Sources-to-effects assessment for radon in homes and workplaces, United Nations, New York (2006).
- [10] Sources and effects of ionizing radiation, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). UNSCEAR 2008 Report to the General Assembly with Scientific Annexes, Annex B: Exposures of the public and workers from various sources of radiation, United Nations, New York (2010).

- [11] Marija Perović. Koncentracije radona u laboratorijama za fiziku Prirodno-matematičkog fakulteta u Podgorici. *Specijalistički rad*, Prirodno-matematički fakultet, Univerzitet Crne Gore (2013).
- [12] N. Antovic, P. Vukotic, S. K. Andrukhovich, A. V. Berestov, E. A. Rudak, S. Dapchevic. Radon measurement by coincidence gamma-ray spectrometry. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 249/1, 159-162 (2001).
- [13] RAD7 radon detector – User Manual. DurrIDGE company (2015).
- [14] Clifford, D. A., Higgins, E. A.. Measurement of ^{226}Ra and ^{228}Ra in water by gamma-ray counting after preconcentration on ion-exchange resin. *Health Physics*, 62/5, 413-421 (1992).
- [15] Tahir, S. N. A., Jamil, K., Zaidi, J. H., Arif, M., Ahmed, N., and Ahmad, S. A., Measurements of activity concentrations of naturally occurring radionuclides in soil samples from Punjab province of Pakistan and assessment of radiological hazards. *Radiation Protection Dosimetry*, 113/4, 421-427 (2005).
- [16] C. G. Sanderson, Determination of ^{226}Ra and ^{228}Th in food, soil, and biological ash by multidimensional coincident gamma-ray spectrometry. *Health Physics* 16/6, 747-753 (1969).
- [17] H. Muth, B. Globel. Age dependent concentration of ^{226}Ra in human bone and some transfer factors from diet to human tissues. *Health Physics*, 44, Supp. 1, 113-121 (1983).
- [18] N. Antovic, N. Svrkota Measuring the radium-226 activity using a multidetector γ -ray coincidence spectrometer. *Journal of Environmental Radioactivity*, 100/10, 823-830 (2009).
- [19] R. Blackburn, and M.S. Al-Masri. Determination of radon-222 and radium-226 in water samples by Cerenkov counting. *Analyst*, 118, 873-876 (1993).
- [20] F. Schönhofer. Measurement of ^{226}Ra in water and ^{222}Rn in water and air by liquid scintillation counting. *Radiation Protection Dosimetry*, 45, 123-125 (1992).
- [21] K. Sato, T. Hashimoto, M. Noguchi, W. Nitta, H. Higuchi, N. Nishikawa, T. Sanada. A simple method for determination of ^{226}Ra in environmental samples by applying α - β coincidence liquid scintillation counting. *Journal of Environmental Radioactivity*, 48/2, 247-256 (2000).
- [22] HASL-300. EML Procedures Manual. Environmental Measurements Laboratory, U.S. Department of Energy, 28 Edition (1997).
- [23] IAEA. Measurement of radionuclides in food and the environment (a guidebook), *Technical report*, Series No. 295 (1989).
- [24] Nikola Svrkota. Određivanje aktivnosti torijuma i produkata njegovog raspada metodom dvostrukih koincidencija. *Magistarski rad*, Prirodno-matematički fakultet, Univerzitet Crne Gore (2007).

- [25] Gamma-vision 32. Gamma-ray spectrum analysis NCA emulator for Microsoft, ORTEC (2003).
- [26] N. Antovic, P. Vukotic, R. Zekic, R. Svrkota, R. Ilic. Indoor radon concentrations in urban settlements on the Montenegrin Coast. *Radiation Measurements*, 42/9, 1573-1579 (2007).
- [27] P. Vukotic, N. Antovic, R. Zekic, R. Svrkota, I. Kobal, D. Rudman, R. Ilic. Indoor radon concentrations in the capital of Montenegro. *Bulletin of Montenegrin Academy of Science and Art*, 17, 85-95 (2007).
- [28] Perko Vukotic, Nevenka Antovic, Ranko Zekic, Ranko Svrkota, Radomir Ilic. Indoor Radon Concentrations in Four Municipalities of the Central Part of Montenegro. *Journal of Research in Physics*, 32/1, 1-15 (2007).
- [29] *Pravilnik o granicama izlaganja jonizujućim zračenjima*, Sl. list SRJ, br. 32/98.
- [30] Official Journal of the European Union, COUNCIL DIRECTIVE 2013/59/EURATOM 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, L 13/1 (2014).
- [31] P. Vukotić, S. Dapčević, N. Saveljić, V. V. Uvarov, V. M. Kulakov, N. Antović, M. Pajović, R. Svrkota, M. Mirkovic. Koncentracije radona u zemljištu Podgorice. *Glasnik Odjeljenja prirodnih nauka*, Crnogorska akademija nauka i umjetnosti, 11, 211-226 (1997).
- [32] P. Vukotich, V. V. Uvarov, N. Antovich, S. Dapchevich. Radon concentrations in soil of the city of Podgorica, Montenegro. *Geofisica Internacional*, 41/3, 277-280 (2002).
- [33] <https://www.google.com/maps/>
- [34] Zavod za statistiku Crne Gore – Monstat, Statistički godišnjak 2012, Podgorica, 2012.
- [35] Sources and effects of ionizing radiation, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). UNSCEAR 1993 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes, Annex A: Exposures of natural sources of radiation, United Nations, New York (1993).
- [36] Bistra Kunovska, Kremena Ivanova, Zdenka Stojanovska, Daniel Vuchkov, Nadia Zaneva. Measurements of radon concentration in soil gas of urban areas, Bulgaria. *Romanian Journal of Physics*, 58, Supplement, P. S172–S179 (2013).
- [37] J. Vaupotič, A. Gregorič, I. Kobal, P. Žvab, K. Kozak, J. Mazur, E. Kochowska, D. Grzadzie. Radon concentration in soil gas and radon exhalation rate at the Raven Fault in NW Slovenia. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10, 895–899 (2010).

- [38] N. M. Antović, N. Svrkota, I. Antović, R. Svrkota, R. Žižić, D. Živković. Radioactivity impact assessment of Nikšić region in Montenegro, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 302/2, 831-836 (2014).
- [39] Nevenka M. Antović, Danilo S. Bošković, Nikola R. Svrkota, Ivanka M. Antović. Radioactivity in soil from Mojkovac, Montenegro, and assessment of radiological and cancer risk, *Nuclear Technology and Radiation Protection*, 27/1, 57-63 (2012).
- [40] N. M. Antović, N. Svrkota and I. Antović. Radiological impacts of natural radioactivity from soil in Montenegro. *Radiation Protection Dosimetry*, 148/3, 310-317 (2012).
- [41] Perko Vukotić, Ranko Svrkota, Tomislav Anđelić, Ranko Zekić, Nevenka Antović. Lokalnosti u Crnoj Gori sa povećanim fonom zračenja, *Glasnik odjeljenja prirodnih nauka, Crnogorska akademija nauka i umjetnosti*, 20, 13-40 (2014).
- [42] Perko Vukotić, Ranko Svrkota, Tomislav Anđelić, Nikola Svrkota. Bukovik i Bukovica – lokalnosti sa najvećim fonom terestrijalnog zračenja u Crnoj Gori, rad u štampi u *Glasniku odjeljenja prirodnih nauka, Crnogorska akademija nauka i umjetnosti*.
- [43] Dragica Kisić, Nenad Veselinović, Shinji Tokonami, Igro Čeliković, Zoran Stojanović, Olivera Čuknić, Marko Nemčević, Rodoljub Simović, Zora S. Žunić. Norm okolini TE „Nikola Tesla“ B – eksperimentalni rezultati
http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/41/131/41131342.pdf
(pregled: januar 2017)
- [44] European Commission (EC). An overview of radon surveys in Europe (Author: G. Dubois), Luxembourg, EUR 21892 EN (2005).
- [45] Sources, effects and risks of ionizing radiation, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). UNSCEAR 1988 Report to the General Assembly with annexes, Annex A: Exposures from natural sources of radiation, United Nations, New York (1988).

Popis tabela i slika

Tabela 1.1. Osnovne karakteristike izotopa radona [2, 4, 5].

Tabela 1.2. Najintenzivniji zraci iz raspada izotopa radona [2].

Tabela 1.3. Godišnje efektivne doze od prirodnih izvora zračenja [10].

Tabela 3.1. *Indoor* koncentracije radona u stanovima na Primorju Crne Gore [26].

Tabela 3.2. *Indoor* koncentracije radona u stanovima u Podgorici [27].

Tabela 3.3. *Indoor* koncentracije radona u stanovima u centralnom dijelu Crne Gore [28].

Tabela 3.4. *Indoor* koncentracije radona u stanovima u urbanom području centralne Crne Gore [28].

Tabela 3.5. *Indoor* koncentracije radona u stanovima u ruralnom području centralne Crne Gore [28].

Tabela 3.6. Koncentracije radona u stanovima u evropskim državama [8].

Tabela 4.1. Koordinate mjernih tačaka u Podgorici.

Tabela 4.2. Gama zraci čiji su pikovi korišćeni za analizu aktivnosti ^{226}Ra u spektrima uzorka zemljišta.

Tabela 5.1. Izmjerene aktivnosti ^{226}Ra u uzorcima zemljišta.

Tabela 5.2. Koncentracije aktivnosti ^{226}Ra u uzorcima zemljišta.

Tabela 5.3. Koncentracije aktivnosti radona izmjerene u zemljištu Podgorice.

Tabela 5.4. Vrijednosti koncentracija aktivnosti radona izmjerene pomoću RAD7 (2197).

Tabela 5.5. Koncentracije radona izmjerene u zemljištu Podgorice.

Tabela 5.6. Koncentracije radona u zemljištu u Bugarskoj [36].

Tabela 5.7. Koncentracije radona u zemljištu u Sloveniji (Ravne) [37].

Tabela 5.8. Koncentracije radona u zemljištu u pojedinim evropskim zemljama [44].

Tabela 5.9. Srednje vrijednosti koncentracija aktivnosti ^{226}Ra i ^{222}Rn na tri lokacije.

Tabela 5.10. Koncentracije aktivnosti ^{226}Ra u površinskom sloju zemljišta i izmjerene koncentracije ^{222}Rn u zemljištu.

Tabela 5.11. Procijenjene koncentracije ^{222}Rn za suva zemljišta, za nivo koncentracija aktivnosti ^{226}Ra izmjeren u Podgorici.

Tabela 5.12. Procijenjene koncentracije ^{222}Rn za topla i vlažna zemljišta, za nivo koncentracija aktivnosti ^{226}Ra izmjeren u Podgorici.

Tabela 5.13. Procijenjene koncentracije ^{222}Rn u zemljištu u uslovima suvog i hladnog vremena, za nivo koncentracija aktivnosti ^{226}Ra izmjeren u Podgorici.

Tabela 5.14. Procijenjene koncentracije ^{222}Rn za suva zemljišta gustine 1300 kg/m^3 , za nivo koncentracija aktivnosti ^{226}Ra izmjeren u Podgorici.

Tabela 5.15. Procijenjene koncentracije ^{222}Rn za topla i vlažna zemljišta gustine 1300 kg/m^3 , za nivo koncentracija aktivnosti ^{226}Ra izmjeren u Podgorici.

Tabela 5.16. Procijenjene koncentracije ^{222}Rn za zemljište gustine 1300 kg/m^3 , u uslovima suvog i hladnog vremena, za nivo koncentracija aktivnosti ^{226}Ra izmjeren u Podgorici.

Tabela 5.17. Procjene gustina zemljišta u uzorcima sa lokacija u Podgorici.

Tabela 5.18. Mjerenja i procjene za površinski sloj zemljišta (^{226}Ra , ^{222}Rn).

Tabela 5.19. Odnos procijenjene i izmjerene koncentracije ^{222}Rn na lokacijama u Podgorici.

Tabela 5.20. Procjene za lokacije 7, 9 i 10 (^{226}Ra , ^{222}Rn).

Tabela 5.21. Procjene koncentracija radona za sve slojeve zemljišta na lokacijama 7, 9 i 10.

Tabela 5.22. Procjene gustine fluksa radona na površini suvog zemljišta na mjernim lokacijama u Podgorici.

Slika 1.1. Dio uran-radijumskog niza u kojem se javlja radon (^{222}Rn).

Slika 1.2. Dio uran-aktinijumskog niza u kojem se javlja izotop radona aktinon (^{219}Rn).

Slika 1.3. Dio torijumskog niza u kojem se javlja izotop radona toron (^{220}Rn).

Slika 2.1. RAD7 Prirodno-matematičkog fakulteta.

Slika 2.2. ORTEC HPGe spektrometri GEM – 30185-S i GEM – 40190.

Slika 4.1. Karta Podgorice [33].

Slika 4.2. Karta Podgorice sa označenim lokacijama mjerenja.

Slika 4.3. Mjerenje radona u zemljištu pomoću uređaja AlphaGuard [36, 37].

Slika 4.4. RAD7 na lokaciji 5.

Slika 4.5. Dva uređaja RAD7 na mjernoj lokaciji.

Slika 4.6. Dio iz izvještaja o mjerenju na lokaciji 1.

Slika 4.7. Dio iz izvještaja o mjerenju na lokaciji 2.

Slika 4.8. Uzorkovanje zemljišta na lokaciji 2.

Slika 4.9. Uzorci u toku sušenja.

Slici 4.10. Uzorak zemljišta nakon sušenja i prosijavanja kroz sito otvora 2 mm.

Slika 5.1. Srednja koncentracija radona na lokacijama 2, 4, 5, 8 i 9.

Slika 5.2. Srednje koncentracije radona izmjerene pomoću RAD7 (2197).

Slika 5.3. Srednje vrijednosti izmjerenih koncentracija ^{222}Rn u zemljištu na lokacijama 7, 9 i 10.

Slika 5.4. Izmjerene vrijednosti koncentracije ^{222}Rn u odnosu na procijenjene, za suva zemljišta i nivo koncentracija aktivnosti ^{226}Ra izmjeren u Podgorici.

Slika 5.5. Izmjerene i procijenjene (izraz (5.1), aktivnost ^{226}Ra u površinskom sloju zemljišta) koncentracije ^{222}Rn u zemljištu.

Slika 5.6. Izmjerene vrijednosti koncentracije ^{222}Rn u odnosu na procijenjene za toplu i vlažna zemljišta [8], za nivo koncentracija aktivnosti ^{226}Ra izmjeren u Podgorici.

Slika 5.7. Izmjerene vrijednosti koncentracije ^{222}Rn u odnosu na procijenjene za toplu i vlažna zemljišta [8], za nivo koncentracija aktivnosti ^{226}Ra izmjeren u površinskom sloju zemljišta u Podgorici.

Slika 5.8. Izmjerene vrijednosti koncentracije ^{222}Rn u odnosu na procijenjene u uslovima suvog i hladnog vremena [8], za nivo koncentracija aktivnosti ^{226}Ra izmjeren u Podgorici.

Slika 5.9. Izmjerene vrijednosti koncentracije ^{222}Rn u odnosu na procijenjene u uslovima suvog i hladnog vremena [8], za nivo koncentracija aktivnosti ^{226}Ra izmjeren u površinskom sloju zemljišta u Podgorici.

Slika 5.10. Izmjerene vrijednosti koncentracije ^{222}Rn u odnosu na procijenjene za suva zemljišta gustine 1300 kg/m^3 , za nivo koncentracija aktivnosti ^{226}Ra izmjeren u Podgorici.

Slika 5.11. Izmjerene vrijednosti koncentracije ^{222}Rn u odnosu na procijenjene za toplu i vlažna zemljišta gustine 1300 kg/m^3 , za nivo koncentracija aktivnosti ^{226}Ra izmjeren u Podgorici.

Slika 5.12. Izmjerene vrijednosti koncentracije ^{222}Rn u odnosu na procijenjene za zemljišta gustine 1300 kg/m^3 u uslovima suvog i hladnog vremena, za nivo koncentracija aktivnosti ^{226}Ra izmjeren u Podgorici.

Slika 5.13. Procijenjene i izmjerene koncentracije ^{222}Rn na 10 lokacija u Podgorici.

Slika 5.14. Izmjerene i procijenjene koncentracije ^{222}Rn na lokacijama 7, 9 i 10 (srednje aktivnosti ^{226}Ra i srednje gustine zemljišta za dubinu 0.15 m).

Slika 5.15. Poređenja koncentracija radona koje su procijenjene za sve slojeve na lokacijama 7, 9 i 10, sa izmjerenim koncentracijama radona na tim lokacijama.

Slika 5.16. Izmjerene vrijednosti koncentracije ^{222}Rn na lokacijama 7, 9 i 10, u odnosu na procijenjene za topla i vlažna zemljišta gustina $1425, 1172, 1399 \text{ kg/m}^3$, respektivno, i nivo koncentracija aktivnosti ^{226}Ra koji odgovara srednjem izmjerenom u sloju zemljišta 0.15 m na tim lokacijama.

Slika 5.17. Izmjerene vrijednosti koncentracije ^{222}Rn na lokacijama 7, 9 i 10, u odnosu na procijenjene u uslovima suvog i hladnog vremena, za zemljišta gustina $1425, 1172, 1399 \text{ kg/m}^3$, respektivno, i nivo koncentracija aktivnosti ^{226}Ra koji odgovara srednjem izmjerenom u sloju zemljišta 0.15 m na tim lokacijama.

Slika 5.18. Gustina fluksa radona na površini suvog zemljišta na mjernim lokacijama u Podgorici.