



UNIVERZITET U NOVOM SADU  
PRIRODNO–MATEMATIČKI FAKULTET  
DEPARTMAN ZA FIZIKU



MSc Robert Lakatoš

PRIMENA I RAZVOJ METODA ZA ODREĐIVANJE  
RADONA I TORONA U ZEMLJIŠTU I VAZDUHU  
RADI PROCENE RADONSKOG POTENCIJALA

-doktorska disertacija-

Mentor: dr Sofija Forkapić

Novi Sad, 2019.

**УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ**  
**ПРИРОДНО-МАТЕМАТИЧКИ ФАКУЛТЕТ**  
**Департман за физику**

**KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA**

Redni broj: RBR	
Identifikacioni broj: IBR	
Tip dokumentacije: TD	Monografska dokumentacija
Tip zapisa: TZ	Tekstualni štampani materijal
Vrsta rada (dipl., mag., dokt.): VR	Doktorska disertacija
Ime i prezime autora: AU	Robert Lakatoš
Mentor (titula, ime, prezime, zvanje): MN	Dr Sofija Forkapić, naučni saradnik
Naslov rada: NR	Primena i razvoj metoda za određivanje radona i torona u zemljištu i vazduhu radi procene radonskog potencijala
Jezik publikacije: JP	Srpski
Jezik izvoda: JI	srp. / eng.
Zemlja publikovanja: ZP	Republika Srbija
Uže geografsko područje: UGP	Vojvodina
Godina: GO	2019
Izdavač: IZ	autorski reprint
Mesto i adresa: MA	Prirodno-matematički fakultet, Trg Dositeja Obradovića 3, 21000 Novi Sad

Fizički opis rada: FO	(broj poglavlja - 8 / stranica - 133 / slika - 42 / tabela - 16/ referenci - 79 / priloga- 4)
Naučna oblast: NO	Fizika
Naučna disciplina: ND	Nuklearna fizika
Predmetna odrednica, ključne reči: PO	radon, toron, ravnotežna ekvivalentna koncentracija radona i torona
UDK	
Čuva se: ČU	U biblioteci Departmana za fiziku, Prirodno-matematičkog fakulteta, Trg Dositeja Obradovića 3, Novi Sad
Važna napomena: VN	
Izvod: IZ	U okviru ove disertacije razvijena je i verifikovana metoda za direktno merenje koncentracije toronovih potomaka u vazduhu i određivanje toronske ravnoteže. Pouzdanost i primenljivost predloženog GAMA metoda proverena je sveobuhvatnom studijom koncentracija radona, torona i svih parametara koji doprinose ovim koncentracijama na 16 različitih lokacija na području Srbije odabranih na osnovu geomorfologije terena i prethodnih merenja. Iznalaženjem najznačajnijih statističkih korelacija i primenom jedne od predloženih metoda iz korišćene naučne literature za procenu geogenog radonskog potencijala identifikovani su prediktori koji utiču na koncentraciju radona u zemljištu i vazduhu zatvorenih prostorija. Pored toga studijom slučaja u jednoj porodičnoj kući potvrđena je primenljivost i podobnost aktivnih monitora za određivanje radonske i toronske ravnoteže, praćenje varijacija, kao i neophodnost njihove primene u procesu remedijacije objekata sa povišenom koncentracijom radona.
Datum prihvatanja teme od strane Senata: DP	20.09.2018.
Datum odbrane: DO	
Članovi komisije: (ime i prezime / titula / zvanje / naziv organizacije / status) KO	<b>predsednik:</b> prof. dr Dušan Mrđa, redovni profesor, Prirodno-matematički fakultet u Novom Sadu <b>član(mentor):</b> dr Sofija Forkapić, naučni saradnik, Prirodno-matematički fakultet u Novom Sadu <b>član:</b> dr Kristina Bikit-Šreder, naučni saradnik, Prirodno- matematički fakultet u Novom Sadu <b>član:</b> prof. dr Selena Samardžić, vanredni profesor, Fakultet tehničkih nauka u Novom Sadu <b>član:</b> dr Igor Čeliković, naučni saradnik, Institut za nuklearne nauke "Vinča"

**UNIVERSITY OF NOVI SAD**  
**FACULTY OF SCIENCE**  
**Department of physics**

**KEY WORD DOCUMENTATION**

Accession number: ANO	
Identification number: INO	
Document type: DT	Monograph documentation
Type of record: TR	Textual printed material
Contents code: CC	PhD Thesis
Author: AU	Robert Lakatoš
Mentor: MN	dr Sofija Forkapić
Title: TI	Application and development of methods for the radon and thoron determination in the soil and air to assess radon potential
Language of text: LT	Serbian
Language of abstract: LA	eng. / srp.
Country of publication: CP	Republic of Serbia
Locality of publication: LP	Vojvodina
Publication year: PY	2019
Publisher: PU	Author's reprint
Publication place: PP	Faculty of Science, Trg Dositeja Obradovića 3, 21000 Novi Sad

Physical description: PD	(chapters - 8 / pages - 133 / figures - 42 / tables - 16/ references - 79 / annexes- 4)
Scientific field SF	Physics
Scientific discipline SD	Nuclear science
Subject, Key words SKW	Radon, thoron, equilibrium equivalent concentration of radon and thoron
UC	
Holding data: HD	Library of the Department of Physics, Faculty of Science, Trg Dositeja Obradovića 3, Novi Sad
Note: N	
Abstract: AB	Within this dissertation, a method for the direct measurement of indoor thoron progeny concentrations and determination of the thoron equilibrium was developed and verified. The reliability and applicability of the proposed GAMA method was proved by a comprehensive study of radon, thoron and all parameters that contribute to these concentrations at 16 different locations in the territory of Serbia selected based on geomorphology of the terrain and previous measurements. Based on the most significant statistical correlations between all examined parameters and using one of the proposed methods from the literature geogenic radon potential was estimated with identification of the predictors which significantly affect radon concentrations in air and soil. In addition, a case study in one family house confirmed the suitability of active radon monitors for determination of the radon and thoron equilibrium, monitoring of time variations and also the necessity of their application in the remediation of objects with elevated radon.
Accepted on Senate on: AS	20.09.2018.
Defended: DE	
Thesis Defend Board: DB	<b>president:</b> prof. dr Dušan Mrđa, full professor, Faculty of Science in Novi Sad <b>member (menthor):</b> dr Sofija Forkapić, Research Associate, Faculty of Science in Novi Sad <b>member:</b> dr Kristina Bikit-Schroeder, research associate, Faculty of Science in Novi Sad <b>member:</b> prof. dr Selena Samardžić, associate professor at the Faculty of Technical Sciences in Novi Sad <b>member:</b> dr Igor Čeliković, research associate, Vinča Institute of Nuclear Sciences

## Sadržaj

Predgovor .....	8
1. Uvod.....	9
2. Priroda radioaktivnosti.....	12
2.1. Podela zračenja.....	12
2.2. Radioaktivnost. Aktivnost.....	13
2.3. Tipovi raspada .....	13
2.4. Radioaktivna ravnoteža .....	14
2.5. Radioaktivni nizovi .....	14
2.6. Dozimetrijske veličine i jedinice.....	17
3. Ponašanje gasovitih radioaktivnih elemenata - radona ( $^{220}\text{Rn}$ ) i torona ( $^{222}\text{Rn}$ ).....	19
3.1. Fizičke i hemijske osobine radona i torona .....	20
3.2. Pokretljivost radona i torona .....	21
3.2.1. Izvori radona i torona.....	21
3.2.2. Migracija – difuzija i advekcija .....	21
3.2.3. Emanacija i ekshalacija.....	23
3.3. Potomci radona i torona .....	25
3.4. Zdravstveni efekat .....	27
3.4.1. Spoljašnje ozračivanje.....	28
3.4.2. Unutrašnje ozračivanje.....	29
4. Radonski potencijal i problem radona i torona .....	30
4.1. Karakterizacija zagađenosti atmosfere radonovim i toronovim potomcima....	30
4.2. Pregled zakona (EU i Srbija).....	31
4.3. Radon u zatvorenim prostorijama kao radonski potencijal .....	33
4.4. Geogeni radonski potencijal .....	37
4.4.1. Kvantifikacija geogenog radonskog potencijala.....	38

4.5. Sledeći koraci u definisanju radonskog potencijala .....	40
5. Unapređenje i optimizacija gama spektrometrijske metode za direktno određivanje ravnotežne ekvivalentne koncentracije torona i toronske ravnoteže .....	42
5.1. Uvod .....	42
5.2 Merni uređaji .....	45
5.2.1. RAD7 aktivni uređaj – eksperimentalna postavka za merenje koncentracije radona i torona u vazduhu .....	45
5.2.1.1. Korekcija na raspad koncentracije aktivnosti torona .....	46
5.2.2. SARAD RTM 1688-2 aktivni monitor radona i torona .....	48
5.2.3. SARAD RPM 2200 aktivni monitor potomaka radona i torona .....	49
5.2.4. Pumpa velikog protoka sa filter papirom .....	50
5.2.5. Gama-spektrometrijski sistem B .....	50
5.3. Merne tehnike i eksperimentalna postavka .....	51
5.3.1. Matematički model određivanja toronovih potomaka – GAMMA metod .....	54
5.3.2. Osiguranje kvaliteta (QA/QC) i poređenje sa drugim eksperimentalnim metodama za merenje torona i EETC .....	58
5.4 Rezultati i diskusija .....	62
6. Simultana ispitivanja radona, torona i ravnotežnih ekvivalentnih koncentracija njihovih potomaka u porodičnoj kući – studija jednog slučaja .....	65
6.1. Uvod .....	65
6.2. Merni uređaji .....	66
6.2.1. Aktivni uređaj AlphaGuard PQ2000 PRO .....	66
6.3. Metodologija merenja .....	67
6.4. Rezultati merenja i diskusija .....	68
7. Procena radonskog potencijala i statistička obrada parametara koji potencijalno utiču na koncentraciju radona .....	77
7.1. Uvod .....	77

7.2. Merne tehnike .....	79
7.2.1. Ugljeni kanister .....	79
7.2.2. Trag detektor CR-39 .....	80
7.2.3. RAD7 aktivni uređaj – eksperimentalna postavka za merenje koncentracije radona i torona u zemljištu .....	81
7.2.3.1. Interkomparacija aktivnog monitora RAD7 u eksperimentalnoj postavci za merenje radona u zemlji .....	82
7.2.4. Malvern Mastersizer 2000 – uređaj za granulometrijski sastav zemljišta .....	83
7.2.5. Gama-spektrometrijska analiza sadržaja radionuklida u zemljištu i priprema uzoraka .....	85
7.3. Radonski potencijal – metodologija .....	86
7.4. Rezultati i diskusija .....	87
8. Zaključak .....	96
Literatura .....	99
Biografija .....	107
Prilozi .....	108
1. Primer izračunavanja EETC u softverskom paketu Mathematica .....	108
2. Izveštaj Malvern Mastersizera 2000 .....	110
3. Statistička obrada podataka u SPSS softverskom paketu .....	111
4. Wentworth-ova skala veličine čestica .....	133



## Predgovor

*Najveću zahvalnost želeo bih da izrazim svojoj mentorki dr Sofiji Forkapić za svu volju koju je uložila u moj naučni rad, kao i za svo znanje koje mi je tokom godina zajedničkog rada prenela iz oblasti prirodne radioaktivnosti. Takođe želim da joj zahvalim za svo vreme koje je izdvojila za rad na terenu i tokom obrade dobijenih rezultata.*

*Veliku zahvalnost dugujem i kolegici prof. dr Seleni Samardžić za nemerljivu pomoć prilikom statističke obrade podataka kao i na znanjima koja mi je prenela u toku naše dugogodišnje saradnje na Katedri za fiziku.*

*Želeo bih da se zahvalim i ostalim članovima komisije: prof. dr Dušanu Mrđi, dr Kristini Bikit-Šreder i dr Igoru Čelikoviću za svaku naučnu polemiku oko date teme kao i za sve sugestije i primedbe koje su mi tokom rada uputili.*

*Mari Ćurčić želim da zahvalim na ustupanju sobe u kojoj su vršena dugotrajna komparativna merenja radona, torona i potomaka tokom 2018. godine.*

*Zahvalnost dugujem Katedri za nuklearnu fiziku Prirodno-matematičkog fakulteta koja mi je omogućila pristup svim korisnim informacijama i opremi koju poseduju, tokom izrade doktorske disertacije.*

*Kolegama sa Katedre za fiziku, Fakulteta tehničkih nauka želim da se zahvalim na razumevanju i podršci tokom izrade disertacije, a posebno šefici Katedre prof. dr Uraniji Kozmidis-Luburić za svu moralnu i naučnu podršku koju mi je pružila.*

*Ipak, posebna zahvalnost upućena je mojoj porodici, majci, ocu i bratu Kristianu koji su mi bili podrška tokom celog školovanja, pa tako i tokom izrade ove disertacije.*

*Hvala Vam!*

Robert Lakatoš

# 1. Uvod

Još od kraja XIX veka kada je Bekerel otkrio prirodnu radioaktivnost, primećeni su prvi štetni efekti radioaktivnosti na ljudski organizam i nametnula se potreba za zaštitom od zračenja. Ukoliko se pored toga uzme činjenica da se preko 50 % izloženosti prirodnim izvorima jonizujućih zračenja pripisuje radonu, javlja se potreba detaljnog ispitivanja radona i njegovog ponašanja u različitim ambijentalnim uslovima. Ukoliko govorimo o radonu, nikako se ne mogu isključiti njegovi radioaktivni potomci koji se homogeno raspoređuju u atmosferi zatvorenih prostorija u nepripojenoj formi ili formirani u klustere koji se vrlo lako mogu pripojiti aerosolima. Pored radona, u mnogim zatvorenim prostorijama detektuje se i prisustvo radonovog izotopa torona i njegovih potomaka. Radijacioni rizik od gasa torona se umanjuje zbog veoma kratkog perioda poluraspada, ali njegovi relativno dugoživeći potomci nikako ne bi smeli da se zanemaruju prilikom procene ukupnog izlaganja radonu i procene inhalacione doze za stanovništvo.

U istraživanjima u okviru ove disertacije se predlaže egzaktni model određivanja toronske ravnoteže u vazduhu koji se zasniva na gamaspektrometrijskom određivanju koncentracije toronovih potomaka na filter papiru uz simultano alfa spektrometrijsko merenje koncentracije aktivnosti radona i torona u vazduhu. Detaljno su analizirane mogućnosti i nedostaci primene ovog modela na toronsku ravnotežu.

Pored toga, ova istraživanja obuhvataju i proučavanje uticaja sadržaja radionuklida u zemljištu i granulometrijskog sastava na emanaciju radona i torona u zemljištu, kao i iznalaženje statistički značajnih korelacija sa koncentracijama radona i torona u zatvorenim objektima izgrađenim na datom zemljištu. Da bi se upotpunila, analiza izvršena su merenja ekshalacije torona iz uzoraka zemljišta, kao i određivanje mehaničkog sastava zemljišta. Dobijene zavisnosti između sadržaja radijuma i torijuma u zemljištu i emanacije radona i torona moguće je iskoristiti za modelovanje radijacionog rizika od radona.

Aktuelna kampanja Evropskog Atlasa prirodne radioaktivnosti zasniva se na izradi mapa prirodne radioaktivnosti i procene radonskog potencijala nekog područja ili

konkretne lokacije. Radonski potencijal, u osnovi treba da obezbedi procenu mogućeg prisustva radona i određuje se na osnovu merenja drugih parametara koji potencijalno mogu da utiču na radon. Postoje različiti koncepti kako odrediti radonski potencijal i koji su to parametri koje bi trebalo uvrstiti u procenu radonskog potencijala u budućim naučnim istraživanjima. U okviru ove disertacije, za konkretne lokacije, data je detaljna analiza različitih parametara koji karakterišu prisustvo prirodnih radionuklida u vazduhu i zemljištu i predložena je procena radonskog potencijala.

Rad je podeljen u opšta poglavlja (uvod, drugo, treće i četvrto poglavlje) i u tri glavna poglavlja (peto, šesto i sedmo poglavlje). U drugom poglavlju dat je pregled prirodne radioaktivnosti i upoznavanje sa osnovnim dozimetrijskim veličinama. Treće poglavlje se odnosi na ponašanje prirodnih gasovitih radionuklida radona i torona, kao i njihovih kratkoživećih potomaka u vazduhu zatvorenih prostorija. Proučavanje procesa emanacije i ekshalacije radona i torona iz zemljišta i građevinskih materijala i ostalih faktora koji utiču na ove procese (površinska i zapreminska distribucija veličine čestica, sadržaj radionuklida u uzorku) je bitno za sagledavanje svih aspekata za procenu doze od udisanja radona, torona i njihovih potomaka.

U narednom poglavlju opisan je radonski potencijal sa pregledom najnovijih rezultata u ovoj oblasti u Srbiji i Evropi, uz davanje budućih smernica za definisanje radonskog potencijala. Peto poglavlje bazirano je na razvoju i optimizaciji metodologije direktnog određivanja koncentracije toronovih potomaka u vazduhu zatvorenih prostorija novom GAMA metodom, kao i poređenje dobijenih rezultata sa drugim metodama u svrhu validacije predložene metode. Optimizovano je vreme usisavanja pomoću pumpe velikog protoka tokom uzimanja uzorka na filter papiru sa staklenim nitima koji ima veliku efikasnost za pripojene i nepripojene potomke. Nakon toga je analizirano vreme hlađenja i određivanje toronovih potomaka gama-spektrometrijskom metodom.

U šestom poglavlju prikazana je detaljna studija ponašanja radona, torona i njihovih potomaka tokom dvonedeljnih kontinualnih merenja različitim aktivnim monitorima u jednoj porodičnoj kući sa detektovanom povišenom koncentracijom radona i identifikovanim toronom. Cilj interkomparacije aktivnih uređaja za merenje radona i torona je provera konzistentnosti međusobno dobijenih rezultata, kao i ispitivanje uticaja spoljašnjih uslova na ponašanje svakog detektorskog sistema. Dobijena statistički značajna korelacija među rezultatima aktivnih monitora potvrđuje njihovu superiornost u

odnosu na pasivne tehnike detekcije radona i torona, a sve u cilju pripreme za proces remedijacije radonom ugroženih objekata.

Sedmo poglavlje daje odabir adekvatne metode za procenu radijacionog rizika stanovništva i procenu radonskog potencijala. Prikazana je sveobuhvatna analiza parametara koji doprinose koncentraciji radona i torona u zemljištu i vazduhu zatvorenih prostorija na 16 unapred odabranih lokacija na području Srbije na osnovu geomorfologije terena i prethodnih merenja. Iznalaženjem najznačajnijih statističkih korelacija i primenom jedne od predloženih metoda iz korišćene naučne literature za procenu geogenog radonskog potencijala identifikovani su prediktori koji utiču na koncentraciju radona u zemljištu i vazduhu zatvorenih prostorija. Određene su i diskutovane vrednosti radonskog potencijala datih lokacija.

## 2. Priroda radioaktivnosti

### 2.1. Podela zračenja

Zračenje se može definisati kao proces emisije energije, naelektrisanih čestica ili elektromagnetnih talasa iz nestabilnog jezgra. Osnovna podela zračenja je na jonizujuće i nejonizujuće. Nejonizujuće zračenje definiše se kao ono zračenje koje ima dovoljno energije da pomera atome unutar molekula ili da izazove njihove vibracije, ali ipak nedovoljne energije da izvrši jonizaciju i oslobodi elektrone. Primer nejonizujućeg zračenja su svetlost, mikro talasi i radio talasi. Sa druge strane jonizujuće zračenje je ono zračenje koje ima dovoljno energije da jonizuje atome. Osnovna podela jonizujućeg zračenja je na prirodno i veštačko. Prirodno može biti primordijalnog (terestrijalnog) i kosmogenog porekla. Primordijalno zračenje se klasifikuje kao ono zračenje koje je formirano pre postojanja Zemlje, a kosmogeno zračenje je galaktičkog ili solarnog porekla ili nastaje kao rezultat interakcije kosmičkih zraka sa česticama u atmosferi. Veštačko zračenje se proizvodi antropogenim aktivnostima i predstavlja u osnovi medicinske izvore zračenja, fisione produkte u atmosferi nakon nuklearnih proba i nuklearnih akcidenata, nuklearni industrijski otpad i sl.

Prirodna radioaktivnost široko je rasprostranjena u okruženju i javlja se u zemljištu, vazduhu, stenama, vodi i biljnom svetu. Najveći izvor prirodnog zračenja su kosmički zraci i terestrijalno zračenje. Kosmičko zračenje predstavlja zračenje kojem je Zemlja stalno izložena i ono ima ekstraterestrijalno poreklo. Radionuklidi formirani kosmičkim zracima su  $^3\text{H}$ ,  $^7\text{Be}$ ,  $^{10}\text{Be}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{36}\text{Cl}$ ,  $^{38}\text{Cl}$ ,  $^{39}\text{Cl}$ ,  $^{27}\text{Na}$ ,  $^{32}\text{P}$ ,  $^{33}\text{P}$ ,  $^{35}\text{S}$ ,  $^{38}\text{S}$  i  $^{32}\text{Si}$ . Terestrijalno zračenje predstavlja zračenje koje emanira iz zemlje i koje postoji od postanka Zemlje, a dominantni izvori terestrijalnog zračenja su radionuklidi:  $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$  i  $^{232}\text{Th}$ . U ovoj tezi najviše ćemo se baviti radonom  $^{222}\text{Rn}$  i toronom  $^{220}\text{Rn}$  koji su produkti radioaktivnih lanaca raspada elemenata  $^{238}\text{U}$  i  $^{232}\text{Th}$ , respektivno.

Ljudski organizam konstantno je izložen jonizujućem zračenju koje na njega deluje putem eksternog i internog ozračivanja. Eksterno ozračivanje predstavlja terestrijalno i kosmičko zračenje, a interno ozračivanje se odnosi na radionuklide unete u organizam

ingestijom, inhalacijom ili na neki drugi način. Procenjuje se da ukupna radijaciona doza kojom je svetska populacija izložena u 96 % slučajeva potiče od prirodnih izvora, 4 % od veštačkih izvora zračenja (Chougaonkar et al., 2004).

## 2.2. Radioaktivnost. Aktivnost

Radioaktivnost je proces u kome se nestabilno jezgro nekog hemijskog elementa spontano transformiše u stabilno ili nestabilno jezgro. Prilikom raspada oslobađa se višak energije koji može da se emituje u vidu fotonskog ili čestičnog zračenja. Brzina raspada jezgra (aktivnost), odnosno broj  $dN$  jezgara koji se raspada u jedinici vremena  $dt$ , proporcionalan je broju neraspadnutih jezgara:

$$A = -\frac{dN}{dt} = N \lambda, \quad (2.1)$$

gde je  $\lambda$  konstanta raspada i ona predstavlja verovatnoću da će se neko jezgro raspasti u jedinici vremena. Jedinica za aktivost je Bekerel, [Bq] i predstavlja jedan raspad po sekundi. Rešavanjem zakona radioaktivnog raspada (brzina raspada) dobija se jednačina radioaktivnog raspada:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}, \quad (2.2)$$

gde  $N(t)$  predstavlja broj neraspadnutih jezgara, a  $N_0$  predstavlja početni broj jezgara u trenutku  $t=0$ .

Period poluraspada  $T_{1/2}$  koji predstavlja vreme za koje će se raspasti polovina od početnog broja jezgara povezan je sa konstantom raspada sledećom vezom:

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}. \quad (2.3)$$

## 2.3. Tipovi raspada

Postoje različite vrste radioaktivnog raspada i svaka od njih okarakterisana je svojim specifičnim osobinama:

- Alfa zračenje – predstavlja raspad jezgra težeg elementa u jezgro elementa kojem se maseni broj smanji za 4, a atomski za 2 uz emisiju jezgra helijuma

koja je teška, pozitivno naelektrisana čestica. Alfa zračenje u potpunosti možemo zaustaviti listom papira.

- Beta zračenje – sastoji se od raspada pri kome se pojavljuje elektron i antineutrino ( $\beta^-$  raspad) ili pozitron i neutrino ( $\beta^+$  raspad). Prodorna moć beta zraka je veća od alfa čestica i mogu se zaustaviti pločicom od aluminijuma debljine nekoliko milimetara.
- Gama zraci – predstavljaju elektromagnetno zračenje koje je posledica relaksacije jezgra, dok je X zračenje usko vezano za promenu energije elektrona u atomu. Domet gama zraka je velik, zavisno od njihove energije, oni mogu proći kroz ljudsko telo, a zaustavljaju se debelim betonskim zidovima.

## 2.4. Radioaktivna ravnoteža

U prirodi se najčešće javlja situacija da je proizvod raspada (potomak) takođe radioaktivan i u zavisnosti od toga kako se odnose period poluraspada pretka i potomka, javljaju se različite vrste radioaktivnih ravnoteža. Ukoliko je period poluraspada pretka mnogo duži od perioda poluraspada potomka dolazi do uspostavljanja *sekularne ravnoteže*. U stanju sekularne ravnoteže aktivnosti potomka i pretka su gotovo jednake i ostaju takve tokom vremenskog intervala koji je mnogo duži od vremena poluraspada potomka. Sledeća vrsta ravnoteže je *prelazna ravnoteža* i ona se javlja kada je period poluraspada potomka kraći od perioda poluraspada pretka. Kod ove ravnoteže aktivnost potomka raste do maksimalne vrednosti gde odnos broja atoma pretka i potomka ostaje konstantan i njihove apsolutne vrednosti aktivnosti se smanjuju tokom vremena. Postoji i mogućnost da se ne uspostavi radioaktivna ravnoteža, a to se javlja u slučaju kada je period poluraspada pretka kraći od perioda poluraspada potomka.

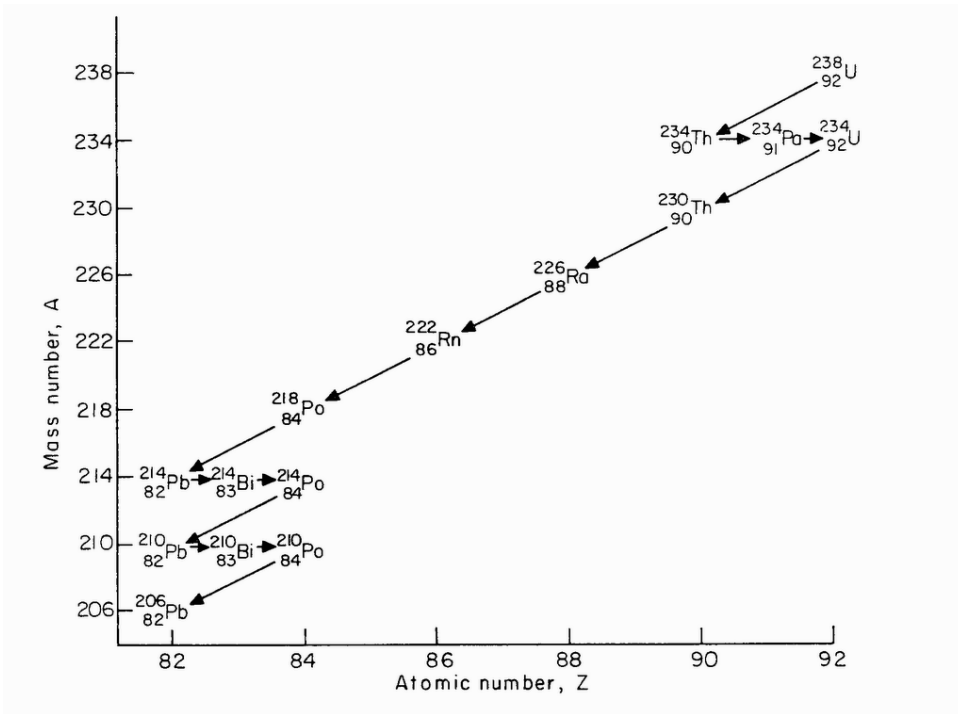
## 2.5. Radioaktivni nizovi

Svi elementi u prirodnim izvorima čiji je atomski broj veći od 83 su radioaktivni. Takvi elementi su članovi jednog od tri prirodna radioaktivna niza. Postojanje elemenata na Zemlji sa periodom poluraspada kraćim od starosti planete objašnjava se upravo time da se ti elementi nalaze u radioaktivnim nizovima čiji rodonačelnici (roditeljski izotop) imaju periode poluraspada znatno veće od dosadašnje starosti Zemlje. Ti elementi nalaze se u sekularnoj ravnoteži sa precima u nizu koji imaju znatno duže periode poluraspada. U

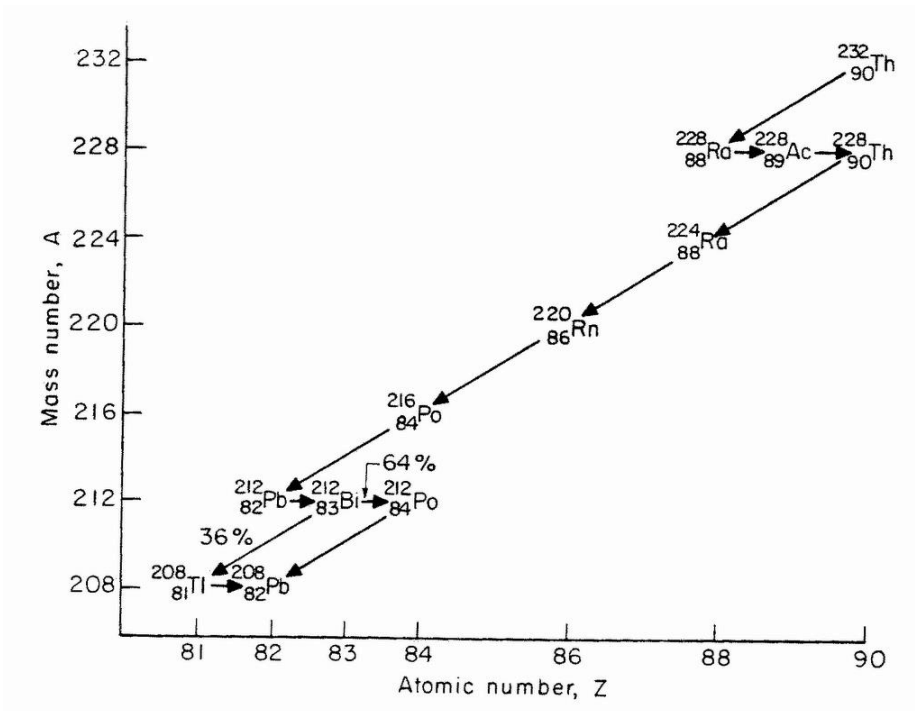
prirodi postoje tri prirodna radioaktivna niza, a rodonačelnici ta tri niza su elementi  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  i  $^{232}\text{Th}$ . U sva tri prirodna radioaktivna niza je prisutan po jedan izotop radona, a nizovi se završavaju jednim od stabilnih izotopa olova:

- $^{238}\text{U}$  - uranijumski niz – sastoji se od 14 radionuklida predvođenih rodonačelnikom  $^{238}\text{U}$  sa periodom poluraspada od  $4,51 \times 10^9$  godina, a krajnji produkt niza je izotop olova  $^{206}\text{Pb}$  (Slika 2.1). Uranijum je sveprisutan u prirodi i može se naći u određenoj meri u većini stena i zemljišta. Stoga su i njegovi potomci torijum ( $^{234}\text{Th}$  i  $^{230}\text{Th}$ ) i radijum ( $^{226}\text{Ra}$ ) takođe prisutni u većini stena i zemljišta. U prirodnom uranijumu zastupljenost izotopa  $^{238}\text{U}$  je 99,275%, a izotopa  $^{235}\text{U}$  je 0,72% (“Uranium Isotopes,” 2018). Radon ( $^{222}\text{Rn}$ ) međutim ima drugačiju prirodu, on spada u kategoriju gasova i vrlo lako može da migrira od svog pretka  $^{226}\text{Ra}$ . Migriranjem on dospeva u okruženje i sa svojim kratkoživećim potomcima formira podgrupu uranijumovog radioaktivnog niza. Kratkoživeći potomci radona su polonijum  $^{218}\text{Po}$ , olovo  $^{214}\text{Pb}$ , bizmut  $^{214}\text{Bi}$  i polonijum  $^{214}\text{Po}$ , koji se još nazivaju i radonski potomci. Poslednji element u ovoj podgrupi je olovo  $^{210}\text{Pb}$  sa periodom poluraspada od 22 godine.
- $^{232}\text{Th}$  - torijumski niz – sastoji se od 11 radioaktivnih elemenata sa  $^{232}\text{Th}$  kao rodonačelnikom (Slika 2.2). Period poluraspada torijuma je  $1,41 \times 10^{10}$  godina. Gotovo svi potomci u nizu su kratkoživeći (najduži period poluraspada je za  $^{228}\text{Ra}$  i iznosi 5,75 godina), tako da se nalaze u sekularnoj ravnoteži sa  $^{232}\text{Th}$ . U torijumovom nizu javlja se radonov izotop  $^{220}\text{Rn}$  poznatiji kao gas toron. Suprotno radonu, toron ima kratak period poluraspada od svega 55,8 sekundi. Toron se dalje raspada u polonijum  $^{216}\text{Po}$  ( $T_{1/2} = 0,15\text{s}$ ) koji sa toronom stupa u sekularnu ravnotežu. Sledeći element u nizu je olovo  $^{212}\text{Pb}$  ( $T_{1/2} = 10,64\text{ h}$ ) koji ne može zbog svog velikog perioda poluraspada da obrazuje sekularnu ravnotežu sa toronom, međutim njegov potomak bizmut  $^{212}\text{Bi}$  ( $T_{1/2} = 60,6\text{ min}$ ) sa njim ostvaruje prelaznu ravnotežu.
- $^{235}\text{U}$  - aktinijumski niz - predvođen je elementom  $^{235}\text{U}$  sa periodom poluraspada od  $7,1 \times 10^8$  godina i sastoji se od ukupno 11 radionuklida. Svi potomci elementa  $^{235}\text{U}$  su u sekularnoj ravnoteži.  $^{235}\text{U}$  se u prirodi nalazi u mnogo manjem procentu nego izotopi  $^{234}\text{U}$  i  $^{238}\text{U}$ , te je stoga i prisustvo radonovog izotopa  $^{219}\text{Rn}$  (poznatijeg kao aktinon), koji je član aktinijumskog niza, zanemarljivo.





Slika 2.1.  $^{238}\text{U}$  shema raspada (“Denaturing Thorium with Ionium – Energy From Thorium,”)



Slika 2.2.  $^{232}\text{Th}$  shema raspada (“Denaturing Thorium with Ionium – Energy From Thorium,”)

## 2.6. Dozimetrijske veličine i jedinice

Osnovna dozimetrijska veličina koja se koristi za kvantitativnu ocenu izlaganja nekog tela određenoj količini zračenja je **apsorbovana doza**,  $D$ , odnosno energija koja će se predati kilogramu neke materije. Jedinica apsorbovane doze je  $J / kg$ , odnosno grej, [Gy].

Biološki efekti po jedinici apsorbovane doze jako zavise od vrste zračenja i dela tela ili organa koji je izložen zračenju, i iz tog razloga uvode se otežane dozimetrijske veličine.

**Ekvivalentna doza**,  $H_T$ , predstavlja srednju apsorbovanu dozu u tkivu ili organu  $T$ , modifikovanu za otežani radijacioni faktor  $W_R$ :

$$H_T = \sum_T W_R D_{T,R}, \quad (2.4)$$

gde je  $D_{T,R}$  srednja apsorbovana doza u tkivu ili organu  $T$  usled vrste zračenja  $R$ . Jedinica ekvivalentne doze je  $J/kg$ , odnosno Sivert [Sv]. Vrednost radijacionog faktora  $W_R$  varira u opsegu od 1 do 20, zavisno od vrste zračenja. Za fotone, elektrone i mione radijacioni faktor ima vrednost 1, za alfa čestice, fisione fragmente i teška jezgra taj faktor je 20, a za neutrone, zavisno od njihove energije, faktor može da uzima vrednosti 5, 10 ili 20.

**Efektivna doza**,  $E$ , predstavlja zbir otežanih ekvivalentnih doza u svim tkivima i organima ljudskog tela. Matematički se predstavlja sledećom jednačinom:

$$E = \sum_T W_T \sum_R W_R D_{T,R}, \quad (2.5)$$

gde je  $W_T$  otežani faktor za tkivo  $T$ . Efektivna doza takođe ima energijsku jedinicu  $J / kg$ , a poznatija je po jedinici Sivert [Sv]. Vrednost  $W_T$  uzima vrednosti od 0,01 do 0,20 zavisno od toga na koje tkivo se odnosi. Najmanju vrednost faktora ima koža i površina kosti, a najveća vredost pripisuje se gonadama (UNSCEAR, 2000).

**Ambijentalni dozni ekvivalent**,  $H^*(10)$ , je operativna dozimetrijska veličina koja se koristi za karakterizaciju polja u okolini izvora zračenja.  $H^*(10)$  u tački od interesa u stvarnom polju zračenja predstavlja ekvivalent doze koji bi se stvorio u povezanom orijentisanom i ekspaniranom polju zračenja na dubini od 10 mm na radijusu sfere

prečnika 30 cm, gustine  $1 \text{ g/cm}^3$  i sastava 76,2 % O + 11,1 % C + 10,1 % H + 2,6 % N, koja je usmerena suprotno od smera incidentnog zračenja. Orijentisano i prošireno polje zračenja je idealno polje zračenja koje se širi i u kojem je zračenje dodatno orijentisano u jednom smeru (“Ambient Dose Equivalent”).

### 3. Ponašanje gasovitih radioaktivnih elemenata - radona ( $^{220}\text{Rn}$ ) i torona ( $^{222}\text{Rn}$ )

Radon je prirodni radioaktivni hemijski element i spada u grupu inertnih plemenitih gasova. U prirodi se pojavljuju tri izotopa radona i sva tri su radioaktivna ( $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{220}\text{Rn}$  i  $^{219}\text{Rn}$ ). Radon je najmasivniji plemeniti gas sa svojih 86 protona i 136 neutrona. Pored radona, koji je deo uranijumovog radioaktivnog niza ( $^{238}\text{U}$ ), veliki deo izlaganja prirodnim izvorima radioaktivnosti upravo potiče od udisanja kratkoživećih produkata raspada radona ( $^{222}\text{Rn}$ ) i torona ( $^{220}\text{Rn}$ ) koji su prisutni u atmosferi i u vazduhu nekih zatvorenih prostorija (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 2000).

Radon i toron najčešće se nalaze u zemljištu i stenama. Prisustvo torona usled njegovog kratkog perioda poluraspada (55,8 s) najčešće je samo u blizini izvora, dok je kod radona situacija drugačija, njegov period poluraspada je 3,8 dana te se on može javiti i na mestima udaljenijim od izvora radona. Međutim, radonovi i toronovi potomci imaju duže periode poluraspada te se njihovo prisustvo može definisati i na mestima koja su udaljenija od samog izvora. Radonovi najznačajniji potomci  $^{214}\text{Pb}$  i  $^{214}\text{Bi}$  imaju periode poluraspada 26,8 min i 19,9 min, respektivno, a toronovi potomci  $^{212}\text{Pb}$  i  $^{212}\text{Bi}$  imaju periode poluraspada od 10,64 h i 60,6 min, respektivno. Na osnovu ovoga možemo izvesti zaključak da toronovi potomci ostaju prisutni u okolini duži vremenski period, te je njihovo prisustvo i na mestima udaljenijim od samog toronskog izvora opravdano.

Kod radnika u rudniku Schneeberg krajem XIX veka, primećen je veliki broj kancera pluća kod rudara. Tek nakon 45 godina od prvobitnih zapažanja Ludewig i Lorenzer iznose zaključak da je visoka incidenca kancera pluća uzrokovana prisustvom visoke koncentracije radona u rudniku koja iznosi između  $10^3$  i  $5 \times 10^4$  Bq/m<sup>3</sup>. Nakon njihovih zapažanja bilo je potrebno oko 30 godina da grupa naučnika 1956. godine otkrije da je zapravo pravi uzrok visoke doze koju primaju pluća, udisanje kratkoživećih radonovih potomaka  $^{210}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Pb}$  i  $^{214}\text{Bi}$  (Porstendörfer, 1994).

Ovaj zaključak zapravo otvara vrata istorije uticaja radonovih potomaka na okolinu. Kao i za radon i njegove potomke, situacija je slična i za toron i njegove potomke. Zvanično otkriće radona vezuje se za 1900. godinu kada ga je identifikovao Fridrih Ernst Dorn i nazvao ga *niton*, što je izvedeno od reči nitens što znači sijati. Tek 1923. godine radon dobija svoje sadašnje ime. Izotopi radona, toron i aktinon otkriveni su 1898. zaslugama Radeforda i Ovensa.

### 3.1. Fizičke i hemijske osobine radona i torona

Većina elemenata koji pripadaju jednom od tri prirodna radioaktivna niza su u čvrstom stanju, dok je situacija sa radonom i njegovim izotopima drugačija. Radon je inertan, lako emigrirajući radioaktivni gas. Radon i njegovi izotopi nastaju alfa raspadom radijumovih izotopa  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{224}\text{Ra}$  i  $^{223}\text{Ra}$  u stenama i mineralima, koji su članovi  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  i  $^{232}\text{Th}$  nizova, respektivno. Zastupljenost radona na Zemlji je velika i može se naći na svim mestima gde je prisutan radijum. Spada u kategoriju plamenitih gasova, bez mirisa, bez ukusa i boje, i najteži je među njima sa atomskim brojem 86, relativnom atomskom masom 222 i gustinom od  $0,73 \text{ kg/m}^3$ . Temperatura topljenja je  $-71^\circ\text{C}$ , a temperatura ključanja je na  $-61,7^\circ\text{C}$  ("Radon - Element information, properties and uses | Periodic Table,"). Kritična temperatura i pritisak radona su  $105^\circ\text{C}$  i 62 atm (6282150 Pa), respektivno. Svoj prvobitni naziv *nitens* dobio je zbog osobine da na temperaturama ispod tačke topljenja emituje svetlost, sija. Boja kojom sija menja se od žute do narandžaste kako se smanjuje njegova temperatura. Relativne atomske mase radonovih izotopa iznose:  $^{222}\text{Rn}$  - 222.018,  $^{220}\text{Rn}$  - 220.011 i  $^{219}\text{Rn}$  - 219.0095. Elektronska konfiguracija radona je  $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2 3d^{10} 4p^6 5s^2 4d^{10} 5p^6 6s^2 4f^{14} 5d^{10} 6p^6$ , elektroni u spoljašnjoj ljusci su čvrsto vezani te je energija jonizacije viša i iznosi 10,75 eV (1037 kJ/mol). Rastvorljiv je u vodi ( $230 \text{ cm}^3/\text{kg}$ - na  $20^\circ\text{C}$ ) ("Chapter 3 Chemistry and Physics of Radon," 1990), te je stoga njegovo prisustvo u podzemnim vodama često. Rastvorljivost mu opada sa porastom temperature. Koncentracije radona u vazduhu najčešće se izražavaju u jedinicama  $\text{Bq/m}^3$ .

## **3.2. Pokretljivost radona i torona**

### **3.2.1. Izvori radona i torona**

Do sada smo već pomenuli da su dominantni izvori radona i torona stene (rude) i zemljište. Pored toga izvor može da bude i bilo koja voda (podzemna ili nadzemna). Radona i torona biće na svim onim mestima gde u blizini ima radijuma, a on zavisi od koncentracije uranijuma i torijuma. Studije ukazuju da se radon primarno oslobađa iz zemljišta i da oko 10% ekshalira u atmosferu (Vogiannis and Nikolopoulos, 2015). Najveće koncentracije radona beleže se u rudnim ležištima, magmatskim i granitnim stenama, glinama. Radon i toron dakle nastaju u zemljinoj kori i kroz razne slojeve zemljišta migriraju do površine zemlje i dalje nastavljaju svoj put do atmosfere. Zastupljenost radijuma zavisi od tipa i geomorfoloških osobina zemljišta, a pokretljivost radona i torona kroz zemljište zavisi od pukotina, pora u zemlji, poroznosti, veličine čestica i prisustva vode tj. vlage.

Pored zemlje, izvor radona može biti i građevinski materijal. Veliki broj građevinskih materijala nastaje preradom stena poreklom iz zemlje, te je stoga moguće prisustvo radijuma u građevinskim materijalima, a samim tim može doći i do oslobađanja radona i torona iz njih. Glavni izvor torona u zatvorenim prostorijama je upravo građevinski materijal koji je napravljen od sirovine koja ima povišenu vrednost torijuma. Toron dospeva i iz zemlje, ali pošto ima kratak period poluraspada, dok migrira iz zemlje on se u velikoj meri raspada.

### **3.2.2. Migracija – difuzija i advekcija**

Koncentracija radona i torona u zemljištu je oko  $10^3$ - $10^4$  puta veća nego u atmosferi, te se stoga može definisati gradijent koncentracije između zemljišta i vazduha u zatvorenoj prostoriji (indoor air). Gradijent se stalno održava proizvodnjom potomaka iz uranijumovog i torijumovog niza i odgovoran je za kontinualan fluks radonovih izotopa. Proizvodnja i migracija radona i torona do vazduha zatvorenih prostorija zavisi od nekoliko parametara: koncentracije izotopa radijuma ( $^{226}\text{Ra}$  i  $^{224}\text{Ra}$ ) u zemljištu i materijalu, mehanizma migracije kroz poroznu zapreminu i načina na koji se novoformirani atomi radona i torona oslobađaju iz čvrstih minerala i dospevaju u pore zemljišta (proces emanacije).

Primarni mehanizam transporta (migracije) radona i torona u nekom medijumu, pre nego što se raspadnu, dešava se putem kretanja molekula. Kao i svaka fluidna supstanca i ovde postoji tendencija kretanja atoma radona i torona u pravcu opadanja gradijenta koncentracije. Ovakvo ponašanje, difuziju, opisuje Fikov zakon koji povezuje gustinu fluksa fluida sa gradijentom koncentracije. Koeficijent koji povezuje ove parametre naziva se difuzioni koeficijent  $D_e$ , i izražava se u jedinicama  $m^2s^{-1}$ . Prema Fikovom zakonu difuzivna gustina fluksa aktivnosti radona ili torona po jedinici površine pore izražava se kao:

$$\vec{j}d = -D_e \vec{\nabla}C, \quad (3.1)$$

gde  $C$  predstavlja međupornu (međuprostornu) koncentraciju radona ili torona. Znak minus ispred difuzionog koeficijenta posledica je toga što se difuzija vrši u pravcu opadanja gradijenta koncentracije.

Oko 90 % radona koji putem difuzije napušta mesto radonskog izvora će se raspasti nakon pređenih 5 m u vodi, 2 m u peskovitom zemljištu i oko 5 m u vazduhu (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 2000). Rastojanja koja toron prelazi difuzijom su mnogo kraća zbog njegovog vrlo kratkog perioda poluraspada.

Još jedan od načina transporta radona je i advekcija. Ona se javlja kada postoji gradijent pritiska u fluidima koji se prostiru kroz pore i pukotine u zemljištu. Odnosno, ukoliko fluid ima dovoljno malu vrednost Rejnoldsovog broja, kao što je slučaj kod transporta radona i torona kroz zemljište ili građevinski materijal, može se uspostaviti laminaran tok usled postojanja gradijenta pritiska. Gradijent u pritisku primarno nastaje zbog promene u meteorološkim uslovima, a može da se javi i zbog upotrebe ventilacionih ili klimatizacionih sistema u zatvorenim prostorijama. Ovakav konvektivni protok može da se okarakteriše Darsijevim zakonom koji povezuje brzinu fluidnog toka kroz poprečni presek neke površine sa gradijentom pritiska,  $\vec{\nabla}P$  :

$$\vec{q} = -\frac{k}{\mu} \vec{\nabla}P, \quad (3.2)$$

gde je  $\vec{q}$  [m/s] Darsijev vektor brzine,  $k$  [ $m^2$ ] unutrašnja permeabilnost gasa,  $P$  pritisak u [Pa] i  $\mu$  predstavlja koeficijent dinamičke viskoznosti gasa.

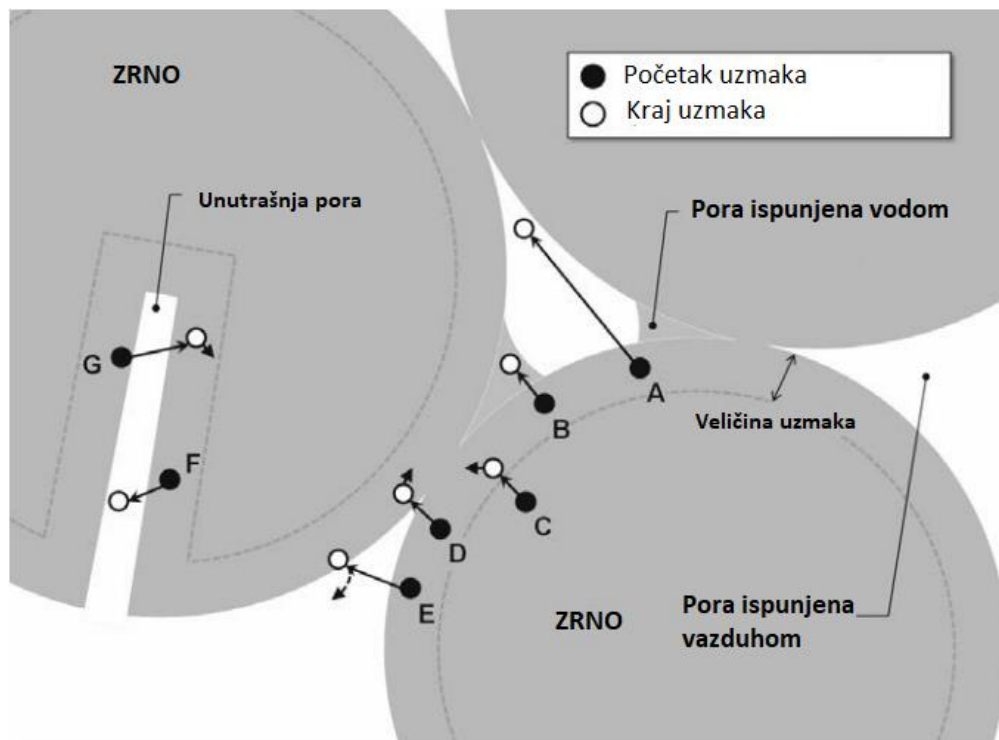
### 3.2.3. Emanacija i ekshalacija

Emanacija se definiše kao proces u kome radionuklid napušta stene, minerale ili zemljište i ispunjava pukotine između njih, ispunjenje vazduhom (ili vodom). Ekshalacija je proces u kome se tako oslobođen radionuklid transportuje do površine zemlje i dalje u atmosferu. Koeficijent emanacije radona i torona definiše se kao njihova sposobnost da se oslobode iz zemljišta ili nekog drugog (poroznog) materijala, odnosno, odnos broja oslobođenih atoma u odnosu na broj novonastalih atoma radona ili torona.

Emanacija je zasnovana na procesu difuzije i uzmarka radionuklida i odnosi se na proces raspada koji se dešava unutar zrna nekog materijala. Jezgra  $^{226}\text{Ra}$  i  $^{224}\text{Ra}$  kada se raspadaju nastaje alfa čestica i  $^{222}\text{Rn}$  odnosno  $^{220}\text{Rn}$ , sa energijama od 86 keV i 103 keV, respektivno. Takav novoformirani atom radona ili torona usled zakona održanja impulsa doživljava uzmak u suprotnom smeru i može da doživi jedan od sledeća tri scenarija: da se tako uzmaknuti atom pomeri unutar zrna minerala, da usled uzmarka dođe do oslobađanja atoma iz zrna minerala i da se zaustavi u pukotini između zrna, ili da uzmakom atom radona ili torona pređe iz jednog zrna u drugo (najmanje verovatan proces) (Slika 3.1.). Proces u kome se atom novoformiranog radona ili torona usled uzmarka nađe u međuprostoru ispunjenom fluidom, predstavlja njegovo oslobađanje, odnosno emanaciju.

Na proces emanacije utiče mnogo faktora kao što su: relativna vlažnost materijala, temperatura, oblik zrna, raspoređenost radijuma unutar pojedinačnog zrna, zapremina i slobodna površina zrna, broj i veličina pora. Kod zrna koja imaju veću slobodnu površinu koeficijent emanacije je veći u odnosu na ona zrna koja imaju veću zapreminu, a manju slobodnu površinu. Koncentracija atoma radona i torona koji se mogu naći u pukotinama između zrna materijala je veća ukoliko je vlaga u zemljištu veća, ovo je posledica toga što je rastojanje koje atom pređe usled uzmarka u vodi manje u odnosu na rastojanje koje bi prešao u vazduhu, te je stoga malo verovatno da će dospeti u zapreminu nekog drugog obližnjeg zrna materijala. Rastojanje koje usled uzmarka atomi radona i torona pređu u vodi iznose  $\sim 723 \text{ \AA}$  i  $\sim 807 \text{ \AA}$ , respektivno. Dok su ta rastojanja u vazduhu  $\sim 65 \text{ \mu m}$  i  $\sim 76 \text{ \mu m}$  (Nero and Nazaroff, 1988).



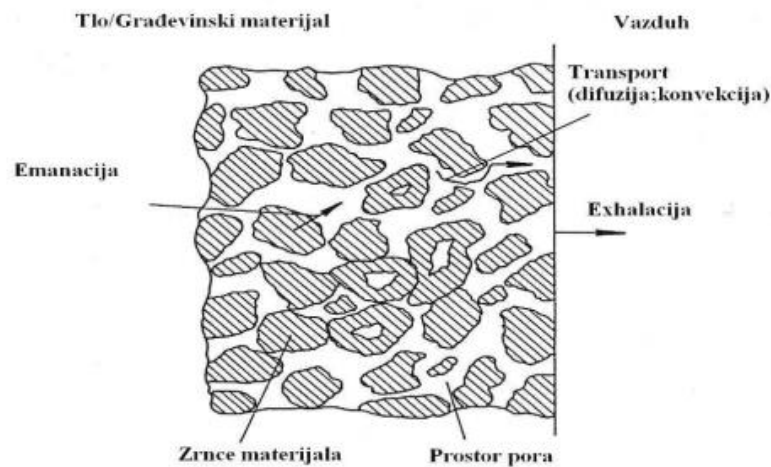


Slika 3.1. Prikaz mogućih stanja koje može da doživi uzmarknuto jezgro, A,B,F da usled uzmarka pređe u prostor pukotine ispunjen fluidom, C,G da usled uzmarka ostane unutar istog zrna ili da D, E usled uzmarka pređe u susedno zrno materijala. (Ishimori, Y., Lange, K., Martin, P., Mayya, Y.S., Phaneuf, 2013)

Kao što je do sada već pomenuto, ekshalacija predstavlja proces u kome se radionuklid, koji je prethodno procesom emanacije napustio zrno materijala koje sadrži radijum, oslobađa u atmosferu. Poznata su dva kvantitativna opisa ekshalacije, a to su površinska i masena ekshalacija. Površinska ekshalacija se definiše kao količina aktivnosti koja se oslobodi po jedinici površine nekog materijala u jedinici vremena [ $\text{Bq m}^2 \text{s}^{-1}$ ], a masena ekshalacija se definiše kao oslobođena aktivnost po jedinici mase u jedinici vremena [ $\text{Bq kg s}^{-1}$ ].

Mnogo faktora utiče na ekshalaciju radona i torona: veličina zrna zemljišta, vlažnost, razlika u pritisku, temperatura, poroznost itd. Zemljište koje sadrži mali procenat vlage ima veću vrednost ekshalacije u odnosu na potpuno suvo zemljište, međutim ukoliko vlaga pređe preko 8 % dolazi do smanjenja ekshalacije. Ta pojava objašnjava se time što se povećava procenat vode u porama, a voda nepovoljno utiče na koeficijent difuzije. Povećanje temperature zemljišta utiče na povećanje ekshalacije. Ukoliko se javi razlika u pritisku sa slobodne površine zemljišta u odnosu na dublje slojeve, dolazi do porasta

ekshalacije. Proces od emanacije, preko transporta pa do ekshalacije radona ili torona iz zemljišta ili građevinskog materijala prikazan je na slici 3.2.

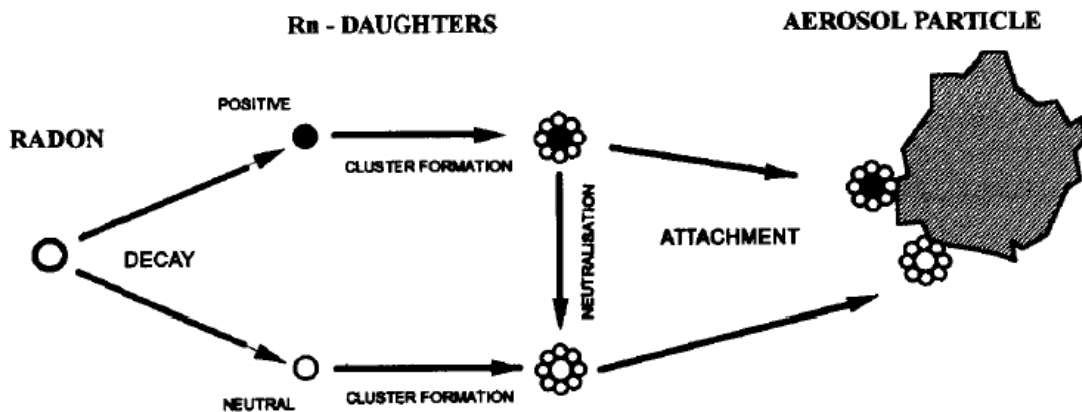


Slika 3.2. Prikaz procesa ekshalacije iz zemljišta (tla) ili građevinskog materijala. Od emanacije radona i torona iz zrna materijala u pukotine ispunjene fluidom preko procesa transporta do same ekshalacije (Sabol and Weng, 1995).

### 3.3. Potomci radona i torona

Radon i toron nakon svog raspada formiraju izotope teških metala: polonijum ( $^{218}\text{Po}$ ,  $^{216}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Po}$  i  $^{212}\text{Po}$ ), olovo ( $^{214}\text{Pb}$  i  $^{212}\text{Pb}$ ) i bizmut ( $^{214}\text{Bi}$  i  $^{212}\text{Bi}$ ). Ovi izotopi su po prirodi hemijski vrlo aktivni, pozitivno su naelektrisani i mogu da se jave u pripojenoj i nepripojenoj formi u atmosferi. Veličina čestica ovih izotopa je ispod reda veličine mikrona, u atmosferi mogu da se pripoje česticama prašine (ili bilo kojim drugim aerosolima u vazduhu) i na taj način formiraju pripojene frakcije. Aerosoli predstavljaju skup tečnih ili čvrstih čestica koje su rasprostranjene po vazduhu. U ovom radu posmatrani su aerosoli u zatvorenim prostorijama. Njihova koncentracija zavisi od mnogo parametara kao što su, koncentracija aerosola u okolini, ventilacija, kuvanje, duvanski dim i klimatski uslovi u prostoriji (relativna vlaga). Pored pomenutog **pripajanja aerosolima**, potomci mogu da dožive i neke od sledećih procesa: **neutralizacija**, **taloženje (depozicija)** na bilo koju slobodnu površinu, **formiranje klastera** ili **radioaktivni raspad**. Ukoliko se čestice, bilo da su naelektrisane ili neutralne, ne pripoje za aerosole, formiraju nepripojenu frakciju (slobodni klasteri). Prikaz formiranja radioaktivnih aerosola prikazan je na slici 3.3. Ovakvi nepripojeni klasteri mogu slobodno da se spajaju sa drugim klasterima i da se na taj način povećavaju. Odnos pripojenih i nepripojenih

frakcija u nekoj zatvorenoj atmosferi zavisi od mnogo faktora. Prisustvo pripojenih formi biće veće u atmosferama koje su zagađenije aerosolima, suprotno tome u atmosferama koje su čiste, biće veliki broj neporiojenih jona teških metala. Tipična veličina nepripojenih frakcija iznosi oko 0,5-3 nm, a pripojenih od 50 do 1500 nm (Porstendörfer, 1994).



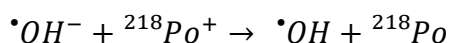
Slika 3.3. Ponašanje radonovih potomaka i formiranje pripojenih frakcija (Porstendörfer, 1994)

*Neutralizacija* je jedan od procesa kroz koji mogu da prođu potomci radona ili torona. Neutralizacija može da obuhvati i do nekoliko mehanizama (Hopke, 1989) zavisno od jonizacionog potencijala polonijuma i molekula gasa, koncentracije pretka i gasovitom okruženju (relativne vlažnosti vazduha, koncentracije i prirode negativnih jona u vazduhu). Mehanizmi koji opisuju neutralizaciju jona  $^{218}\text{Po}^+$  su:

- rekombinacija sa malim negativnim jonima vazduha, mehanizam kod koga se  $^{218}\text{Po}$  joni rekombinuju sa malim negativnim jonima kao što su elektroni. Prisustvo elektrona posledica je jonizacije vazduha usled alfa emisije (od radona i torona).

- neutralizacija posredstvom hemijske reakcije sa hidroksilom (OH), koji nastaje kao posledica radiolize vode. Hidroksil je dalje dobar akceptor elektrona sa afinitetom ka elektronu od 1,83 eV. Celokupna hemijska reakcija koja dovodi do neutralizacije pozitivnog jona  $^{218}\text{Po}^+$  je:





- razmena naelektrisanja sa neutralnim jonima vazduha predstavlja mehanizam neutralizacije putem otklanjanja elektrona prilikom sudara sa neutralnim molekulima. Ovaj mehanizam nije baš veoma čest pošto je jonizacioni potencijal polonijuma ~8,43 eV.

**Formiranje klastera** ili kondenzacija nukleacije, predstavlja proces inicijalnog formiranja čestica od prvobitne gasne faze. Čestica  ${}^{218}Po^+$  služi kao mesto za kondenzovanje vodene pare i može da raste spontano formirajući klaster polarnih molekula oko sebe kako bi formirala stabilne komplekse. Jonizovani klaster raste sve dok ne dostigne ravnotežu pri kojoj je broj molekula koji napuštaju klaster jednak broju molekula koji se na njega talože (kondenzuju). Dijametar klastera zavisi od prisustva vlage, a njegove dimenzije kreću se u opsegu od 1,3 nm do 2,3 nm (Nero and Nazaroff, 1988). Vreme za koje se formiraju klasteri kreće se najčešće u opsegu od  $5 \times 10^{-6}$  do  $5 \times 10^{-7}$  sekundi (Raes et al., 1985). Pošto je vreme za koje se formiraju klasteri vrlo kratko u odnosu na vreme koje je potrebno za proces neutralizacije, formiranje klastera se dešava pre neutralizacije.

**Taloženje (depozicija)** predstavlja proces u kome potomci radona ili torona, bilo da su u pripojenoj ili nepripojenoj fazi, imaju tendenciju da se talože na svim površinama koje se nalaze u neposrednom kontaktu sa vazduhom. Ovaj proces poznat je i pod terminom plate-out. Pošto je veličina aerosola u opsegu od 0,1  $\mu m$  do 10  $\mu m$  (Porstendörfer, 1994) oni imaju male difuzione koeficijente (od  $2 \times 10^{-8} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$  do  $7 \times 10^{-6} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ ) (Willeke and Baron, 1993). Brzina taloženja (depozicije) za potomke koji su pripojeni aerosolima je mnogo manja nego za one potomke koji su u nepripojenoj formi. Iz dostupne literature možemo videti da je brzina taloženja za nepripojene potomke reda veličine 0,1 cm/s, a za pripojene potomke reda veličine  $10^{-3}$  do  $10^{-4}$  cm/s.

### 3.4. Zdravstveni efekat

Radon je proglašen za drugi najznačajniji faktor rizika za nastanak raka pluća posle pušenja (Ting, 2010) i pripisuje mu se polovina od ukupnog izlaganja prirodnim izvorima zračenja (UNSCEAR, 2000). Najveći zdravstveni efekat na ljudski organizam imaju, zapravo radonski i toronski kratkoživeći potomci koji se u atmosferi nalaze kao

nepriposlane frakcije. Posebno je situacija značajna kod radonovih potomaka čiji su periodi poluraspada manji od 27 min i koji kada dospeju u organizam ostaju u njemu i raspadaju se pre nego što uspeju da ga napuste. Prilikom raspada emituju alfa čestice koje zbog svoje velike jonizacione moći vrše štetu na ćelijskom nivou. Iako alfa čestice imaju mali domet kada se nađu u plućima, izuzetno su opasne zbog velike moći jonizacije. Radioaktivni aerosoli dimenzija u opsegu od 0,1 nm do 10 nm najbolje se talože u plućima, dok se aerosoli većih dimenzija zadržavaju u nosu i usnoj duplji. Zid bronhija sastoji se od nekoliko slojeva: sloj sluzi (mucus), cilije i nakon sloja ispunjenog fluidima i tkivom nalazi se epitel sa slojem bazalnih i sekretornih ćelija. Bazalne i sekretorne ćelije najosetljivije su na zračenje (ICRP, 1994). Alfa čestica u takvoj sredini prolazi slojeve tkiva i izaziva jonizaciju atoma ćelija (koja se sastoji iz velikog broja atoma,  $\sim 10^9$ ), a svaka alfa čestica može da jonizuje i do nekoliko desetina hiljada atoma. Vrlo brzo nakon jonizacije, atom formira slobodne radikale koji reaguju sa biološki značajnim molekulima i izazivaju posledice u obliku hromozomskih aberacija, mutacija, onkogenih transformacija i dr.

#### **3.4.1. Spoljašnje ozračivanje**

Spoljašnje ozračivanje definiše se još i kao direktno ozračivanje. Ovakvo ozračivanje odnosi se na gama zračenje kojem je ljudsko telo izloženo od spolja. Najveći doprinos spoljašnjem ozračivanju je od gama zračenja, usled njegovog velikog dometa i velike prodorne moći. Alfa zračenje kroz vazduh može da putuje samo nekoliko centimetara, a čak i da se nađe u blizini tela biva zaustavljeno površinskim slojevima kože. Situacija sa beta zracima je malo opasnija, mogu da izazovu opekotine na koži ili da oštete oči, ali ipak u poređenju sa gama zracima je zanemarljiva. Veliki deo prirodnih radionuklida su gama emiteri i takvom gama zračenju možemo biti izloženi na otvorenom (outdoor) i u zatvorenom (indoor) prostoru. Ukoliko posmatramo zatvoreni prostor, gama zračenje potiče od radionuklida koji se nalaze u zemlji ili građevinskom materijalu. Ukoliko se ograničimo samo na radon, toron i njihove potomke, može se uočiti da su većina potomaka gama emiteri, te da na taj način doprinose spoljašnjem ozračivanju organizma. Procenjuje se da doza koju organizam primi na godišnjem nivou od izlaganja prirodnim radioaktivnim izvorima u zatvorenim prostorijama iznosi oko 0,41 mSv (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 2008).

### 3.4.2. Unutrašnje ozračivanje

Unutrašnje ozračivanje predstavlja proces u kome se radionuklidi unose u organizam putem inhalacije ili ingestije. Tako unešeni radionuklidi u ljudskom organizmu mogu da dožive raspad i na taj način vrše unutrašnje (interno) ozračivanje organizma posredstvom alfa, beta ili gama zračenja. Najveći uticaj na organizam ima upravo alfa zračenje, pošto ono predaje najveću energiju tkivu zbog velike jonizacione moći. Radionuklidi koji se nalaze u vazduhu imaju veći difuzioni koeficijent u odnosu na neke druge sredine i iz tog razloga mogu lako da prelaze velika rastojanja. Tako slobodni radionuklidi u vazduhu mogu putem inhalacije dospeti u plućno tkivo i tu se taložiti ili raspasti. Najprisutniji radionuklidi u vazduhu zatvorenih prostorija su radon, toron i njihovi potomci. Većina potomaka su alfa emiteri te je stoga njihov efekat na pluća veliki. Uticaj radona na unutrašnje ozračivanje odnosi se prevashodno na njegove kratkoživeće potomke  $^{218}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Pb}$ ,  $^{214}\text{Bi}$  i  $^{214}\text{Po}$ , a ne na sam radon pošto on ima period poluraspada od 3.8 dana i najverovatniji slučaj je da će se on izbaciti iz pluća i pre nego se raspadne (UNSCEAR, 2006). Drugi način da dođe do unutrašnjeg ozračivanja organizma jeste putem ingestije kroz hranu koju jedemo ili vodu koju pijemo. Izotopi radijuma  $^{228}\text{Ra}$  i  $^{226}\text{Ra}$  su rastvorljivi u vodi, te je stoga kontaminacija vode njima vrlo česta. Iz tako kontaminirane vode radon ili toron mogu da dospeju u organizam pijenjem ili udisanjem isparenja u slučaju da se takva voda koristi npr. kao voda za tuširanje. Ako bi se takva voda koristila za navodnjavanje biljaka, njihovom konzumacijom radionuklidi bi ingestijom dospeli u organizam.

Radionuklidi koji se prirodno nalaze u zemljištu mogu dospeti i u biljke koje se gaje u zemljištu. Takođe radionuklidi mogu da dospeju i u meso i ribu koju jedemo. Generalno sva hrana koju konzumiramo može sadržati radionuklide, odnosno izotope radijuma, koji su nama od interesa jer njegovim raspadom nastaju radon i toron. Ozračivanje ingestijom uzima najmanji doprinos ozračivanju organizma od prirodnih izvora radioaktivnosti (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 2000).

## 4. Radonski potencijal i problem radona i torona

### 4.1. Karakterizacija zagađenosti atmosfere radonovim i toronovim potomcima

Radijacioni rizik od radona i torona potiče zapravo od udisanja njihovih kratkoživećih potomaka. Povezivanje radijacionog rizika od radona, torona i njihovih potomaka bilo je moguće uvođenjem u upotrebu izvedenih veličina i jedinica koje ih opisuju.

Koncentracija potencijalne alfa energije, (**PAEC**- potential alfa energy concentration) kratkoživećih potomaka  $^{222}\text{Rn}$  i  $^{220}\text{Rn}$  predstavlja sumu svih alfa energija emitovanih tokom raspada dok se ne dostignu stabilni izotopi olova  $^{210}\text{Pb}$  i  $^{208}\text{Pb}$ , respektivno. Izražava se u jedinicama  $\text{J/m}^3$  ili WL (working level). Jedan WL odgovara PAEC-u kratkoživećih potomaka  $^{222}\text{Rn}$  i  $^{220}\text{Rn}$  koji su u sekularnoj ravnoteži sa radonom odnosno toronom, kao jezgrom pretkom, sa koncentracijom od  $3700 \text{ Bq/m}^3$  odnosno  $275 \text{ Bq/m}^3$ , respektivno. Pored WL u upotrebi je i WLM (working level month) koje predstavlja izlaganje radonu/toronu tokom jednog radnog meseca, odnosno 170 h.

Direktno merenje koncentracije svih kratkoživećih potomaka radona i torona je teško i ograničeno zbog brzog raspada nekih elemenata. Oni mogu da se procene uz pretpostavku da postoji ravnoteža između koncentracije radona/torona i njihovih potomaka u vazduhu. Faktor ravnoteže,  $F$ , definiše se kao odnos ravnotežne ekvivalentne koncentracije radona ili torona (EERC i EETC) i izmerene koncentracije radona/torona u vazduhu (UNSCEAR, 2000). Faktor ravnoteže definišemo matematički kao:

$$F = \frac{EERC}{C_{222Rn}} \text{ i } F = \frac{EETC}{C_{220Rn}}, \quad (4.1)$$

gde su  $C_{222Rn}$  i  $C_{220Rn}$  koncentracija radona ili torona, a EERC i EETC (ravnotežna ekvivalentna koncentracija radona i torona) (Clouvas et al., 2006):

$$EERC = 0,105 C_{Po} + 0,515 C_{Pb} + 0,308 C_{Bi} \quad \text{Radonovi potomci}$$

$$EETC = 0,913 C_{Pb} + 0,087 C_{Bi} . \quad \text{Toronovi potomci}$$

$C_{Po}$ ,  $C_{Pb}$ , i  $C_{Bi}$  odnose se na koncentracije  $^{218}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Pb}$  i  $^{214}\text{Bi}$  radonovih potomaka, respektivno, a  $C_{Pb}$  i  $C_{Bi}$  odnose se na  $^{212}\text{Pb}$  i  $^{212}\text{Bi}$  koncentracije toronovih potomaka, respektivno.

Veza između WL ( $\text{Bq}/\text{m}^3$ ) i PAEC data je sledećim relacijama (UNSCEAR, 2006):

$$1 \frac{\text{Bq}}{\text{m}^3} = 5,56 \times 10^{-9} \text{J}/\text{m}^3 = 2,7 \times 10^{-4} \text{WL} (^{222}\text{Rn}) \quad i$$

$$1 \frac{\text{Bq}}{\text{m}^3} = 7,6 \times 10^{-8} \text{J}/\text{m}^3 = 3,64 \times 10^{-3} \text{WL} (^{220}\text{Rn}) . \quad (4.2)$$

Preporučene vrednosti od strane UNSCEAR-a za faktore ravnoteže su 0,4 za radonsku ravnotežu i 0,02 za ravnotežu torona i njegovih potomaka. Vrednosti ravnotežnih faktora zavise od mnogo parametara okruženja i nisu nikad strogo definisane vrednosti. Pošto faktor ravnoteže figuriše u formuli za procenu godišnje efektivne doze od ihnalacije radona/torona, vrlo je značajno odrediti tačne vrednosti faktora ravnoteže u konkretnim slučajevima ispitivanja. Godišnja efektivna doza definiše se (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 2000):

$$Dose [nSv] = C_0 \cdot F \cdot D_{CF} \cdot O , \quad (4.3)$$

gde je  $C_0$  srednja godišnja koncentracija radona/torona u  $\text{Bq}/\text{m}^3$ ,  $D_{CF}$  konverzioni faktori za radon i toron, respektivno,  $F$  je faktor ravnoteže, a  $O$  je okupacioni faktor ( $O=7000$  h u zatvorenim prostorijama i  $O=1700$  h na otvorenom prostoru).

## 4.2. Pregled zakona (EU i Srbija)

Prvi zakon koji se odnosi na zaštitu stanovništva od radona pojavljuje se 1941. godine u SAD i u njemu je definisano maksimalno izlaganje radonu u radnom prostoru tokom radne nedelje (40 h) na  $370 \text{Bq}/\text{m}^3$  (Services, 2007). Zdravstveni efekat radona prepoznat je od strane vlasti i u Evropi još 1950. godine gde se pojavljuju prve smernice od strane ICRP koja daje preporuke oko zaštite od radona (ICRP. International Commission on



Radiological Protection, 1950). Toron i njegovi potomci pojavljuju se u literaturi još od 1959. godine ("Report of Committee II on permissible dose for internal radiation (1959)," 1960). Još od samog otkrića pa do danas, radon je u svetu prihvaćen kao opšti problem, i većina zemalja ima regulative i zakone koji propisuju referentne nivoe za koncentracije radona u vazduhu zatvorenih prostorija.

1990. godine komisija Evropske Unije donosi direktivu 90/143/Euratom (Council of the European Union, 1990) za zaštitu od izlaganja radonu u zatvorenim prostorijama (indoor). Glavne preporuke koje su donešene glase: Za postojeće objekte gornja granica prosečne godišnje koncentracije gasa radona iznosi  $400 \text{ Bq/m}^3$ . Za objekte koji će se graditi, prosečna godišnja koncentracija radona ne treba da pređe granicu od  $200 \text{ Bq/m}^3$ . 1993. godine ICRP 65 (Brenner, 1994) definiše granicu za dozu od  $10 \text{ mSv/y}$  na radnim mestima kao gornju granicu godišnje doze koja može da se primi od radona, i sve više od toga opravdano je za remedijaciju.

Poslednje preporuke EU koje se tiču radona izdate su 2013 godine. 2013/59/Euratom (The Council of the European Union, 2013) koja je zasnovana na ICRP 103 izveštaju (*ICRP Publication 103 The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*). Euratom direktiva primenjuje se u svim zemljama Evropske Unije i u njoj se preporučuje maksimalna granica za nacionalne referentne nivoe od  $300 \text{ Bq/m}^3$  za srednju godišnju koncentraciju radona u vazduhu zatvorenih prostorija. Takođe propisana je i maksimalna doza koju može da primi zaposleni na radnom mestu i ona iznosi  $6 \text{ mSv/y}$ . Takođe, preporučeno je uvođenje nacionalnih akcionih planova koji podrazumevaju sprovođenje obimnijih mera zaštite u identifikovanim radonu sklonim područjima ("radon prone areas").

U Srbiji je nedavno donet novi Zakon o radijacionoj i nuklearnoj sigurnosti i bezbednosti (Sl. gl. RS br. 95/18 i Sl. gl. RS br. 10/19) koji određuje Direktorat za radijacionu i nuklearnu sigurnost i bezbednost Srbije kao nadležno telo koje bliže propisuje referentni nivo koncentracije radona u zatvorenom prostoru u boravišnim prostorijama, referentni nivo koncentracije radona u zatvorenom prostoru na radnim mestima i odgovarajuće mere zaštite, mere za smanjenje koncentracije radona u postojećim objektima, kao i mere sprečavanja prodiranja radona u nove objekte. Pored zakona, na snazi su i pravilnici koji se tiču radona:

- ❖ Pravilnik o granicama izlaganja jonizujućim zračenjima i merenjima radi procene nivoa izlaganja jonizujućim zračenjima ("Sl. glasnik RS", br. 86/2011 i 50/2018). Izvod iz pravilnika glasi:
  - Član 35. Interventni nivo za hronična izlaganja radonu na radnom mestu jednak je srednjoj godišnjoj koncentraciji  $1000 \text{ Bq/m}^3 \text{ }^{222}\text{Rn}$  u vazduhu.
  - Član 40. Interventni nivoi za hronično izlaganje radonu u stanovima jednaki su godišnjoj prosečnoj koncentraciji od  $200 \text{ Bq/m}^3 \text{ }^{222}\text{Rn}$  u vazduhu u novoizgrađenim stambenim objektima, a  $400 \text{ Bq/m}^3 \text{ }^{222}\text{Rn}$  u vazduhu za postojeće stambene objekte.
- ❖ Pravilnik o granicama radioaktivne kontaminacije lica, radne i životne sredine i načinu sprovođenja dekontaminacije ("Sl. glasnik RS", br. 38/2011)
  - Član 6. Pri inhalaciji kratkoživećih potomaka radona ( $^{222}\text{Rn}$ ) i torona ( $^{220}\text{Rn}$ ) granice radioaktivne kontaminacije vazduha za profesionalno izložena lica izražavaju se kao granice izlaganja ukupnoj energiji emitovanih alfa čestica, odnosno mesečnog izlaganja radonu. Granice godišnjeg unošenja inhalacijom potomaka radona ( $^{222}\text{Rn}$ ) i potomaka torona ( $^{220}\text{Rn}$ ), za profesionalno izložena utvrđene su u Tabeli 3. koja je odštampana uz ovaj pravilnik i čini njegov sastavni deo. (Tabela iz zakona je prikazana u nastavku).

**Tabela 3. Granice unošenja i izlaganja za potomke radona i torona**

Veličina	Jedinica	Vrednost za potomke radona <sup>1)</sup>	Vrednost za potomke torona <sup>2)</sup>
Godišnji prosek tokom 5 godina			
Unošenje ukupne energije emitovanih alfa čestica	J	0,017	0,051
Izlaganje ukupnoj energiji emitovanih alfa čestica	$\text{J}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3}$	0,014	0,042
	WLM <sup>3)</sup>	4,0	12
Maksimum u pojedinačnoj godini			
Unošenje ukupne energije emitovanih alfa čestica	J	0,042	0,127
Izlaganje ukupnoj energiji emitovanih alfa čestica	$\text{J}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3}$	0,035	0,105
	WLM	10,0	30

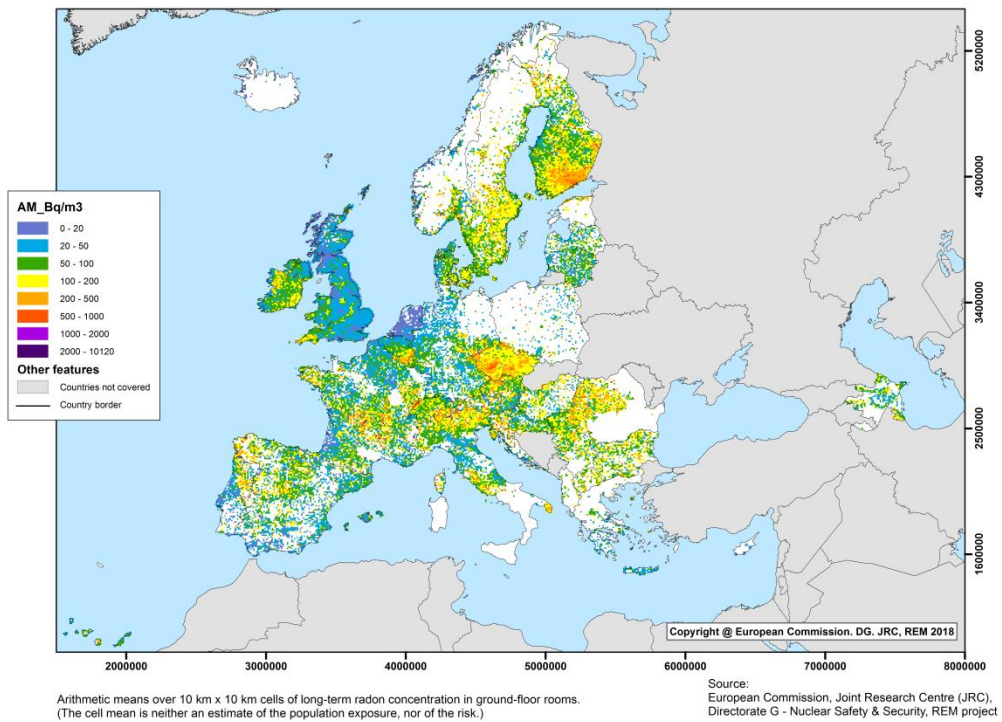
### 4.3. Radon u zatvorenim prostorijama kao radonski potencijal

Prisustvo radona u zatvorenim prostorijama najviše utiče na dozu koju primi stanovništvo od prirodnih izvora zračenja. Nedavna epidemiološka istraživanja su pokazala da rizik od radona postoji i pri koncentracijama za koja se ranije smatralo da su

zanemarive (WHO, 2009). Kako bi ograničili izlaganja i smanjili rizik od obolevanja stanovništva, većina država u Evropi uvodi razne regulative kako bi identifikovala i označila radonu sklona područja u državi. Radonu sklona područja definišu se kao geografski ili administrativni regioni u kojima je identifikovano da postoji veći broj kuća u kojima je izmerena koncentracija radona koja je značajno viša od nacionalnog referentnog nivoa. 2005. godine Joint Research Center (JRC) Evropske Komisije objedinjuje rezultate i metode dosadašnjih istraživanja radonu sklonih područja i daje zaključak da ne postoje dve iste metodologije kojima neke države vrše merenja i mapiranja. Mape koje su postojale nisu bile kompatibilne među državama. Vođeni time, 2006. godine JRC pokreće program na evropskom nivou u cilju izrade Evropskog atlasa prirodne radioaktivnosti koji će prvobitno imati za zadatak mapiranje indoor radona i izradu Evropske Indoor Radonske Mape (<https://rem.jrc.ec.europa.eu/RemWeb/>). Do danas toj mapi priključeno je 34 zemalja, uključujući i Srbiju.

Osnovni parametar bio je postaviti gridove veličine  $10 \times 10$  km i u njih ucrtavati srednje vrednosti za srednje godišnje koncentracije radona merene u zatvorenim prostorijama na prizemnom nivou. Srednje godišnje koncentracije se uzimaju iz razloga godišnjih varijacija koncentracija radona (koncentracije su najveće tokom jeseni i početkom zime, a najmanje tokom proleća) (Bathesda, 1988). Problem sa procenom godišnjih koncentracija javio se na onim mestima gde je merenje trajalo manje od godinu dana i u tim slučajevima pravili su se modeli sa sezonskim varijacijama i korekcionim faktori koji bi merenja od nekoliko meseci (najčešće tokom zimskog perioda) preveli u srednju godišnju koncentraciju. Preporučeni su standardi za merenje koncentracije radona koji podrazumevaju barem 3 - 5 merenja unutar grida  $10 \times 10$  km tehnikom trag detektora. Za svaki grid se računa aritmetička sredina i standardna devijacija i tek vrednosti se prenose programskim softverom u mapu. Poslednja verzija mape koja prikazuje srednje vrednosti koncentracije radona u prizemlju zatvorenih prostorija po gridovima prikazana je na slici 4.1.

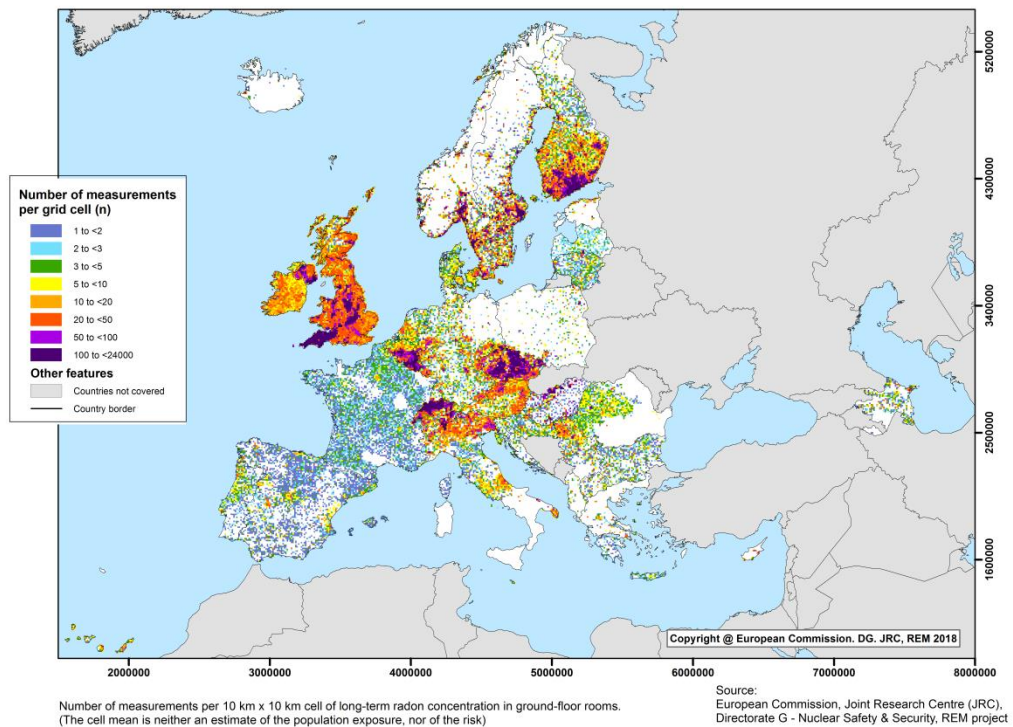
European Indoor Radon Map, March 2018



Slika 4.1. Srednje vrednosti gridova 10×10 km radonske koncentracije u prizemnim zatvorenim prostorijama (“Indoor-radon-concentration,”)

Još jedan od parametara pri izradi indoor mape jeste i gustina merenja po gridu, odnosno broj merenja po jednoj ćeliji veličine 10×10 km. Kao što možemo videti sa slike 4.2. broj merenja po gridu kao i pokrivenost teritorije dosta variraju između zemalja i između regiona unutar iste zemlje. Neke zemlje imaju pokrivenost gotovo 100 % dok su neke pokrivene jedva 20 %. Razlike su proistekle iz različitih nacionalnih strategija distribucije detektora, neke zemlje napravile su istraživanja koja su usmerena na homogenu teritorijalnu pokrivenost, neke su merenja vršila na osnovu naseljenosti, a neke su merenja usmerila ka već do tada poznatim radonu sklonim područjima (Tollefsen et al., 2014).

European Indoor Radon Map, March 2018



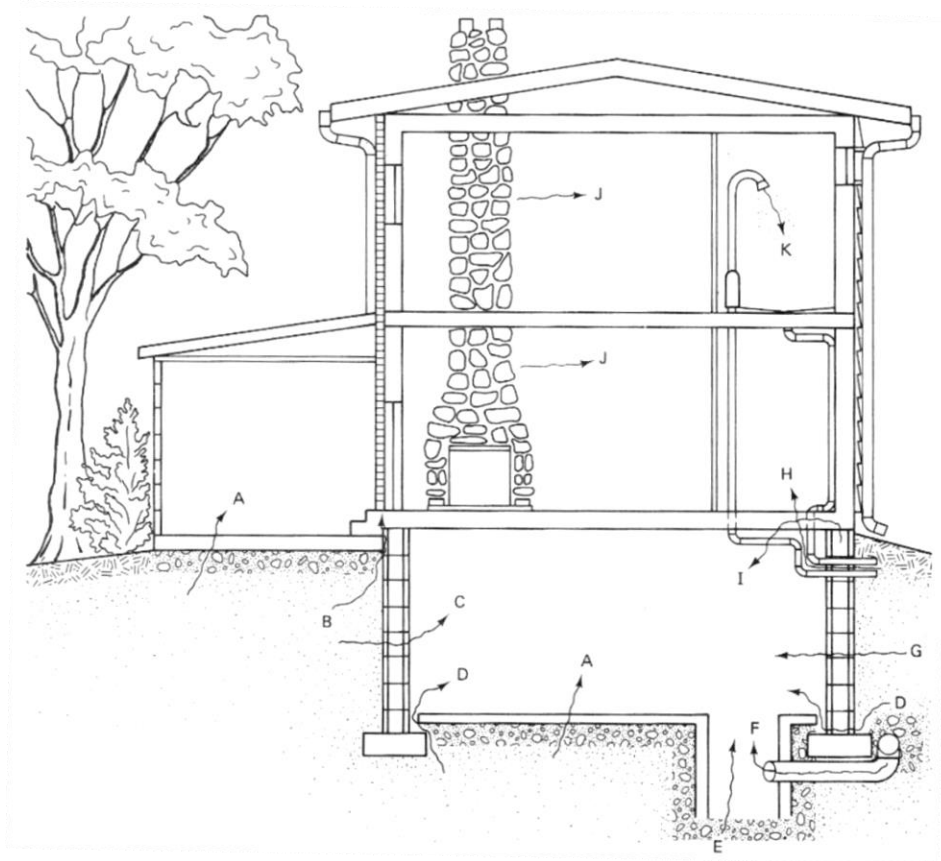
Slika 4.2..Broj merenja po gridu veličine 10×10 km (“Atlas-of-Natural-Radiation,”)

Prilikom izrade radonske mape u Srbiji u toku nacionalne kampanje merenja radona 2015/2016. godine, radonska grupa formirana od strane Agencije za zaštitu od jonizujućih zračenja i nuklearnu sigurnost Srbije koju su činile sve institucije u zemlji koje se bave naučnim istraživanjima radona, se odlučila za sledeću strategiju distribucije detektora (Udovičić et al., 2016):

- populacijski otežano merenje radona u zatvorenim prostorijama – na područjima gde je gustina stanovanja veća vršiti više merenja i
- geografski orijentisano merenje – težište merenja bilo bi da se pokrije što veći deo teritorije prethodno okarakterisan gridovima.

Ovakav pristup dao je dobru teritorijalnu pokrivenost, a na mestima gde je veća gustina stanovanja dao je preciznije podatke, jer su se merenja unutar jednog grida usrednjavala. U radonsku mapu Srbije ušli su i rezultati prvog radonskog mapiranja na području Vojvodine koje je sprovela Laboratorija za nuklearnu fiziku, Departmana za fiziku, PMF-a u Novom Sadu tokom tri uzastopne godine od 2002 - 2005. na oko 3000 lokacija (Forkapić et al., 2007; Pantelić et al., 2018).

Radon, a i toron, u zatvorene prostorije najčešće dospevaju ekshalacijom iz zemljišta ispod objekta ili ekshalacijom iz građevinskog materijala. Načini na koje radon i toron mogu dospeti u unutrašnjost jedne kuće šematski su prikazani na slici 4.3.



Slika 4.3. Putevi i načini na koji radon i toron dospevaju u unutrašnjost jednog stambenog objekta (Vogiannis and Nikolopoulos, 2015).

#### 4.4. Geogeni radonski potencijal

Poznato je da radon u zatvorenim prostorijama zavisi od geoloških faktora, tipa gradnje, navika ljudi koji borave, građevinskog materijala, i dr. U dva objekta koja se nalaze na istom geološkom području, a koja su različito građena, izmeriće se različite vrednosti koncentracija radona. Iz tog razloga, sledeći korak posle pravljenja radonske mape zatvorenih prostorija bio bi izrada geogene radonske mape. Geogena radonska mapa je direktno povezana sa ekshalacijom radona iz zemljišta u smislu radonskog potencijala. U Oslu 2008. godine održana je radionica gde je zapravo donešena odluka da se počne izrada Evropske Geogene Radonske Mape.

Geogena radonska mapa poslužila bi da se identifikuju područja gde bi se povišene koncentracije radona u zatvorenim prostorijama mogle očekivati zbog prirodnih razloga (Gruber et al., 2013). U takvim područjima bi trebalo prilikom gradnje samih objekata obratiti pažnju na dobru podnu izolaciju, i na taj način sprečiti da radon iz zemlje dospe u unutrašnje prostorije.

#### 4.4.1. Kvantifikacija geogenog radonskog potencijala

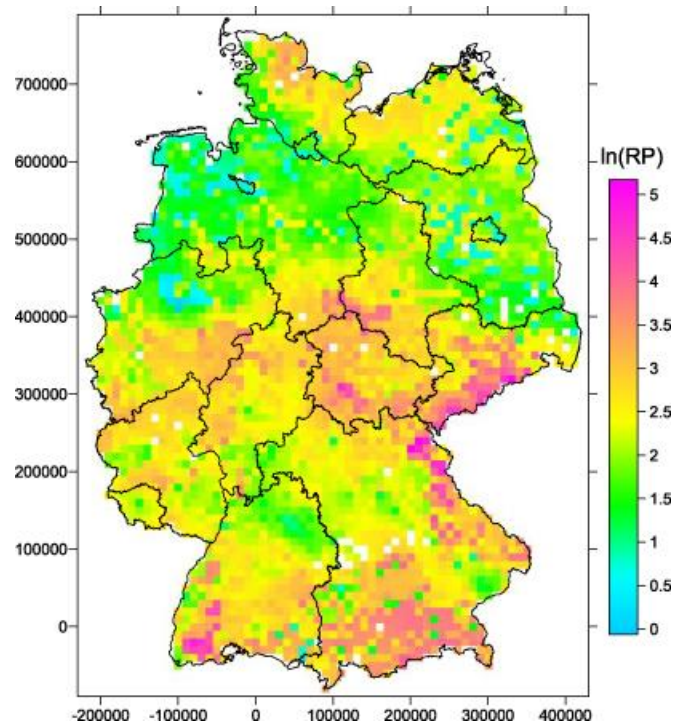
Postoji više koncepata definisanja geogenog radonskog potencijala (GRP) :

- Neznal tip radonskog potencijala daje kvantifikaciju na osnovu merenja radona u zemljištu na dubini između 75 cm i 100 cm i permeabilnosti zemljišta na istoj dubini. Matematički se izračunava pomoću sledeće formule:

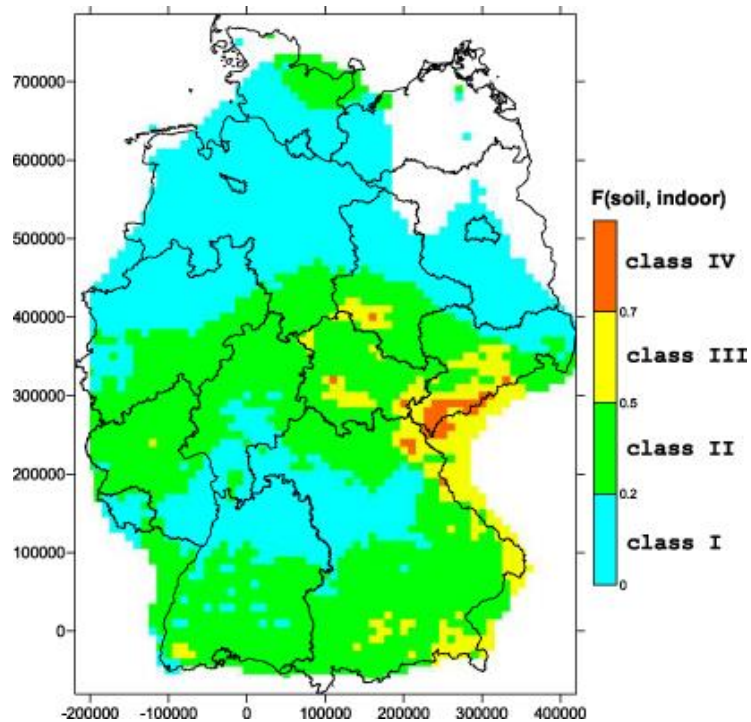
$$RP = C / (-_{10} \log k - 10) , \quad (4.4)$$

gde je C koncentracija radona u zemljištu ( $\text{kBq/m}^3$ ), a k je permeabilnost zemljišta za radon ( $\text{m}^2$ ). Primer prikaza geogenog radonskog potencijala u Nemačkoj određenog pomoću ovog metoda prikazan je na slici 4.4.

- Drugi način definisanja GRP predstavlja radonski indeks (RI) ili klasifikacioni tip radonskog indeksa, koji radonski potencijal definiše kroz 4 radonska indeksa, odnosno klase: I, II, III, IV. I predstavlja nizak, a IV visok RP. RI određuje se na osnovu merenja permeabilnosti i koncentracije radona u zemljištu (I. Barnet, P. Pacherova, 2008a). Merene vrednosti klasifikuju se od niskih do visokih i onda se RI određuje na sledeći način, primer: (visoka koncentracija  $R_n$  u zemljištu)  $\times$  (niska permeabilnost) = srednji RI: Klasifikacioni radonski indeks može da se računa i na osnovu drugih parametara, npr, kombinacija radonske koncentracije u zemljištu i koncentracije radona u zatvorenim prostorijama (slika 4.5.). Permeabilnost zemljišta može se odrediti i na osnovu glanulometrijskog sastava zemljišta, odnosno na osnovu udela fine frakcije (procenta prisustva čestica veličine manje od  $65 \mu\text{m}$ ) u ukupnoj raspodeli veličina čestica određenog zemljišta.



Slika 4.4. Mapa Neznal tipa radonskog potencijala u Nemačkoj (Gruber et al., 2013)



Slika 4.5. Klasifikacioni tip radonskog indeksa Nemačke, računat na osnovu radona u zemljištu i koncentracija radona u zatvorenim prostorijama (Gruber et al., 2013)

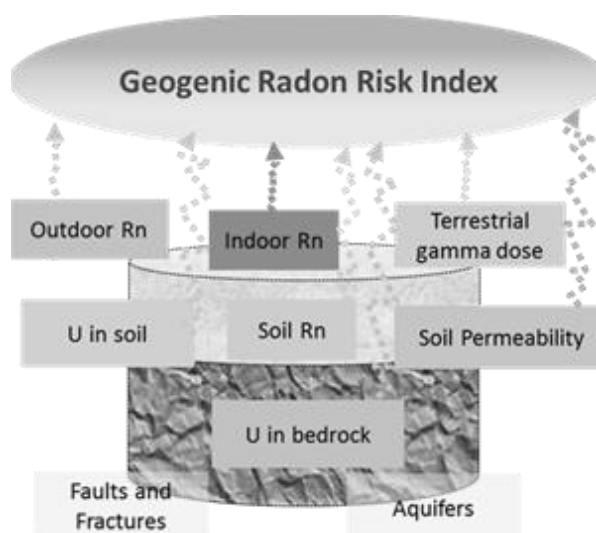


## 4.5. Sledeći koraci u definisanju radonskog potencijala

Prvobitne radonske mape davale su vrlo grubu ocenu radonskog potencijala zato što se radonski potencijal definisao na osnovu broja povišenih koncentracija radona (iznad  $200 \text{ Bq/m}^3$ ) u okviru 1000 merenja u zatvorenim prostorijama. Nakon toga u procenu radonskog potencijala uvedena je i koncentracija radona u zemljištu, koja je kombinovana sa permeabilnošću zemlje i koncentracijom radona u zatvorenim prostorijama. Na taj način dobila se kompleksnija slika radonskog potencijala. Priroda ponašanja radona je vrlo kompleksna i zavisi od mnogo faktora, te bi sledeći logičan korak pri definisanju radonskog potencijala bio definisanje više parametara koji bi zajedno definisali radonski potencijal nekog područja. Osnovna podela parametara bila bi na antropogene i prirodne.

Evropski Atlas prirodne radioaktivnosti pokrenuo je merenja više faktora koji bi na kraju definisali geogeni radonski indeks. Prirodni parametri koji bi trebali da uđu u procenu geogenog radonskog indeksa bili bi (slika 4.6.): koncentracija radona u vazduhu, koncentracija radona u zatvorenim prostorijama, gama zračenje zemljišta, poroznost zemljišta, radon u zemljištu, koncentracija uranijuma u zemljištu, koncentracija uranijuma u stenama u dubini i geološki parametri kao što su prisustvo pukotina i šupljina, podzemne vode i sl.

Pored pomenutih parametara, ako bi trebao da se proceni radonski rizik za pojedinačnu kuću, u razmatranje bi trebalo uvrstiti i antropogene i meteorološke parametre. Antropogeni parametri bili bi: tip gradnja, građevinski materijal, izolacija, navike ukućana, itd.



Slika 4.6. Šematski prikaz faktora koji bi definisali geogeni radonski index (“European Atlas of Natural Radiation, Geogenic radon,”).

Ono što do sada nije razmatrano, a što svakako, na osnovu merenja na terenu, utiče na ukupnu dozu koju primi čovek od prirodnih izvora u nekom stambenom objektu jeste prisustvo torona i toronovih potomaka. Toron i potomci pronalaze se u određenoj meri u većini objekata, u nekim slučajevima koncentracije torona veće su od koncentracije radona, te bi njihovo prisustvo svakako trebalo da uđe u budućnosti u procenu radonskog potencijala. Toron je radonov izotop i svakako bi zajedno sa njim mogla da se vrši procena radonskog potencijala. Jedna od smernica bila bi da se pored gore definisanih prirodnih parametara koji utiču na procenu radonskog potencijala uvrste i: koncentracija torijuma u zemljištu i koncentracija torona i njegovih potomaka u zatvorenim prostorijama.

## **5. Unapređenje i optimizacija gama spektrometrijske metode za direktno određivanje ravnotežne ekvivalentne koncentracije torona i toronske ravnoteže**

Studije fokusirane na toron najčešće dokazuju da prisustvo torona u zatvorenim prostorijama (indoor thoron) najviše potiče od građevinskih materijala, kao i da koncentracija torona eksponencijalno opada sa rastojanjem od zida ili poda, odnosno od toronskog izvora. Nasuprot tome, usled dužeg perioda poluraspada toronovih potomaka,  $^{212}\text{Pb}$  i  $^{212}\text{Bi}$ , očekuje se da je njihova prostorna distribucija homogena i da doza predata bronhijama potiče upravo od njihovog prisustva u zatvorenoj atmosferi. S tim u vezi, direktno merenje koncentracije toronovih potomaka ili direktno merenje torona kao i određivanje toronskog faktora ravnoteže  $F_{\text{Tn}}$  postaje neophodno za procenu doze. U ovom poglavlju optimizovana je i potvrđena pouzdana i jeftina metoda za direktno merenje koncentracije toronovih potomaka zasnovana na filtraciji vazduha praćena gama spektrometrijskim merenjima. Uporedo sa filtracijom vazduha, korišćen je aktivni uređaj RAD7 za merenje trenutne koncentracije torona u vazduhu, na osnovu čega je određen toronski faktor ravnoteže u 15 različitih soba. Dobijeni rezultati ravnotežne ekvivalentne koncentracije torona (EETC) kreću se u opsegu od  $0,277 \text{ Bq/m}^3$  do  $11,34 \text{ Bq/m}^3$ , a toronska ravnoteža je u opsegu od  $0,0047$  do  $0,098$  sa srednjom vrednošću od  $0,034$  što je u slaganju sa do sada objavljenim podacima.

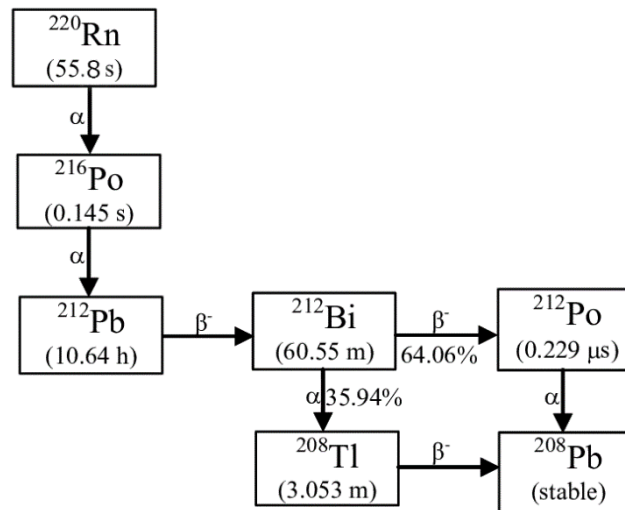
### **5.1. Uvod**

Svetska zdravstvena organizacija (WHO) prepoznaje radon kao drugi uzročnik raka pluća, posle pušenja (WHO, 2009). Istraživanja se najčešće fokusiraju na određivanje radonskih potomaka i određivanju faktora ravnoteže između radona i njegovih potomaka. Nasuprot tome, rizik od izlaganja toronu bio je zanemaren. Dugo se smatralo da toron ne dospeva u zatvorene prostorije usled njegovog kratkog perioda poluraspada od  $55,8(3)\text{s}$  ("Laboratoire National Henry Becquerel," 2018) ili da i ako dospe ne doprinosi povećanju doze koju primi čovek boraveći u takvim prostorijama. Međutim, novija istraživanja ukazuju na to da prisustvo torona i njegovih potomaka nije zanemarljivo (Chen et al.,

2012; Clouvas et al., 2006; Gierl et al., 2014). Mnoge studije koje su primarno fokusirane na toron (Csige et al., 2013; Hosoda et al., 2017; Urosevic et al., 2008) pokazuju da toron u zatvorenim prostorijama najčešće potiče od građevinskog materijala i da koncentracija torona eksponencijalno opada sa rastojanjem od zidova (ili poda). Međutim, suprotno tome, toronovi potomci  $^{212}\text{Pb}$  i  $^{212}\text{Bi}$  homogeno su raspoređeni po atmosferi zatvorenih prostorija, a oni su upravo odgovorni za dozu koja se preda plućima. Stoga, direktno merenje toronovih potomaka i određivanje faktora ravnoteže, značajno je za procenu doze. Toron je prirodni radioaktivni gas koji nastaje nakon alfa raspada  $^{224}\text{Ra}$  kao član torijumovog radioaktivnog niza. Toron se dalje raspada i preko kratkoživećih potomaka dolazi do stabilnog izotopa olova ( $^{208}\text{Pb}$ ). Dinamika toronove serije raspada različita je od radonove. Samo produkt trenutnog raspada torona  $^{216}\text{Po}$  ( $T_{1/2} = 0,145$  s) uspostavlja stanje sekularne ravnoteže sa toronom, koja je prekinuta sledećim radionuklidom u nizu ( $^{212}\text{Pb}$ ). Međutim, potomci  $^{212}\text{Pb}$  imaju kraće periode poluraspada i uspostavljaju prolaznu ravnotežu sa  $^{212}\text{Pb}$ .

Toronovi potomci, kao i radonovi, mogu da se nalaze u fazi nepripojenih klastera (0,3-4 nm) ili pripojeni aerosolima vazduha dijametara u opsegu 20-3000 nm (Meisenberg and Tschiersch, 2010). Značajno je primetiti i da je potomak torona  $^{212}\text{Pb}$ , koji doprinosi sa 91% ravnotežnoj ekvivalentnoj koncentraciji torona (EETC), beta emiter i da je moguće meriti ga gama spektrometrijski usled postojanja dovoljno intenzivnog gama prelaza. Toronovi potomci  $^{212}\text{Pb}$  i  $^{212}\text{Bi}$  primarno se nalaze u formi pripojenih frakcija iz razloga što usled njihovog dužeg perioda poluraspada imaju vremena da se u atmosferi zakače za čestice aerosola i na taj način postanu pripojeni. Međutim, filteri izrađeni od staklastih vlakana koji se često koriste kao standardni filteri za uzorkovanje vazduha velike zapremine, obezbeđuju veliku efikasnost filtracije i za pripojene i za nepripojene frakcije toronovih potomaka. Gama-spektrometrijskom analizom prikupljenih toronovih potomaka na filter papiru moguće je odrediti početne koncentracije dominantnih toronovih potomaka ( $^{212}\text{Pb}$  i  $^{212}\text{Bi}$ ) u uzorkovanom vazduhu. Iz ovog razloga metoda filtriranja vazduha je pogodna za njihovo prikupljanje u zatvorenim prostorijama, a ako simultano sa uzorkovanjem vazduha koristimo i neki od aktivnih uređaja (monitora) za određivanje koncentracije torona u prostorijama, možemo lako odrediti i toronski koeficijent ravnoteže. Iako su najčešće korišćene tehnike za merenje toronovih potomaka pasivni integralni uređaji (Chen et al., 2012; Gierl et al., 2014; Mishra and Mayya, 2008) ili alfa spektrometrijska metoda (Clouvas et al., 2006), u okviru ovog rada pokazano je da je

gama spektrometrijska metoda zadovoljavajuća zbog visoke spektralne rezolucije post-toronjskih linija i izbegavanja grananja u raspadu torona (Slika 5.1.). Ova prednost gama spektrometrije daje nam mogućnost direktnog određivanja koncentracije aktivnosti toronovih potomaka u vazduhu zatvorenih prostorija.



Slika 5.1. Šematski prikaz raspada torona ( $^{220}\text{Rn}$ ), sa prikazom perioda polu raspada svakog elementa.

Predloženi metod za direktno određivanje toronovih potomaka primenjen je u 15 različitih kuća, tj. soba, izabranih na osnovu prethodnih merenja radona, kako bi se testirala i potvrdila ova metoda kao pogodna za određivanje toronovih potomaka i procenu doze. Odabrani objekti predstavljaju dominantno porodične prizemne kuće sa povišenim, umerenim i niskim koncentracijama radona, locirane kako u urbanim tako i u ruralnim područjima. Kontinualna merenja koncentracije torona i uzorkovanje vazduha kroz filter papir rađeno je u dnevnim sobama u prizemlju ispitivanih kuća, bez prisustva podruma ispod ispitivane prostorije, u približno istim vremenskim uslovima.

Faktor ravnoteže definisan je jednačinom 4.1 kao i ravnotežna ekvivalentna koncentracija torona EETC.

Godišnja efektivna doza AED za inhalaciju torona može se odrediti na osnovu parametara definisanih UNSCEA-om (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 2000):

$$AED \left[ \frac{mSv}{yr} \right] = EETC \cdot D_{CF} \cdot I_{OC} , \quad (5.1)$$

gde je  $D_{CF}$  dozni konverzioni faktor za izlaganje toronu i iznosi  $40 \text{ [nSv/(Bq h m}^{-3}\text{)]}$  i  $I_{OC}$  predstavlja okupaciono vreme izlaganja toronu u zatvorenim prostorijama i iznosi  $\approx 7000 \text{ [h/yr]}$ .

Kako bi se uzelo u obzir izlaganje toronu u zatvorenim prostorijama, neki autori (Chen and Moir, 2012) predlažu koncept ekvivalentne koncentracije radona u odnosu na toron (radon concentration to thoron)  $R_{Tn}$ , što predstavlja radonsku koncentraciju koja preda istu godišnju dozu kao i  $C_{Tn}$ :

$$R_{Tn} = \frac{C_{Tn} \cdot 0,02 \cdot 7000 \cdot 40}{(0,4 \cdot 7000 \cdot 9)} = 0,22 C_{Tn} , \quad (5.2)$$

gde je 0,4 tipična vrednost za radonsku ravnotežu, 0,02 tipična vrednost toronskog ravnotežnog faktora, 7000 okupaciono vreme za godišnje izlaganje u zatvorenim prostorijama i 9 je preporučena vrednost doznog konverzionog faktora za izlaganje radonu u  $\text{nSv/(Bq h m}^{-3}\text{)}$ . Ovaj koncept primenjen je u daljem tekstu za određivanje ukupnog izlaganja radonu i toronu  $C_{total}$  kao suma radonske koncentracije i  $R_{Tn}$ , ekvivalentne radonske koncentracije u odnosu na toron.

## 5.2 Merni uređaji

### 5.2.1. RAD7 aktivni uređaj - eksperimentalna postavka za merenje koncentracije radona i torona u vazduhu

RAD7 detektor proizvođača DURRIDGE COMPANY Inc (USA) (Slika 5.2.) je alfa spektrometar koji može da se koristi za merenje koncentracije radona u vodi, vazduhu i zemljištu. Osnova ovog detektora je polusferna komora zapremine 0,7 litara, obložena sa unutrašnje strane električnim provodnikom. U centru polusferne komore nalazi se jonski implantiran ravni silicijumski detektor u kojem se energija upadnog  $\alpha$  zračenja direktno konvertuje u električni signal i na taj način se razdvajaju energije svake emitovane  $\alpha$  čestice. Visoki napon od 2 kV do 2,5 kV između unutrašnjeg provodnika i detektora održava razliku potencijala, stvarajući na taj način električno polje unutar zapremine

detektorske komore (polusfere) koji usmerava pozitivno naelektrisane čestice ka površini silicijumskog detektora. Alfa-spektrometrijska metoda je pogodna za razdvajanje radonovih i toronovih potomaka zbog različite energije emitovanih alfa čestica, kao i da se razdvoji “stari” od “novog” radona, radon od torona, signal od šuma. Prednost ovog uređaja leži u činjenici da koristi alfa liniju kratkoživećeg potomka  $^{218}\text{Po}$  sa periodom poluraspada od 3,05 min te je pogodan za brza merenja. Kada se simultano mere koncentracije radona i torona, tada se kao rezultat merenja dobijaju kombinovani spektri i sam spektrometar prilikom izračunavanja radonske koncentracije uzima u obzir i doprinos torona radonskim linijama kako bi se korigovao odbroj koji potiče od  $^{212}\text{Bi}$ . Konstantan dotok svežeg vazduha osiguran je automatskom pumpom sa konstantnim protokom od 0,7 lit/min. Sveži vazduh prvobitno prolazi kroz odvlaživač, a na samom ulazu u detektor nalazi se filter koji odstranjuje radonove i toronove potomke i dopušta prolaz samo gasovima (radonu i toronu).



Slika 5.2. Ekperimentalna postavka aktivnog uređaja RAD7 za merenje koncentracije radona i torona u zatvorenim prostorijama (indoor) – levo i izgled alfa spektra - desno.

### 5.2.1.1. Korekcija na raspad koncentracije aktivnosti torona

Problem kod određivanja aktivnosti koncentracije torona je velika greška koja dolazi usled prirode samog izotopa (period poluraspada od 55,8 s) kao i neuniformna raspodela gasa. Iz tog razloga, vrednost torona koja se izmeri RAD7 monitorom mora da se koriguje na raspad torona u unutrašnjoj zapremini dektektora kao i za dodatnu zapreminu izvan instrumenta u odnosu na standardnu postavku monitora. Korekcija mora da se odredi za dodatna creva, deksikator, filtere itd. Koncentracija aktivnosti torona određuje se na osnovu formule:

$$C = R \cdot D \cdot V, \quad (5.3)$$

gde je R - očitavanje koncentracije torona koje daje instrument, D - korekcija na gubitke unutar RAD7 i V- korekcija na gubitke u ukupnoj zapremini koja je spojena na ulaz RAD7 monitora.

Koncentracija aktivnosti torona očitana na displeju monitora R dobijena je na osnovu odbroja u prozoru B spektra koji odgovara 6,78 MeV alfa liniji  $^{216}\text{Po}$ , prvog potomka gasa torona (slika 5.2. desno).

Koncentracija torona na ulazu u RAD7,  $C_1$  može se matematički predstaviti kao:

$$C_1 = C_0 e^{-\lambda V_1/q}, \quad (5.4)$$

gde je  $C_0$  originalna koncentracija uzorka,  $V_1$  - zapremina cevi za uzorkovanje, deksikatora i filtera (oko 50 ml),  $q$  - je brzina protoka (oko 650 ml/min) i  $\lambda$  konstanta raspada torona (0,748 1/min). Tipična vrednost  $C_1/C_0$  je 0,943 (Durrige, 2017). Ovaj broj uključen je u fabričku kalibraciju:

$$R = \text{Odbroj u B prozoru [c/min]} / \text{CALIB faktor u funkciji od relativne vlažnosti}. \quad (5.5)$$

Korekcija za gubitke unutar aktivne zapremine monitora RAD7 može se odrediti na osnovu raspada torona:

$$D = 1 + \lambda \frac{V_2}{q}, \quad (5.6)$$

gde je  $\lambda$ - konstanta raspada torona (0,748 1/min),  $V_2$  zapremina unutrašnje komore ( $V_2=0,75$  l) i  $q$  je brzina protoka (l/min)

Ukoliko se monitor koristi za merenje koncentracije aktivnosti torona u eksperimentalnoj postavci koja je drugačija od standardne (manji deksikator i kraće cevi), mora se uvesti korekcija za dodatnu zapreminu elemenata pre ulaza u RAD7 monitor. Korekcija na gubitke u dodatnoj zapremini koja je spojena na ulaz monitora, u odnosu na



standardnu postavku, može se proceniti ukoliko znamo koliko iznosi dodatna zapremina  $V_1$ :

$$V = \frac{1}{e \frac{\lambda v_1}{q}} . \quad (5.7)$$

### 5.2.2. SARAD RTM 1688-2 aktivni monitor radona i torona

RTM 1688-2 (Slika 5.3.) je prenosivi kontinualni silicijumski detektor sa površinskom barijerom koji ima mogućnost istovremenog merenja radona i torona. Protok vazduha kroz aktivnu komoru zapremine 130 ml je oko 0,25 l/min. Na ulazu u komoru nalazi se filter koji sprečava radonovim i toronovim potomcima ulaz u aktivnu komoru i omogućava prolaz samo radonu i toronu. Katoda je obložena silicijumom i predstavlja detektor sa površinskom barijerom aktivne površine od 150 mm<sup>2</sup>, a anoda predstavlja zidove komore. Napon koji vlada između anode i katode iznosi oko 1400 V. Alfa raspadom radona <sup>222</sup>Rn i torona <sup>220</sup>Rn u aktivnoj komori nastaju <sup>218</sup>Po i <sup>216</sup>Po, respektivno i oni se izloženi velikom potencijalu sakupljaju na površini poluprovodničkog detektora.



Slika 5.3. RTM1688-2 kontinualni monitor radona i torona.

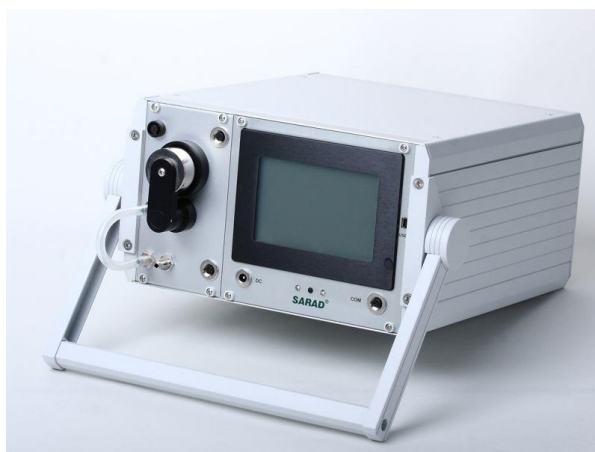
Broj jona <sup>218</sup>Po prikupljenih na detektoru proporcionalan je koncentraciji radona u komori. <sup>218</sup>Po raspada se dalje sa periodom poluraspada od 3,05 min i oko 50% svih raspada biće registrovano na površini detektora. Ravnoteža između brzine raspada radona i brzine detekcije za <sup>218</sup>Po uspostavlja se nakon 15 min tj. nakon vremena od oko 5 perioda poluraspada. Radioaktivni niz se nakon <sup>218</sup>Po nastavlja sa <sup>214</sup>Pb i polonijumom <sup>214</sup>Po koji emituje još jednu alfa česticu. Zbog perioda poluraspada članova niza, između <sup>218</sup>Po i

$^{214}\text{Po}$  postoji vremenska razlika od oko 3 sata. RTM1688-2 nudi mogućnost očitavanja "brzog" i "sporog" radona, odnosno uzima u obzir samo  $^{218}\text{Po}$  za procenu "brzog" radona, a ukoliko uzima u obzir i  $^{218}\text{Po}$  i  $^{214}\text{Po}$  onda je to "spori" radon. Prednost očitavanja "brzog" radona je u tome što se u kratkom vremenskom intervalu može dobiti informacija o koncentraciji radona, ali ukoliko se želi dobiti preciznija informacija sa većom osetljivošću, onda treba očitavati "spori" radon.

U slučaju određivanja koncentracije torona, direktni potomak  $^{216}\text{Po}$  se koristi za izračunavanje koncentracije aktivnosti torona. Period poluraspada  $^{216}\text{Po}$  je manji od 1 s te se ravnotežno stanje unutar komore uspostavlja praktično momentalno.

### 5.2.3. SARAD RPM 2200 aktivni monitor potomaka radona i torona

RPM 2200 (Slika 5.4.) predstavlja aktivni monitor radonovih i toronovih potomaka. U osnovi uređaja je jonski implantiran silicijumski detektor aktivne površine od  $400\text{ mm}^2$ . Vazduh u uređaj ulazi prolazeći kroz filter prečnika 27 mm sa veličinama pora od  $1\mu\text{m}$ . Monitor daje podatke o ravnotežnoj ekvivalentnoj koncentraciji radona i torona kao i koncentraciju potencijalne alfa energije (PAEC). Zbog velikog perioda poluraspada toronovog potomka  $^{212}\text{Po}$  aktivnost filtera se ne koristi direktno za određivanje koncentracije toronovih potomaka. Kako bi se dobila zadovoljavajuća vremenska rezolucija, brzina raspada  $^{212}\text{Po}$  se diferencira i na taj način mogu se dobiti očitavanja instrumenta na svakih sat vremena. Svi podaci prikupljeni na monitoru mogu se očitati ručno na monitoru ili putem USB kabla spojenog sa PC računarem.



Slika 5.4.RPM 2200 monitor radonovih i toronovih potomaka.

#### 5.2.4. Pumpa velikog protoka sa filter papirom

Pumpa za vazduh velikog protoka (Slika 5.5.) proizvođača F&J (USA) model DFHV-1SE ima ugrađen digitalni merač protoka vazduha kao i merač ukupne zapremine vazduha koja je prošla kroz filter papir od početka usisavanja. Protok vazduha je konstantan i iznosi  $0,03 \text{ m}^3/\text{s}$ . Uz uzorkivač vazduha koriste se izmenjivi jednokratni filter papiri, efektivne površine  $406 \text{ cm}^2$  sa veličinom pora od  $1\text{-}2 \text{ }\mu\text{m}$ . Efikasnost filter papira iznosi  $\varepsilon=98 \%$  i za pripojene i nepripojene frakcije radonovih i toronovih potomaka. Osnovni materijal od koga su napravljeni filter papiri sastoji se od staklenih mikrovlakana sa 3-7% veziva od akrilne smole.



Slika 5.5. Eksperimentalna postavka pumpe velikog protoka i monitora SARAD (RTM1688-2 i RPM2200) kao i AlphaGuard monitora.

#### 5.2.5. Gama-spektrometrijski sistem B

Spektrometar pripada grupi nisko-fonskih germanijumskih detektora (HPGe) velike zapremine (interna oznaka detektora – B). Proizvođača Canberra (USA), proizveden 2007 godine, tip GX10021 i serijskog broja b08093. Radi sa proširenim mernim opsegom (6 keV - 3 MeV) i nalazi se u originalnoj olovnoj zaštiti debljine 15 cm. Relativna efikasnost detektora je 100 % (ekvivalentno apsolutnoj efikasnosti  $3'' \times 3''$  NaI(Tl) detektora na 1332 keV), što odgovara aktivnoj zapremini detektora od  $380 \text{ cm}^3$ . Prednji prozor na kapi detektora je debljine 0,89 mm i napravljen je od kompozitnih uljanih vlakana visoke tvrdoće i dobre transparentnosti, takva konstrukcija obezbeđuje više od 85 % transmisije za fotone energije iznad 15 keV-a i skoro 100 % transmisije za fotone energije iznad 20 keV-a. Model kriostata je 7915-30-ULB, model predpojačavača 2002C. Spektrometar je

zatvorenog koaksijalnog tipa sa U kriostat konfiguracijom. Rezolucija na 1332 keV-a iznosi FWHM = 1.96 keV, a odnos peak to Compton je P/C=84.5. Zaštita detektora je napravljena od slojevito spojenog olova. Spoljašnjih 5 inča (125 mm) je obično niskofonsko olovo, dok je unutrašnji sloj od oko 1 inč (25 mm) olovo sadržaja  $^{210}\text{Pb}$  od oko 20 Bq/kg. Pasivna zaštita ima unutrašnji sloj koji zaustavlja X zrake iz K nivoa energije od 75 - 85 keV. Presvučeni materijali su nisko-fonski kalaj debljine 1 mm i bakar visoke čistoće debljine 1.5 mm. X-zraci koji potiču iz sloja kalaja (od 25 - 28 keV) su takođe redukovani bakrom.

Zaštita je opremljena sa gasnim priključkom koji služi za uvođenje tečnog azota iz Dewar-a u unutrašnjost zaštite kako bi se snizio fon koji potiče od radona i radonovih potomaka. Ukupna masa zaštite iznosi 1633 kg. Za kompletni spektar redukcionni faktor fona (od 40 keV do 2768 keV) iznosi 238. Visoki napon za ovaj detektor obezbeđuje izvor Canberra Model 3125 Dual. Signali se sa spektroskopskog pojačavača Canberra Model A 2026 vode na Canberra Multiport I sa ADC-om koji je preko USB porta priključen na standardni računar, sa operativnim sistemom Windows XP. Pregled i upravljanje sakupljenih podataka kao i on-line praćenje spektara u formatu Canberra \*.CNF vrši se pomoću programa Canberra Genie2000, verzija 2.1.

### **5.3. Merne tehnike i eksperimentalna postavka**

Merenja su vršena tokom proleća i jeseni 2017. godine u stambenim kućama sa povišenim, srednjim i niskim koncentracijama radona, u gradskim i seoskim uslovima i sa različitim građevinskim materijalima koji su upotrebljavani za izgradnju ili prekrivanje zidova i podova. Usisni ulaz aktivnog uređaja RAD7 prilikom merenja torona (DurrIDGE, 2017) postavljan je na oko 30 cm iznad poda i na oko 30 cm od najbližeg zida. Koncentracija torona u takvim zatvorenim prostorijama određuje se na osnovu odbroja raspada  $^{216}\text{Po}$  unutar aktivne komore uređaja. Selektovani toronski mod rada uređaja obezbeđuje automatsko podešavanje pumpe i konstantan i stabilan protok vazduha koji kontinuirano doprema svež vazduh do aktivne komore za merenje. Dobijeni rezultati morali su biti korigovani, pošto se u originalnoj postavci za merenje koristi manji odvlaživač i kraće cevi. Velika jedinica za odvlaživanje je korišćena zbog veće preciznosti merenja i sprečavanja povećanja vlažnosti u aktivnoj komori detektora što znatno utiče na efikasnost detekcije. Etaloniranje uređaja izvršeno 2015. godine u radonskoj komori akreditovane laboratorije SUJCHIBO Kamenna u Češkoj koja ima sledivost do PTB

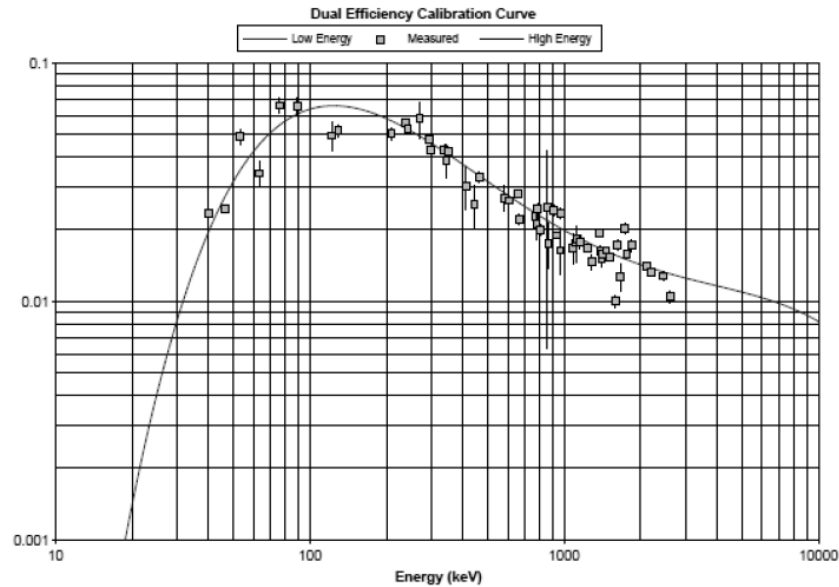
standarda. Merenje torona ovim uređajem je verifikovano učešćem na interkomparaciji merenja torona u Institutu NRPI u Pragu, Češka, gde su dobijena zadovoljavajuća slaganja rezultata ( $|\text{zeta score}| < 2$ ). ISO 13528:2015 standard definiše ( $z'_{score}$ ) kao:

$$z'_{score} = \frac{(x - X)}{\sqrt{\sigma^2 + u_x^2}} \quad (5.8)$$

gde je  $x$  - srednja vrednost,  $X$  - referentna vrednost,  $\sigma$  - standardna devijacija prijavljene srednje vrednosti i  $u_x$  - standardna nesigurnost prijavljene vrednosti. Interpretacija apsolutnih vrednosti dobijenog parametra  $z_{score}$  bazirana je na normalnoj distribuciji rezultata merenja: ukoliko je  $|\text{zeta score}| < 2$  rezultati su prihvatljivi,  $2 < |\text{zeta score}| < 3$  rezultati su diskutabilni i ako je  $|\text{zeta score}| > 3$  - nezadovoljavajući rezultati.

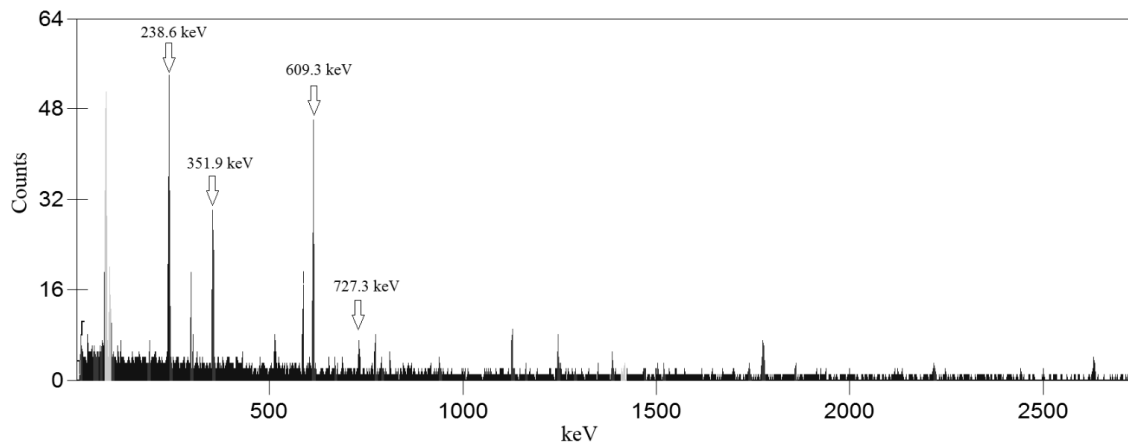
Gama spektrometrijskom analizom prikupljenih toronovih potomaka na filter papiru moguće je odrediti početnu koncentraciju dominantnih toronovih potomaka ( $^{212}\text{Pb}$  i  $^{212}\text{Bi}$ ) uzorkovanog vazduha. Za uzorkovanje vazduha, tj. za prikupljanje potomaka na filter papir, korišćen je uzorkivač vazduha proizvođača F&J model DFHV-1SE. Filter papiri stavljaju se na predviđeno mesto na uzorkivaču tako da je papir sa jedne strane okrenut prema prostoriji u kojoj se uzorkovanje vrši, a druga strana filter papira okrenuta je ka pumpi za vazduh. Vreme uzorkovanja potomaka na filter papiru podešeno je na 1h, protok pumpe je  $v=0,03$  m/s. Generalno filteri kroz koje prolaze velike zapremine vazduha imaju dobar uticaj na efikasnost prikupljanja aerosola na filteru. Na osnovu protoka vazduha od  $108 \text{ m}^3/\text{h}$ , što odgovara brzini razmene vazduha od  $1,5 \text{ h}^{-1}$ , može se zaključiti da je ponovno uspostavljanje ravnotežne koncentracije toronovih potomaka moguće za oko jedan sat, uzimajući u obzir periode poluraspada torona i njegovih potomaka (Maiello and Hoover, 2011). Na svim lokacijama na kojima je uzorkovanje vršeno, uzorkivač je bio postavljen na približno istu visinu od poda (oko 1m) u centru ispitivane prostorije/sobe. Nakon uzorkovanja od 1h, filter papir se skida sa držača, pakuje u plastičnu kutiju cilindrične geometrije (visina 62 mm i dijametar 67 mm) i transportuje do laboratorije za spektrometrijska merenja. Gama spektrometrijska merenja vršena su na HPGe detektoru proizvođača Canberra model GX10021 sa proširenim opsegom, od 6 keV do 3 MeV. Vreme merenja uzorka (filter papira) podešeno je na 1000 s. Nakon vremena merenja (prikupljanja podataka) dobijeni spektri se čuvaju na PC računaru i dalje se obrađuju pomoću GENIE2000 softvera. Kako bi se analizirali dobijeni spektri filter papira, bilo je neophodno prethodno preračunati efikasnost postojeće detektorske kalibracije korišćenjem

odnosa efektivnih prostornih uglova pomoću Angle softvera (ANGLE 2.0 Copyright 1994-2002 by Slobodan Jovanović and Aleksandar Dlabač) Slika 5.6.



Slika 5.6. Kriva efikasnosti filter papira spakovanog u cilindričnoj geometriji, dijametra 72 mm i visine 30 mm (Forkapić, 2013).

Za određivanje aktivnosti koriste se dominantne gama linije toronovih potomaka  $^{212}\text{Pb}$  i  $^{212}\text{Bi}$  sa energijama 238,6 keV,  $p_\gamma=43,6\%$  i 727,3 keV,  $p_\gamma=6,65\%$ , respektivno. Na slici 5.7. prikazan je jedan reprezentativan spektar filtera vazduha na kome su obeležene linije koje odgovaraju toronovim i radonovim potomcima. Za radonske potomke obeležene su linije 351,9 keV za  $^{214}\text{Pb}$  i 609,3 keV za  $^{214}\text{Bi}$ . Prosečno vreme koje je proteklo od uzorkovanja do snimanja na gama detektoru iznosi oko 4 sata i ono ne utiče na analizu toronovih potomaka iz razloga što period poluraspada  $^{212}\text{Pb}$  iznosi 10,64(1) h.



Slika 5.7. Gama spektar filtera (K2) sa obeleženim linijama potomaka radona i torona.

### 5.3.1. Matematički model određivanja toronovih potomaka - GAMMA metod

Diferencijalne jednačine koje opisuju prikupljanje (build-up) toronovih potomaka na filter papiru ( $^{212}\text{Pb}$  and  $^{212}\text{Bi}$ ), tokom vremena uzorkovanja  $t_s$  definisane su na sledeći način:

$$\frac{dN_{Pb}}{dt_s} = n_{Pb}v\varepsilon - \lambda_{Pb}N_{Pb} \quad (5.9)$$

$$\frac{dN_{Bi}}{dt_s} = n_{Bi}v\varepsilon + \lambda_{Pb}N_{Pb} - \lambda_{Bi}N_{Bi} \quad (5.10)$$

gde su:  $t_s$  - vreme uzorkovanja u sekundama,  $v$  - protok pumpe uzorkivača u  $\text{m}^3/\text{s}$ ,  $\varepsilon$  - efikasnost prikupljanja filter papira,  $N_{Pb}$ ,  $N_{Bi}$  - broj  $^{212}\text{Pb}/^{212}\text{Bi}$  atoma na filter papiru tokom prikupljanja,  $n_{Pb}$ ,  $n_{Bi}$  - broj atoma  $^{212}\text{Pb}/^{212}\text{Bi}$  po  $\text{m}^3$  uzorkovanog vazduha,  $\lambda_{Pb}$ ,  $\lambda_{Bi}$  - konstante raspada  $^{212}\text{Pb}/^{212}\text{Bi}$ . U prethodnim jednačinama pretpostavljeno je da koncentracija toronovih potomaka ostaje konstantna tokom vremena. Za proveru ove tvrdnje urađena su QA/QC merenja za 4 različita vremena usisavanja (15 min, 30 min, 1 h i 2 h) u istim uslovima zatvorene prostorije.

Prvi toronov potomak  $^{216}\text{Po}$  je zanemaren u prethodnom setu diferencijalnih jednačina zbog svog kratkog perioda poluraspada od 0,145 s.

Ukoliko pretpostavimo da je na početku prikupljanja broj atoma na filter papiru nula, odnosno,  $N_{Pb}(0)=0$ ,  $N_{Bi}(0)=0$ , dobijamo sledeći set jednačina:

$$N_{Pb} = n_{Pb} \frac{\varepsilon v}{\lambda_{Pb}} (1 - e^{-\lambda_{Pb} t_s}) \quad (5.11)$$

$$N_{Bi} = n_{Pb} \frac{\varepsilon v}{\lambda_{Bi}} \left( 1 - \frac{\lambda_{Bi}}{\lambda_{Bi} - \lambda_{Pb}} e^{-\lambda_{Pb} t_s} + \frac{\lambda_{Pb}}{\lambda_{Bi} - \lambda_{Pb}} e^{-\lambda_{Bi} t_s} \right) + n_{Bi} \frac{\varepsilon v}{\lambda_{Bi}} (1 - e^{-\lambda_{Bi} t_s}). \quad (5.12)$$

Nakon isključenja pumpe, toronovi potomci koji su prikupljeni na filter papiru počinju da se raspadaju tokom vremena hlađenja i vremena merenja i broj atoma  $^{212}\text{Pb}$  i  $^{212}\text{Bi}$  na filteru može se opisati sledećim jednačinama:

$$\frac{dN'_{Pb}}{dt'} = -\lambda_{Pb}N'_{Pb}, \quad (5.13)$$

$$\frac{dN'_{Bi}}{dt'} = \lambda_{Pb}N'_{Pb} - \lambda_{Bi}N'_{Bi}. \quad (5.14)$$

Rešavanje prethodnih diferencijalnih jednačina daje jednačine:

$$N'_{Pb}(t') = N_{Pb}e^{-\lambda_{Pb}t'}, \quad (5.15)$$

$$N'_{Bi}(t') = N_{Pb} \frac{\lambda_{Pb}}{\lambda_{Bi} - \lambda_{Pb}} (e^{-\lambda_{Pb}t'} - e^{-\lambda_{Bi}t'}) + N_{Bi} e^{-\lambda_{Bi}t'}, \quad (5.16)$$

gde  $N_{Pb}$  i  $N_{Bi}$  predstavljaju broj atoma potomaka na filter u momentu isključivanja pumpe, na kraju usisavanja.

Ukupna površina selektovanog gama pika, koji odgovara toronovom potomku,  $N_d$  predstavlja razliku neraspadnutih jezgara nakon vremena hlađenja  $t'=t_c$  i neraspadnutih jezgara nakon vremena hlađenja i merenja  $t'=t_{cm}$ .

$$\frac{N_{d(Pb)}}{\varepsilon_1 p_{\gamma 1}} = N'_{Pb}(t_c) - N'_{Pb}(t_{cm}) \quad (5.17)$$

$$\frac{N_{d(Bi)}}{\varepsilon_2 p_{\gamma 2}} = N'_{Bi}(t_c) - N'_{Bi}(t_{cm}), \quad (5.18)$$

gde su  $N_{d(Pb)}$ ,  $N_{d(Bi)}$  - odbroj ispod pika 238,6 keV i 727,3 keV;  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  - efikasnost dektektora 238,6 keV and 727,3 keV;  $p_{\gamma 1}$ ,  $p_{\gamma 2}$  - gama prinosi za 238,6 keV i 727,3 keV tranzicione linije, respektivno. Vreme hlađenja  $t_c$  definisano je kao vreme koje protekne od momenta isključivanja pumpe do početka gama spektrometrije, a vreme hlađenja + merenja  $t_{cm}$ , definiše se kao vreme proteklo od momenta isključenja pumpe do kraja gama spektrometrijskog merenja.

Kombinovanjem jednačina (5.11) i (5.12) sa jednačinama (5.15) i (5.16) i njihovom zamenom u jednačine (5.17) i (5.18), početan broj atoma  $^{212}\text{Pb}$  i  $^{212}\text{Bi}$  u zapremini

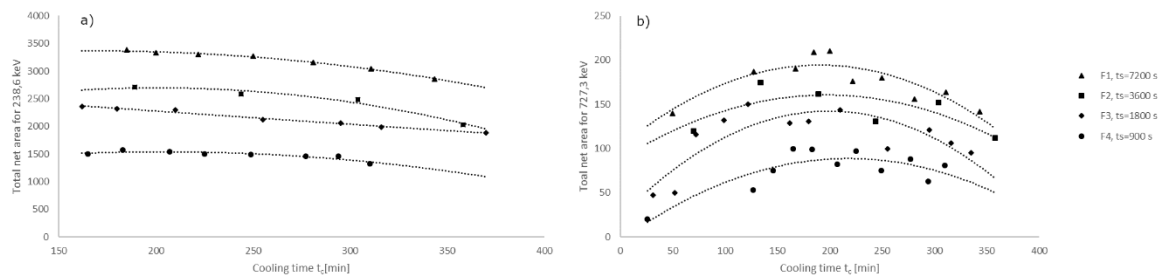


uzorkovanog vazduha može da se odredi. Kada su određene početne koncentracije atoma  $^{212}\text{Pb}$  i  $^{212}\text{Bi}$  u zapremini vazduha  $n_{\text{Pb}}$  i  $n_{\text{Bi}}$ , početna koncentracija aktivnosti toronovih potomaka  $C_{\text{Pb}}$  i  $C_{\text{Bi}}$  može se izračunati pomoću formula:

$$C_{\text{Pb}} = n_{\text{Pb}}\lambda_{\text{Pb}} \quad (5.19)$$

$$C_{\text{Bi}} = n_{\text{Pb}}\lambda_{\text{Pb}} \cdot \quad (5.20)$$

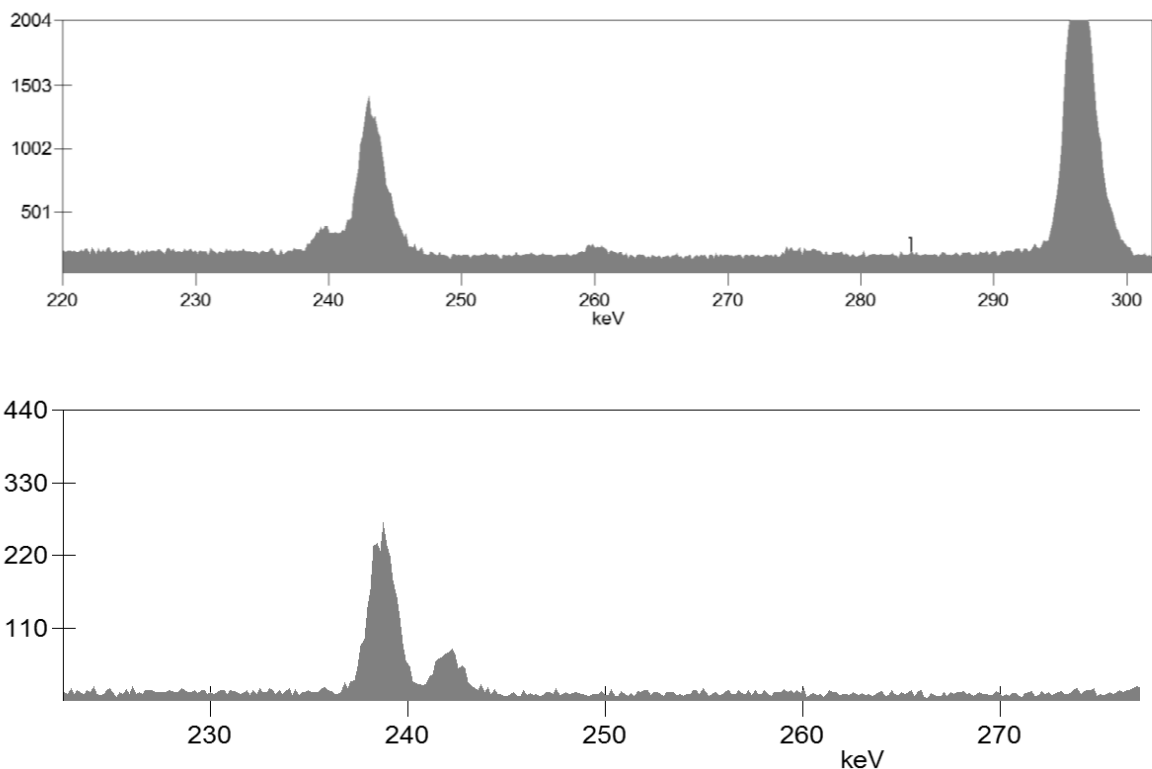
Za rešavanje ovog razvijenog matematičkog modela korišćen je softverski paket Mathematica (Prilog 1). Najveći zadatak optimizacije gore predloženog metoda bio je pronaći optimalno vreme hlađenja  $t_c$  koje je proteklo od momenta zaustavljanja pumpe za vazduh pa do početka merenja na gama spektrometrijskom sistemu. Kako bi se pronašlo optimalno vreme za koje će aktivnost potomaka na filter papiru biti maksimalna, izvršena je serija sukcesivnih merenja gama aktivnosti filter papira za različita vremena usisavanja (slika 5.8a).



Slika 5.8a i 5.8b. a) ukupan odbroj linije 238,6 keV potomka  $^{212}\text{Pb}$  u funkciji od vremena hlađenja za filtere sa različitim vremenima uzorkovanja  $t_s$ ; b) ukupan odbroj linije 727,3 keV potomka  $^{212}\text{Bi}$  u funkciji od vremena hlađenja za filtere sa različitim vremenima uzorkovanja  $t_s$ .

Kao rezultat dugog perioda poluraspada protomka  $^{212}\text{Pb}$  u poređenju sa vremenom usisavanja, aktivnost prikupljena na filteru polako opada sa vremenom hlađenja (slika 5.8a). Uticaj visoke koncentracije radonovih potomaka u ispitivanoj prostoriji uzet je u obzir prilikom obrade spektara i došlo se do zaključka da za liniju  $^{212}\text{Pb}$  potomka (od 238,6 keV) dolazi do velikog uticaja i greške prilikom očitavanja odbroja ipod pika usled preklapanja sa linijom 241,9 keV koja potiče od radonovog potomka  $^{214}\text{Pb}$ . Kako je period poluraspada radonovog potomka značajno kraći (oko 26 min) dovoljno je sačekati oko 150

min i tek onda očitavati vrednost površine ispod pika za ispitivanu liniju od 238,6 keV. Za period hlađenja kraći od 150 min, niskoenergijski rep linije 214,9 keV preklapa se sa visokoenergijskim repom linije 238,6 keV te dolazi do greške u očitavanju vrednosti površine ispod pika (slika 5.9). Kao što je prikazano na slici 5.8b maksimum aktivnosti koncentracije  $^{212}\text{Bi}$  dostiže se približno u periodu od 200-300 min nakon završetka usisavanja za sve ispitivane filtere. Nakon tog vremena odbroj počinje da opada i vrednosti koje se dobijaju za EETC postaju nerealne. U tom periodu formira se tzv. plato aktivnosti, odnosno to vreme predstavlja optimalno vreme hlađenja  $t_c$ . Preporučeno vreme hlađenja dobijeno ovom metodom u dobrom je slaganju sa rezultatima u literaturi koji su dobijeni alfa i beta spektrometrijskim metodama direktnog merenja toronovih potomaka baziranih na filtriranju vazduha (Chalupnik et al., 2017).



Slika 5.9. Gore - spektar filter papira snimljen za vreme hlađenja od 40 min i jasno uočljivim overlap-om linija 238,6 keV i 241,9 keV; Dole - spektar filter papira snimljen nakon vremena hlađenja od 150 min i jasno razdvojenim linijama 238,6 keV i 241,9 keV.

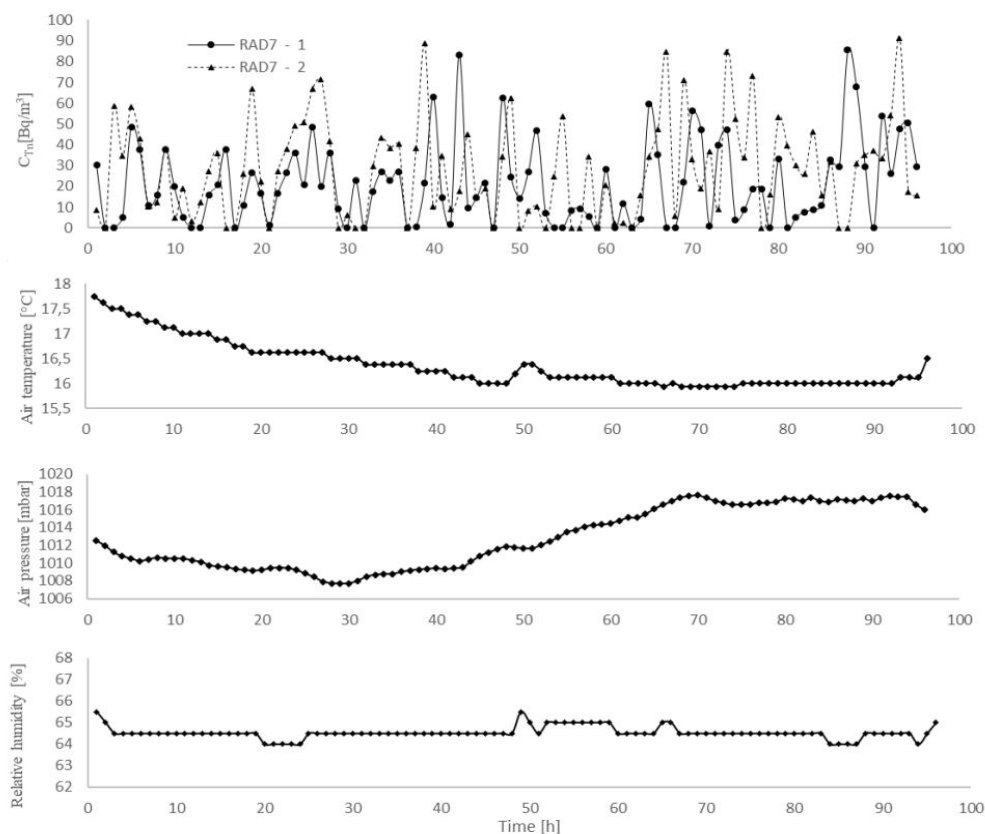
Vreme uzorkovanja od 1 h u ovom eksperimentu izabrano je kao najpovoljnije, pošto daje dobar odnos između ukupnog odbroja željenih linija i vremena trajanja samog eksperimenta. Produžavanjem vremena uzorkovanja ne dolazi do unapređenja u dobijenim rezultatima, dok obrnuto, ukoliko smanjimo vreme uzorkovanja, na mestima na kojima je

koncentracija toronovih potomaka mala, dolazi do pojave da je odbroj u linijama ispod pika nedovoljan za određivanje koncentracije toronovih potomaka.

### **5.3.2. Osiguranje kvaliteta (QA/QC) i poređenje sa drugim eksperimentalnim metodama za merenje torona i EETC**

Razvijeni metod za određivanje EETC u realnim ambijentalnim uslovima verifikovan je poređenjem sa rezultatima dobijenih pomoću dva kontinualna monitora, RTM 1688-2 (Sarad GmbH), koji istovremeno meri koncentraciju radona i torona i RPM 2200 (Sarad GmbH) koji direktno meri njihove potomke. QA/QC merenja vršena su u sobi jedne stare tradicionalne porodične kuće na periferiji grada. Zapremina ispitivane sobe je oko 75 m<sup>3</sup>, pod je od zemlje, prekriven drvenim daskama (brodski pod). U istoj sobi prethodnim merenjima ustanovljeno je da je koncentracija radona povišena (prelazi nivo od 400 Bq/m<sup>3</sup>). Merenja su vršena tokom zimskog perioda, prozori u sobi bili su zatvoreni, nije bilo ventilacije ni grejanja. Za određivanje EETC pomoću aktivnog monitora RPM2200 sa vremenskom rezolucijom od jednog sata, korišćen je diferencijalni mod zbog dugog perioda poluraspada toronovog potomka <sup>212</sup>Po.

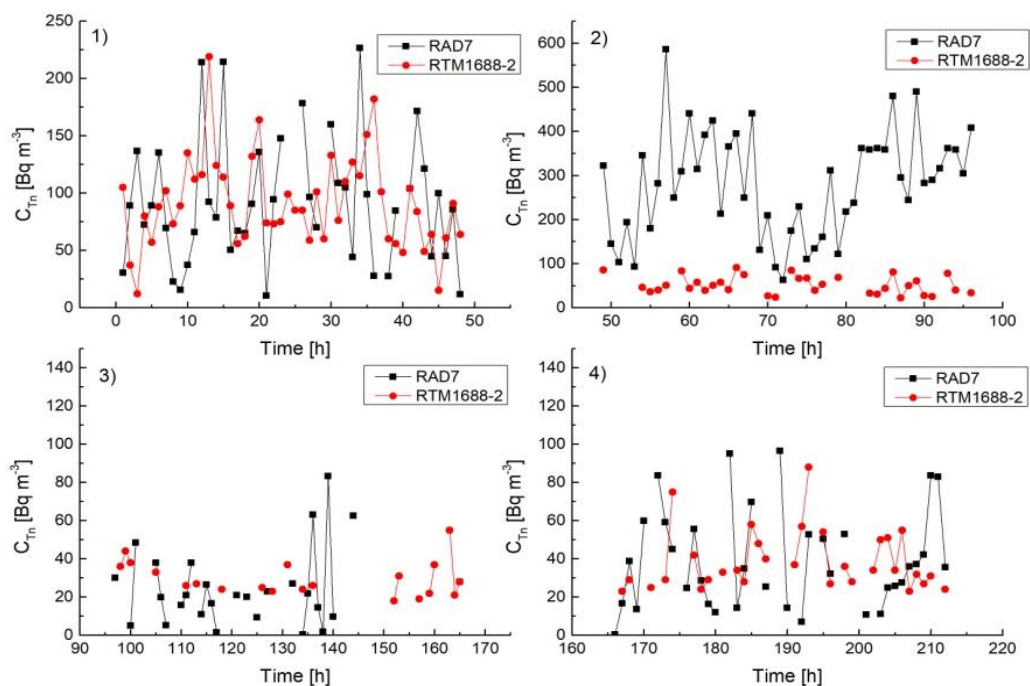
Prvi korak u merenju bio je ispitati stabilnost uređaja RAD7 za kontinualno merenje koncentracije torona. Stabilnost uređaja je proverena tako što su dva RAD7 monitora radila istovremeno tokom perioda od 4 dana, smeštena jedan pored drugog na istoj poziciji u ispitivanoj sobi (1 m iznad poda i 0,5 m od zida). Dobijeni rezultati koncentracije torona kao i parametri okoline (temperature, pritisak i relativna vlažnost vazduha) u zavisnosti od vremena prikazani su na slici 5.10. Podaci su prikazani uporedo na 4 grafika sa istom vremenskom rezolucijom od 1h tokom perioda od 4 dana koliko je trajalo ispitivanje. Na gornjem grafiku prikazane su koncentracije torona očitavane sa oba uređaja. Može se zaključiti na osnovu dobijenih vrednosti za koncentracije torona da, nasuprot radonu, dnevne varijacije u koncentraciji torona nisu toliko izražene. Dobijene srednje vrednosti koncentracije torona za dva RAD7 uređaja iznose 33,08 Bq/m<sup>3</sup> i 26,17 Bq/m<sup>3</sup>, respektivno. Dobijene vrednosti govore u prilog dobrom poklapanju rezultata, razlika u srednjim vrednostima je manja od dve standardne devijacije, što je u saglasnosti sa međunarodnim preporukama kod interkomparacije rezultata ( $|\text{zeta score}| < 2$ ).



Slika 5.10. Komparativni prikaz rezultata dobijenih pomoću dva RAD7 uređaja, uporedo sa parametrima okruženja.

Sledeći korak merenja bio je ispitivanje merenja koncentracije torona pomoću dva različita uređaja, u ovom slučaju pomoću RAD7 i RTM 1688-2 monitora, istovremeno na nekoliko različitih pozicija u ispitivanoj sobi. Slika 5.11 prikazuje uporedne rezultate toronske koncentracije dobijene pomoću dva aktivna monitora za različite pozicije instrumenata u sobi. Izabrane su četiri reprezentativne pozicije u sobi na kojima su uporedo merene koncentracije torona kako bi se ispitala osetljivost merenja torona u zavisnosti od rastojanja od eventualnog izvora torona: na podu sa minimalnim rastojanjem usisnog dela instrumenta od zidova 1 i 2 (5-15 cm u zavisnosti od konstrukcije samog instrumenta) region 1) i 2) na slici 5.11, na centralnoj poziciji u sobi na oko 1 m visine od poda (region 3) na slici 5.11) i blizu zida 2 na visini od oko 1,2 m od poda (region 4) na slici 5.11). Uvidom u dobijene rezultate prikazane na slici 5.11 možemo zaključiti da koncentracija torona merena aktivnim uređajima značajno zavisi od same pozicije instrumenta odnosno rastojanja od zidova i poda u prostoriji. Efektivna toronska difuziona dužina puta može biti aproksimirana sa eksperimentalnim najmanjim rastojanjem usisa instrumenta od zidova (5-15 cm), što je u dobrom slaganju sa rezultatima dobijenim (5-25

cm) u drugim studijama (Kolarž et al., 2017). Na osnovu toga što koncentracija torona naglo raste kada se instrumenti nalaze blizu poda (regioni 1) i 2)) može se zaključiti da je dominantan izvor torona zemlja ispod drvenog poda u sobi, naročito u blizini zida 2 što je predstavljeno na region 2) slike 5.11. Dobijene visoke koncentracije torona na tom mestu najverovatnije su posledica pukotina u konstrukciji poda, pa je samim tim veliki fluks torona na tom mestu. Dobijene manje vrednosti za uređaj RTM1688-2 u blizini zida 2 posledica su toga što usisni deo tog monitora nije bio na istoj poziciji kao i usisni deo monitora RAD7, tj. da je usis instrumenta RTM1688-2 bio udaljeniji od poda i zida (na visini od oko 30 cm od poda).



Slika 5.11. Uporedni prikaz dobijenih vrednosti koncentracije torona pomoću dva aktivna monitora RAD7 i RTM1688-2 za različite pozicije u sobi: 1) na podu blizu zida 1, 2) na podu u blizini zida 2, 3) centralna pozicija u sobi na visini 1m i 4) u blizini zida 2 na visini 1,2 m iznad poda.

Na kraju, poslednja etapa QA/QC merenja bila je određivanje toronovih potomaka u ispitivanoj sobi za različita vremena uzorkovanja vazduha (filteri F1, F2, F3 i F4 sa različitim vremenima  $t_s$  na slici 5.8b). Uporedo sa uzorkovanjem vazduha, vršena su i merenja torona sa aktivnim monitorom RPM2200. Usled činjenice da filterovanje vazduha ima velik uticaj na koncentraciju toronovih potomaka u vazduhu (velik protok pumpe i velika efikasnost filter papira, koji odstranjuje veliku količinu potomaka iz atmosfere), merenje uređajem RPM2200 vršeno je jedan sat pre usisavanja, tokom usisavanja i dva

sata nakon usisavanja vazduha. U prethodnim studijama dokazano je da se zatvorene prostorije sa stopom ventilacije od 0,5 do 1,2 h<sup>-1</sup> mogu koristiti za kalibraciju iz razloga što kalibracioni faktor ostaje konstantan (Mishra and Mayya, 2008; Zunic et al., 2017), što je takođe potvrđeno poređenjem sa teorijskim proračunima Jacobi i Nazaroff modela depozicije čestica (Mishra et al., 2009).

Kako bi se uporedile vrednosti EETC rezultata izračunat je modifikovani zeta score ( $z'_{score}$ ) korišćenjem sledeće formule:

$$z'_{score} = (EETC(RPM2200)_{av} - EETC(GAMMA\ metod)_{calculated}) / \sqrt{\sigma^2 + u^2}, \quad (5.21)$$

gde je  $EETC(RPM)_{av}$  aritmetička sredina RPM2200 očitana jedan sat pre i dva sata nakon usisavanja sa standardnom devijacijom  $\sigma$  i  $EETC(GAMMA\ metod)_{calculated}$  je izračunata vrednost EETC na osnovu GAMMA metoda sa greškom merenja  $u$ . Merna nesigurnost  $u$  ima malu vrednost zato što je posledica samo statističke greške ukupne površine ispod gama pika i nesigurnosti efikasnosti detekcije.

Tabela 5.1. Interkomparacija EETC rezultata i prikaz izračunatih vrednosti z i relativne greske.

Opis	EETC [Bq/m <sup>3</sup> ]			
	Filter F1	Filter F2	Filter F3	Filter F4
RPM2200 očitavanje - 1 h pre filtriranja:	7,59	7,84	12,96	6,37
RPM2200 očitavanje - 2 h nakon filtriranja:	9,53	8,43	6,15	6,32
Srednja vrednost RPM2200	8,56	8,14	9,56	6,34
Standardna devijacija $\sigma$	1,37	0,42	4,82	0,04
Vreme uzorkovanja $t_s$ (s)	7200	3600	1800	900
Izračunata EETC ( GAMMA metod)	8,16	7,62	8,73	5,19
Procenjena greška $u$ ( GAMMA metod)	0,16	0,13	0,12	0,17
Z vrednost:	0,67	0,80	0,23	0,59
Relativna greška	-6%	-6%	-9%	-18%

Dobijena je zadovoljavajuća zavisnost ( $z < 1$ ) između dva nezavisna metoda za određivanje EETC. Za najkraće vreme uzorkovanja (900 s) dobijeno je najveće odstupanje, relativna greška iznosi -18%. Na osnovu do sada razmatranih stavova kao i na osnovu ovih rezultata, optimalan odnos između registrovanih događaja pod pikom i vremena samog uzorkovanja, vreme uzorkovanja od 1 h može se koristiti kao standardno vreme uzorkovanja.

## 5.4 Rezultati i diskusija

Koncentracije torona  $C_{Tn}$  [ $Bq/m^3$ ], ravnotežne ekvivalentne koncentracije torona EETC [ $Bq/m^3$ ] i faktori ravnoteže  $F_{Tn}$  za 15 ispitivanih objekata i izračunate vrednosti za AED [ $mSv/yr$ ] i  $C_{total}$  [ $Bq/m^3$ ] prikazane su u tabeli 5.2.

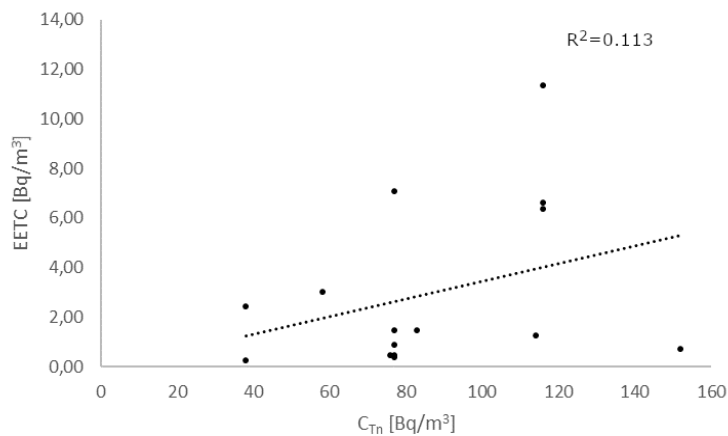
Tabela 5.2: Rezultati merenja koncentracije torona i EETC dobijene pomoću GAMMA metoda sa procenom doze i odnosom koncentracije torona i radona za 15 ispitivanih soba

Lokacija	$C_{Tn}$ [ $Bq/m^3$ ]	EETC [ $Bq/m^3$ ]	$F_{Tn}$	AED [ $mSv/yr$ ]	$C_{Tn}/C_{Rn}$	$C_{total}$ [ $Bq/m^3$ ]
SM1	77(10)	7,08(12)	0,092(12)	2,0(4)	0,41	205(19)
SM2	77(10)	1,46(8)	0,019(27)	0,41(8)	0,12	644(63)
SM3	38(8)	2,43(15)	0,064(14)	0,68(20)	0,11	346(34)
BP1	77(10)	0,40(6)	0,0052(10)	0,11(3)	0,12	684(67)
K2	38(8)	0,28(7)	0,0073(24)	0,078(23)	0,08	489(48)
P1	58(10)	3,02(12)	0,052(9)	0,85(21)	0,16	383(37)
SAJ1	76(10)	0,48(9)	0,0063(14)	0,134(25)	2,92	43(3)
BE1	152(12)	0,71(11)	0,0047(8)	0,200(23)	1,58	129(10)
DM1	114(10)	1,27(18)	0,0111(19)	0,36(4)	0,90	151(13)
TM1	77(10)	0,47(9)	0,0061(14)	0,132(24)	0,86	107(9)
KI2	83(10)	1,49(15)	0,0180(28)	0,42(7)	0,35	256(24)
SU7	116(11)	6,64(8)	0,057(5)	1,86(25)	0,37	341(32)
SU8	77(10)	0,89(9)	0,0116(19)	0,25(5)	0,17	472(46)
RAD1	116(10)	11,34(12)	0,098(8)	3,2(4)	0,14	846(82)
VR1	116(10)	6,36(19)	0,055(5)	1,78(22)	0,19	631(61)

Iz dobijenih rezultata može se videti da ravnotežna ekvivalentna koncentracija torona u 15 ispitivanih soba varira u opsegu od  $0,277 Bq/m^3$  do  $11,34 Bq/m^3$ . Aritmetička sredina EETC iznosi  $2,955 Bq/m^3$  što je u dobrom slaganju sa nedavno objavljenim rezultatima (Skeppström and Wåhlin, 2015). Najveća koncentracija torona izmerena je u staroj kamenoj planinskoj kući koja ima lošu izolaciju podova (lokacija RAD1).

S obzirom na to da je merenje koncentracije torona pomoću aktivnog monitora RAD7 vršeno uporedo sa usisavanjem vazduha pomoću uređaja za uzorokovanje vazduha F&J DFHV-1SE i da su uređaji radili jedan pored drugog, odnosno u isto vreme i u istim uslovima, bilo je moguće odrediti i faktor ravnoteže torona  $F_{Tn}$ . Vrednost  $F_{Tn}$  varirala je u opsegu od 0,0047 do 0,098 sa aritmetičkom sredinom od 0,0338. Dobijena srednja vrednost u dobrom je slaganju kako sa preporučenom UNSCEAR vrednošću od 0,02 i takođe sa vrednošću procenjene na osnovu velike baze podataka dugovremenskih merenja torona i njegovih potomaka od  $0,04 \pm 0,01$  (Hosoda et al., 2017).

Veza između aktivnosti koncentracije torona i EETC, računata GAMMA metodom, prikazana je na slici 5.12. Analiziranjem grafika može se zaključiti da varijable nisu linearno povezane, te se u takvim situacijama pribegava Spirmanovom neparametarskom testu korelacije. Sa druge strane obe varijable ne zadovoljavaju normalnu raspodelu i broj uzoraka je manji od 30. Pokretanjem Spirmanovog testa korelacije u programskom paketu SPSS, utvrđeno je da ne postoji statistički značajna povezanost između koncentracije torona i EETC, odnosno  $r_s=0,036$ ,  $p>0,05$ ,  $R^2=0,113$ . Disperzija vrednosti može da se objasni velikom zavisnošću koncentracije torona od trenutnih parametara okoline kao i brzine razmene vazduha (Meisenberg and Tschiersch, 2010) za svako mereno mesto kao i različite vrste kuća u kojim je ispitivanje vršeno.



Slika 5.12. Zavisnost između EETC i koncentracije torona.

Kao što se može videti u Tabeli 5.2, vrednosti izračunate doze AED za inhalaciju gasa torona variraju u opsegu od 0,078 mSv/yr do 3,2 mSv/yr sa srednjom vrednošću od 0,827 mSv/yr što se slaže sa do sada publikovanim rezultatima (Chen et al., 2011; Clouvas et al., 2006; Gierl et al., 2014; Mehra et al., 2016). Dobijene vrednosti niže su od preporučene godišnje doze za izlaganje stanovništva koja iznosi 10 mSv/yr, ali su u nekim slučajevima uporedive sa dozom koja potiče od radona. Odnos vrednosti koncentracije gasa torona i radona kreću se u opsegu od 0,08 do 2,92 sa srednjom vrednošću od 0,57, što je nešto više u poređenju sa odnosom koji je registrovan u slovenačkim kućama u opsegu od 0,11 do 0,72 (Vaupotic et al., 2008). Ustanovljene više koncentracije mogu da se objasne povišenim vrednostima torona u slojevima zemlje ispod kuće kao i prisustvom određenih građevinskih materijala kao mogućim izvorima torona koji dospeva u zatvorene prostorije. Ova studija je pokazala da uticaj torona nije zanemarljiv, naročito u slučajevima kada su izmerene koncentracije torona više od koncentracija radona. U



slučaju lokacije SAJ1, gde je odnos toron/radon približno jednak 3, određena ukupna koncentracija radona  $C_{tot}$  je bila uvećana za faktor 2 u odnosu na očekivanu. Ovo je naročito važno ukoliko se za merenje torona koriste detektori koji nemaju moć diskriminacije, kao pojedine vrste pasivnih detektora najčešće korišćenih za monitoring radona.

## **6. Simultana ispitivanja radona, torona i ravnotežnih ekvivalentnih koncentracija njihovih potomaka u porodičnoj kući – studija jednog slučaja**

Simultana ispitivanja radona, torona i ravnotežnih ekvivalentnih koncentracija njihovih potomaka korišćenjem tri različita aktivna radonska monitora su sprovedena i upoređena u realnim ambijentalnim uslovima u vremenskom periodu od dve nedelje. Interkomparacija aktivnih uređaja za merenje radona i torona je bila fokusirana na konzistentnost međusobno dobijenih rezultata, kao i na uticaj spoljašnjih uslova na ponašanje svakog detektorskog sistema. Dobijena statistički značajna korelacija između rezultata korišćenih aktivnih monitora potvrđuje, njihovu primenu za detekciju radona u toku remedijacije objekata sa povišenom koncentracijom radona i u proračunu primljene doze.

### **6.1. Uvod**

Kao što je do sada diskutovano, izlaganje radonu, toronu i njihovim potomcima daje veliki doprinos dozi koju primi stanovništvo tokom boravka u zatvorenim prostorijama. Detaljnija istraživanja posebno su potrebna na mestima tj. u prostorijama ili kućama gde su do sada već potvrđene povišene koncentracije radona. Poznato je da povišene koncentracije radona ili torona u zatvorenim prostorijama vode do povećane koncentracije radonovih i toronovih potomaka. Usled različitih vremena poluraspada radona i torona koji iznose 3,82 dana i 55,8 sekundi, respektivno, njihovo ponašanje u zatvorenim prostorijama nije isto. Distribucija radona u zatvorenim prostorijama je homogena, dok koncentracija torona eksponencijalno opada sa rastojanjem od toronskog izvora, što je najčešće zid ili pod prostorije. Međutim, ono što je interesantno jeste činjenica da se njihovi potomci u zatvorenim prostorijama ponašaju vrlo slično, kao posledica njihovih relativno dugih perioda poluraspada.

Prema direktivi EU, koja govori o osnovnim bezbednosnim standardima za zaštitu od izlaganja jonizujućem zračenju (The Council of the European Union, 2013) sve zemlje članice unije (kao i zemlje koje su kandidati za pristup uniji) treba da uvedu referentni

nivo za koncentraciju radona u zatvorenim prostorijama (u stambenim i radnim prostorima) na  $300 \text{ Bq/m}^3$ , kao i akcioni plan za kontrolu izlaganja radonu u zatvorenim prostorijama. Kao posledica toga, u prostorijama gde je koncentracija radona blizu ili viša od referentnog nivoa potrebna su kratkotrajna merenja kontinualnim aktivnim monitorima kao i dugotrajna merenja nekim od pasivnih metoda (Denman et al., 2004). U procesu remedijacije takvih stambenih ili poslovnih objekata potrebno je koristiti neku od aktivnih tehnika kako bi se pronašli putevi ulaska radona i torona u takve prostorije. Korišćenje isključivo pasivnih detektorskih sistema u procesu remedijacije nije preporučljivo jer pasivni detektorski sistemi mogu uneti veliku grešku usled lošeg rukovanja ili lošeg postavljanja detektora. Pored toga problem kod pasivnih detektora je što oni usrednjavaju izmerene vrednosti, tako da se ne mogu koristiti za identifikaciju izvora radona, tj. puteve ulaska.

Opsežno istraživanje radona i torona obavljeno je u jednoj porodičnoj kući, u sobi u kojoj je prethodnim merenjima ustanovljeno da koncentracija radona prelazi vrednost od  $400 \text{ Bq/m}^3$ , što predstavlja interventni nivo srednje godišnje koncentracije radona u postojećim objektima na teritoriji Srbije prema nacionalnoj regulativi (Pravilnik o granicama izlaganja jonizujućim zračenjima i merenjima radi procene nivoa izlaganja jonizujućim zračenjima ("Sl. glasnik RS", br. 86/2011 i 50/2018)). Prethodna merenja vršena su pasivnim detektorskim sistemima: trag detektorima CR-39 i ugljenim kanisterima. Ova istraživanja su proistekla iz potrebe za boljim razumevanjem ponašanja radona, torona i njihovih potomaka tokom dužeg vremenskog perioda u kontrolisanim uslovima jedne sobe. Jednačinom (4.1) definisani su faktori ravnoteže radona i torona.

## **6.2. Merni uređaji**

U ovom istraživanju korišćeni su sledeći aktivni monitori: AlphaGuard PQ2000, RPM2200, RTM1688-2 i RAD7. U poglavljima 5.2.1, 5.2.2 i 5.2.3. objašnjeni su principi rada uređaja RAD7, RTM 1688-2 i RPM2200, respektivno.

### **6.2.1. Aktivni uređaj AlphaGuard PQ2000 PRO**

Aktivni monitor AlphaGuard PQ2000 PRO sa dodatkom Alpha PM predviđen je za kontinualno merenje koncentracije  $^{222}\text{Rn}$  i njegovih potomaka u vazduhu, vodi ili zemljištu. U ovom istraživanju korišćena je eksperimentalna postavka za kontinualna merenja u vazduhu, sa očitavanjem vredosti na svakih sat vremena. Uređaj radi na

principu pulsne jonizacije komore velike efikasnosti detekcije, sa širokim opsegom merenja (od 2-200000 Bq/m<sup>3</sup>) i sa brzim odgovorom na promene koncentracije radona. Aktivna zapremina jonizacije komore iznosi 0,56 litara (User Manual, 2012). Monitor je korišćen u difuzionom modu, sa filterom od staklenih vlakana koji sprečavaju ulazak radonovih potomaka, a dozvoljavaju gasu radonu slobodan prolazak u aktivnu zapreminu detektora. Pored merenja koncentracija radona AlphaGuard 2000 PQ PRO monitor je opremljen i sa sensorima koji kontinualno prate meteorološke parametre (pritisak, temperaturu i relativnu vlažnost vazduha).

Za merenje koncentracije radonovih potomaka u vazduhu korišćen je dodatak za AlphaGuard pod nazivom AlphaGuard PM koji radi na principu detekcije alfa čestica poreklom od <sup>218</sup>Po i <sup>214</sup>Po. Prikaz eksperimentalne postavke monitora AlphaGuard za merenje koncentracije aktivnosti radona i njegovih potomaka dat je na slici 6.1.



Slika 6.1. Šematski princip rada monitora AlphaGuard PQ2000 PRO sa dodatkom za merenje radonovih potomaka AlphaGuard PM.

### 6.3. Metodologija merenja

Simultana merenja koncentracije radona ( $C_{Rn}$ ), torona ( $C_{Tn}$ ), ravnotežne ekvivalentne koncentracije radona (EERC) i ravnotežne ekvivalentne koncentracije torona (EETC) u realnim ambijentalnim uslovima zatvorene sobe sa slabom ventilacijom ( $<0.5 \text{ h}^{-1}$ ) izvršena su tokom perioda od dve nedelje novembra 2018. godine. Soba je zapremine od oko 75 m<sup>3</sup>, i deo je stare kuće građene od cigle i čerpića sa drvenim podom i prozorima. Ispod drvenog poda nema izlivena betonske konstrukcije. Ispitivana kuća nalazi se u predgrađu grada Novog Sada, na teritoriji Petrovaradina. U ovoj studiji korišćeno je više različitih aktivnih uređaja: AlphaGuard PQ2000 PRO za određivanje koncentracije radona i EERC, RTM1688-2 za određivanje koncentracije radona i torona, RPM2200 za određivanje EETC i EERC, i RAD7 za određivanje koncentracije radona i torona u prostoriji. Aktivni

monitori su opremljeni sensorima za očitavanje temperature, pritiska i vlažnosti vazduha, tako da su i ti podaci bili praćeni tokom merenja.

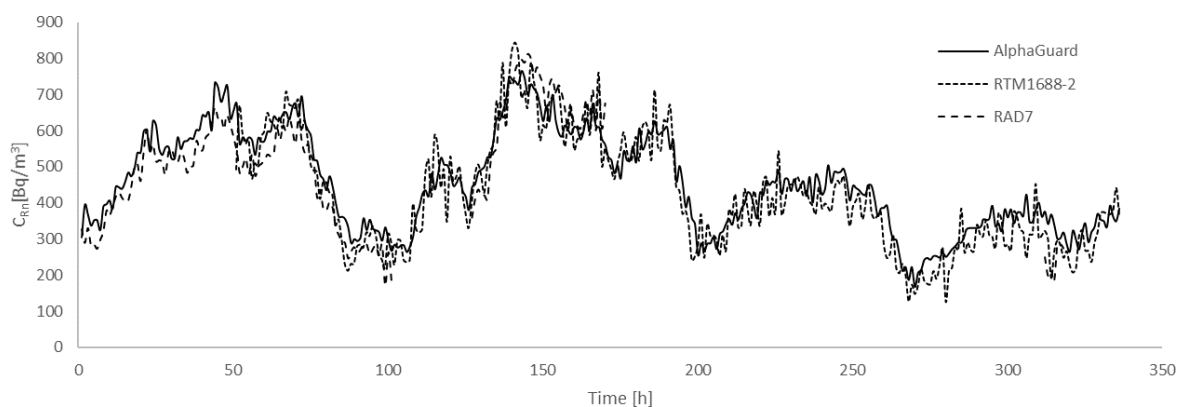
## 6.4. Rezultati merenja i diskusija

Deskriptivna statistika kontinualnih uporednih merenja koncentracije radona  $C_{Rn}$  [ $Bq/m^3$ ] i torona  $C_{Tn}$  [ $Bq/m^3$ ], ravnotežne ekvivalentne koncentracije radona EERC [ $Bq/m^3$ ] i torona EETC [ $Bq/m^3$ ] i ravnotežnog faktora za radon  $F_{Rn}$  i toron  $F_{Tn}$  prikazana je u tabeli 6.1. Podaci su očitavani na svakih sat vremena, a prva tri merenja svakog uređaja su isključena iz obrade podataka.

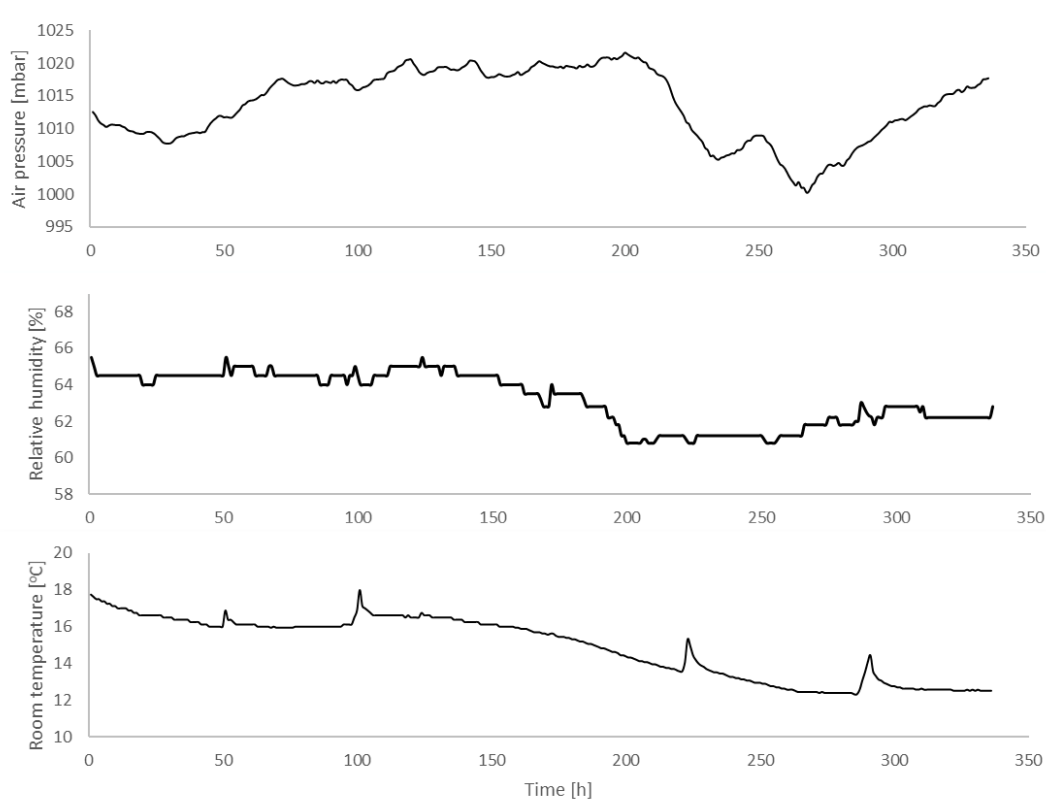
Tabela 6.1. Deskriptivna statistika (minimalne (Min) i maksimalne (Max) vrednosti, aritmetička sredina (AM) i geometrijska sredina (GM) sa greškama) za  $C_{Rn}$ ,  $C_{Tn}$ , EERC, EETC,  $F_{Rn}$  i  $F_{Tn}$  za korišćene aktivne monitore.

Monitor		$C_{Rn}$ [ $Bq/m^3$ ]	$C_{Tn}$ [ $Bq/m^3$ ]	EERC [ $Bq/m^3$ ]	EETC [ $Bq/m^3$ ]	$F_{Rn}$	$F_{Tn}$
AlphaGuard PQ2000 PRO sa AlphaPM	Min	167	-	26	-	0.07	-
	Max	766	-	266	-	0.41	-
	AM	473±136	-	130±50	-	0,28±0,05	-
	GM	449,4±1,4	-	125,1±1,6	-	0,27±1,23	-
RTM 1688-2 sa RPM2200	Min	153	18	22	3,3	0,07	0,046
	Max	844	219	323	94,2	0,60	1,04
	AM	430±153	64±35	125±64	23±18	0,24±0,09	0,32±0,26
	GM	402±1,4	53,4±1,7	100±1,8	16,9±2,2	0,26±1,4	0,23±2,2
RAD7	Min	171	2,17	-	-	-	-
	Max	870	178	-	-	-	-
	AM	549±163	39±40	-	-	-	-
	GM	520,8±1,4	22±3	-	-	-	-

Poređenje kontinualnih merenja koncentracije radona u ispitivanoj sobi pomoću uređaja AlphaGuard, RTM1688-2 i RAD 7 prikazani su na slici 6.2. Uređaj RAD7 bio je aktivan tokom prvih 170 h merenja. Ambijentalni uslovi, kao što su pritisak, relativna vlažnost i temperatura prikazani su grafički na slici 6.3. Sa slike 6.3. može se zaključiti da tokom perioda testiranja od dve nedelje nije dolazilo do većih odstupanja u temperaturi i relativnoj vlažnosti vazduha, jedina značajna varijacija bila je registrovana za atmosferski pritisak koji je varirao u opsegu od 1000,17 do 1021,59 mbar.



Slika 6.2. Vremenska zavisnost  $C_{Tn}$  merena kontinualno pomoću tri aktivna monitora.



Slika 6.3. Vremenska zavisnost temperature, relativne vlažnosti i pritiska vazduha tokom perioda merenja.

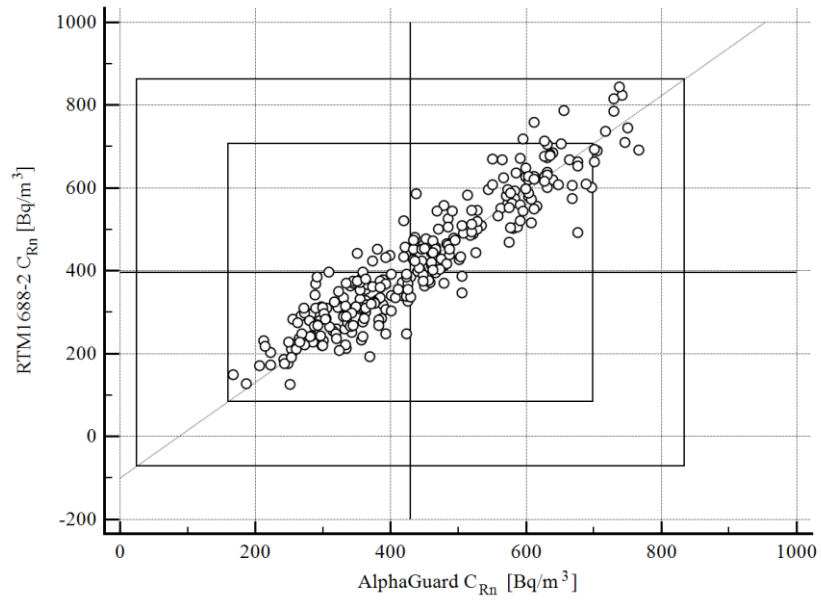
U cilju ispitivanja korelacije koncentracije radona i atmosferskih parametara (temperature, pritiska i relativne vlažnosti) korišćen je Pirsonov test korelacije (Prilog 3). Shapiro – Wilk's W test za testiranje normaliteta distribucije je pokazao da varijable imaju normalnu distribuciju ( $p > 0,05$ ) i konstatovano je nepostojanje outlier-a. Utvrđena je pozitivna umerena povezanost koncentracije radona i temperature ( $r = 0,532$ ,  $p < 0,0005$ ), slaba pozitivna povezanost koncentracije radona i atmosferskog pritiska ( $r = 0,304$ ,

$p < 0,0005$ ) i pozitivna povezanost koncentracije radona i relativne vlažnosti vazduha u prostoriji ( $r = 0,497$ ,  $p < 0,0005$ ). Na osnovu koeficijenta determinacije utvrđenog korelacijom koncentracije radona i temperature, može se zaključiti da varijacija vrednosti temperature sa 28 % utiče na promenu koncentracije radona. S obzirom da postoji višestruka korelacija između zavisne i nezavisnih varijabli, primenom metoda multiple regresije ustanovljena je statistička značajnost modela. Ovaj model daje najbolje moguće predviđanje vrednosti zavisne varijable na osnovu vrednosti nezavisnih. Na osnovu veličina regresionih koeficijenata može se utvrditi koliki je relativni uticaj svake nezavisine varijable konvertovanjem tih koeficijenata u beta-koeficijente. Višestruka regresija je pokazala statističku značajnost modela vrednosti koncentracije radona u zavisnosti od temperature, pritiska i vlažnosti vazduha kao kriterijuma odnosno prediktora,  $F(3,329) = 46,275$ ,  $p < 0,0005$ . Na osnovu beta koeficijenta (Tabela 6.2.) možemo zaključiti da najveći doprinos modelu daje varijabla temperatura sa udelom od 34,7%, zatim vlažnost vazduha 17,1% i pritisak 8,0%.

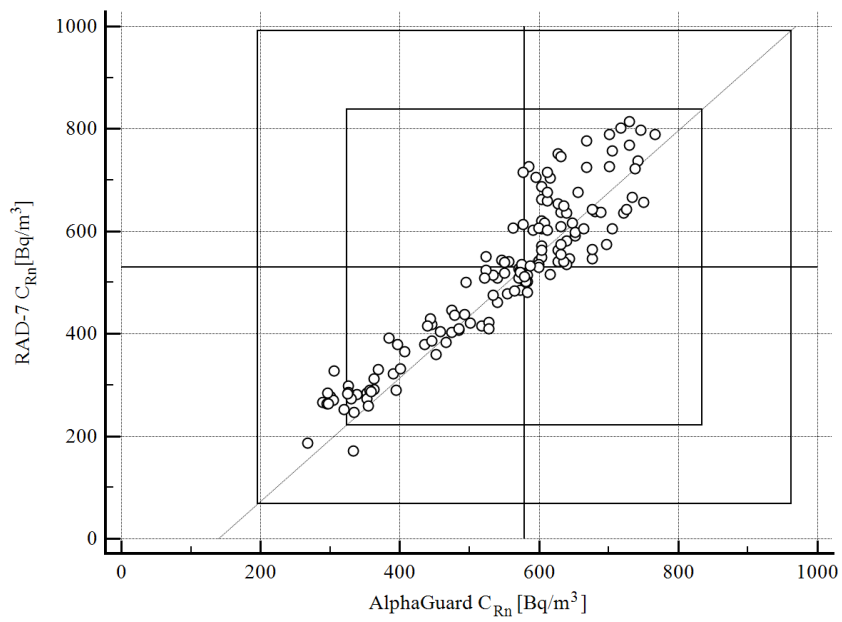
Tabela 6.2. Izveštaj multiple regresione analize,  $p < 0,05$

Model	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients
	B	Std.Error	Beta
1 (Constant)	-3208.288	1355.893	
Temperature	28.216	7.363	0.347
Pressure	2.201	1.279	0.089
Humidity	16.033	8.150	0.171

Youden grafik koristi se kako bi se ispitala međulaboratorijska poklapanja za merenje iste veličine različitim tehnikama ili različitim instrumentima. Pošto u merenjima nije bilo ponovljenih merenja, rezultati se mogu predstaviti modifikovanim Youden grafikom (Slika 6.4, Slika 6.5 i Slika 6.6) koji lako identifikuje sistematske ili slučajne greške merenja. Unutrašnji kvadrat na grafiku predstavlja odstupanja  $\pm 2\sigma$ , a spoljašnji odstupanja od  $\pm 3\sigma$ . Sve merene vrednosti koje upadaju u površinu spoljašnjeg kvadrata smatraju se prihvatljivim. Tačke koje leže u blizini linije koja se nalazi pod uglom od  $45^\circ$ , a izvan unutrašnjeg kvadrata predstavljaju sistematske greške, koje su najčešće uzrokovane različitom osetljivošću instrumenata na uslove sredine, naročito vlažnost. Tačke koje bi se nalazile daleko od linije  $45^\circ$  predstavljale bi slučajne greške, međutim, kao što se vidi na graficima, u ovim merenjima nisu se javljale slučajne greške.

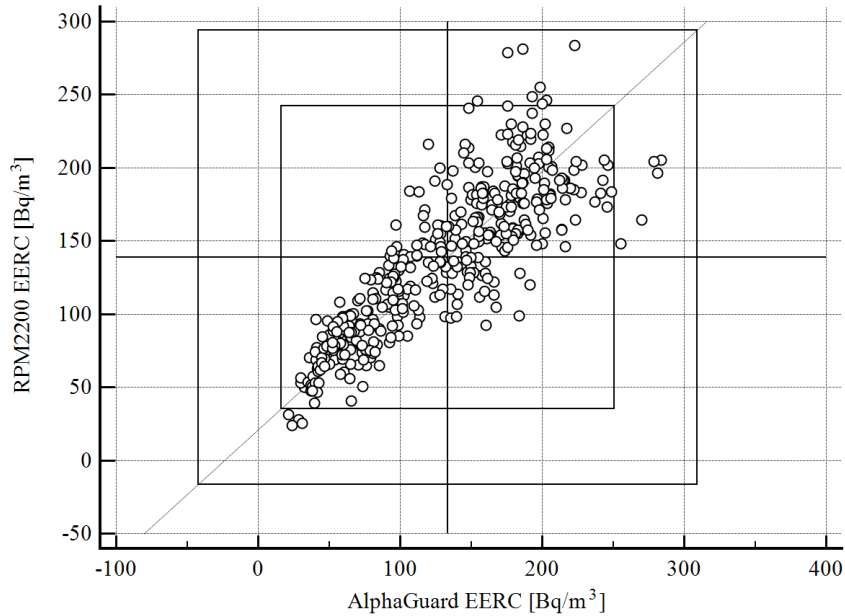


Slika 6.4. Youden grafik koncentracije gasa radona merene monitorima RTM1688-2 i AlphaGuard.



Slika 6.5. Youden grafik koncentracije gasa radona merene monitorima RAD7 i AlphaGuard.

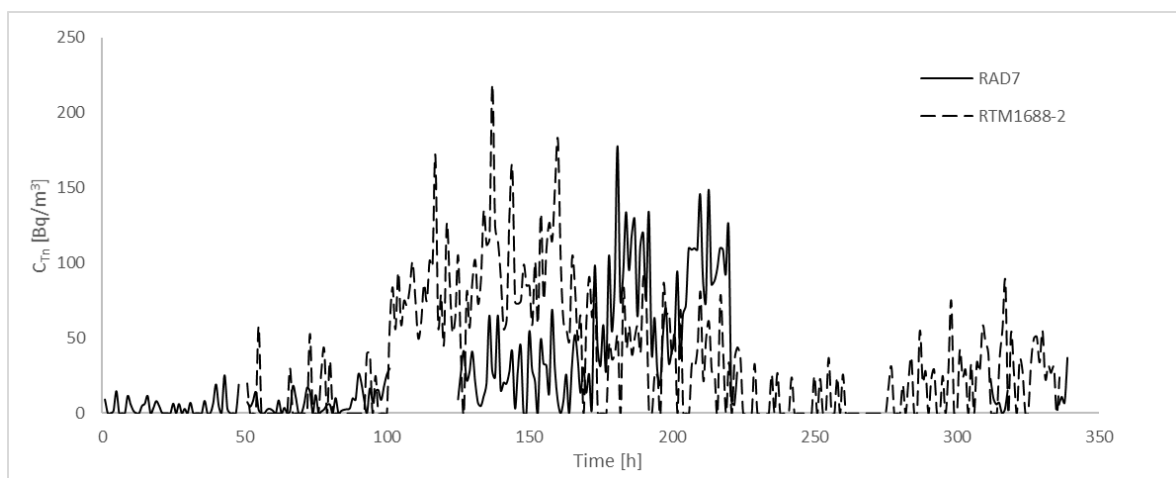




Slika 6.6. Youden grafik ravnotežne ekvivalentne koncentracije radon (EERC) merene monitorima RPM2200 i AlphaGuard.

Monitori RAD7 i RTM1688-2 imaju mogućnost da istovremeno mere koncentraciju radona ( $C_{Rn}$ ) i koncentraciju torona ( $C_{Tn}$ ) u vazduhu zatvorenih prostorija (Slika 6.7.). Merenje koncentracije torona u zatvorenim prostorijama nije tako jednoznačno kao merenje koncentracije radona i veoma zavisi od pozicije instrumenta u sobi tokom merenja. Koncentracija torona eksponencijalno opada sa rastojanjem od potencijalnih izvora (zidovi, pod itd.) (Skeppström and Wåhlin, 2015; Urosevic et al., 2008). Iz tog razloga, kako bi se ispitali potencijalni izvori torona u ispitivanoj prostoriji, izvedena su simultana merenja koncentracije gasa torona aktivnim monitorima RAD7 i RTM1688-2, na nekoliko različitih pozicija u sobi. Prvih 48 h merenja operabilan je bio samo monitor RAD7 koji se nalazio na visini od 1 m od poda i na 30 cm od zida, sledećih 48 h radila su simultano oba monitora, RAD7 na istoj poziciji, a RTM1688-2 na centralnoj poziciji sobe na visini 1m od poda. Nakon toga sledećih 24 h radio je samo RTM1688-2 monitor na podu sobe na minimalnom rastojanju od prvog zida (oko 15 cm), sledećih 48 h RAD7 i RTM1688-2 radili su uporedo, jedan pored drugog, na prethodnoj poziciji, i na najmanjem rastojanju od prvog zida, zavisno od konstrukcije uređaja (za RAD7 minimalno rastojanje od zida je oko 5 cm, a za RTM1688-2 je oko 15 cm). Sledećih 48 h oba monitora premeštena su do drugog zida i postavljena na pod, sledećih 64 h radio je samo monitor RTM1688-2 i to na centralnoj poziciji u sobi na visini od oko 1 m od poda i poslednjih 48 h, oba monitora su radila jedan pored drugog, na minimalnom rastojanju od drugog zida ali na visini od oko

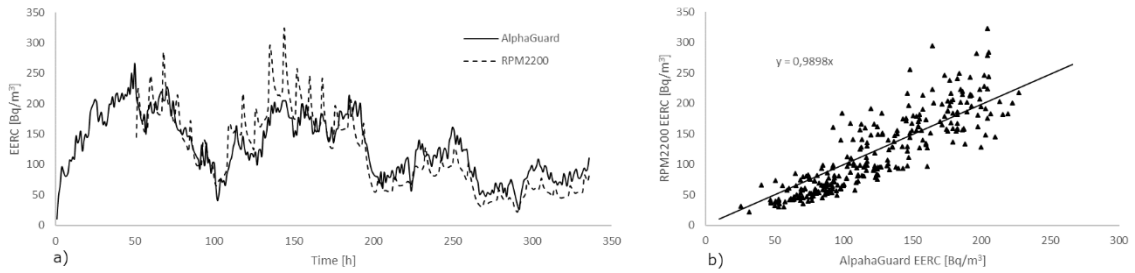
1,2 m od poda. Celokupno merenje prikazano je na slici 6.7. Najveće vrednosti koncentracije torona registrovane su kada su se instrumenti nalazili na podu, posebno u blizini drugog zida, te dolazimo do zaključka da je dominantan izvor torona u sobi zemlja ispod drvenog poda. Velike razlike u merenjima RAD7 i RTM1688-2 monitora mogu se objasniti različitim rastojanjem usisnih ulaza instrumenata od poda tokom merenja, usis RAD7 monitora nalazi se na odvlaživaču i na oko 5 cm od poda dok je kod RTM1688-2 usis na samom instrumentu i nalazi se na oko 30 cm od poda. Rezultati potvrđuju da ukoliko se detektorski sistem postavi na rastojanju manjem od 10 cm od zida, merena koncentracija torona predstavlja uglavnom ekshalaciju iz zida, odnosno građevinskog materijala (Gulan et al., 2012; Meisenberg and Tschiersch, 2010).



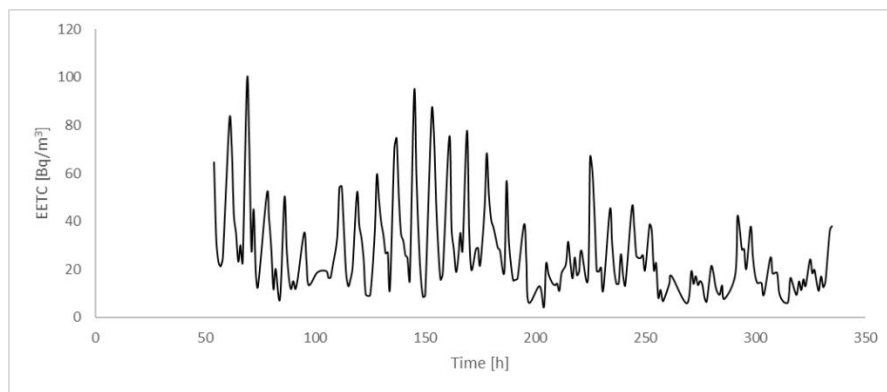
Slika 6.7. Poređenje koncentracije torona ( $C_{Tn}$ ) u ispitivanoj sobi mereno pomoću RAD7 i RTM1688-2 aktivnih monitora.

Uporedna merenja ravnotežne ekvivalentne koncentracije radona (EERC) merena pomoću AlphaGuard i RPM2200 prikazana su na slici 6.8. Linearni koeficijent korelacije dobijenih vrednosti merenja pomoću AlphaGuard i RPM2200 iznosi 0,9898 što govori u prilog dobrom slaganju rezultata dobijenih pomoću dva različita aktivna monitora. Uporedo sa merenjem EERC, monitor RPM2200 merio je i vrednosti ravnotežne ekvivalentne koncentracije torona (EETC) (Slika 6.9) Analizom grafika može se zaključiti da vrednosti EERC i EETC imaju isti trend. Međutim, na slici 6.9 se vidi da za vrednosti EETC postoje periodične varijacije na svakih 5 - 6 sati. Razlog tih varijacija je posledica rada monitora u diferencijalnom modu koji daje očitavanja na svakih sat vremena. Rezultati bi se značajno popravili ukoliko bi vremenska rezolucija detektora bila podešena na svakih 5 sati, npr. jer je toliko potrebno da dođe do saturacije aktivnosti  $^{212}\text{Po}$  toronovog potomka koji je u stvari glavni alfa emiter za određivanje EETC. Vrednost

odnosa EETC i EERC sa aritmetičkom sredinom od 0,215 je u dobrom slaganju sa publikovanim vrednostima (Jílek et al., 2010).

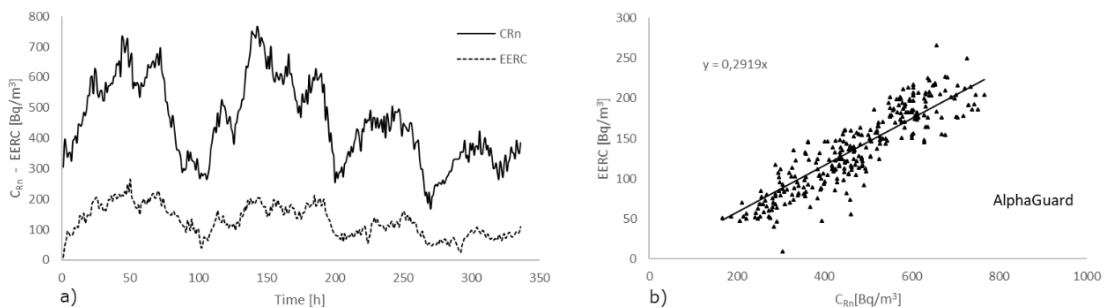


Slika 6.8. Vremenska varijacije EERC merene pomoću AlphaGuard i RPM2200 - levo i linearna korelacija dobijenih rezultata – desno.

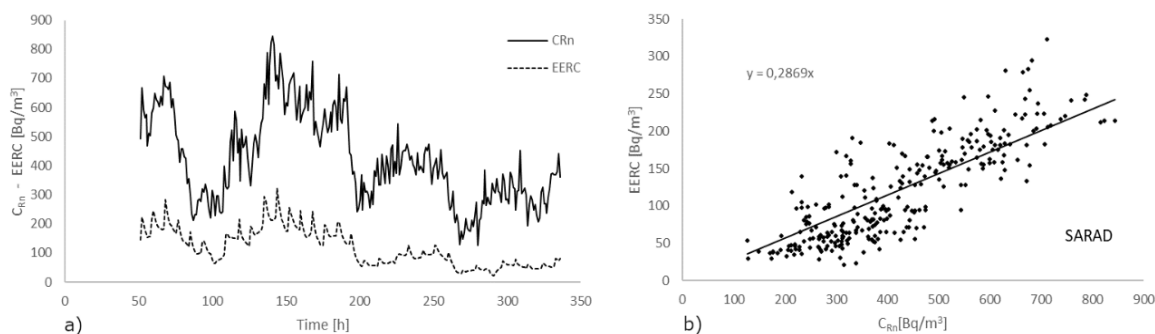


Slika 6.9. Varijacija vrednosti EETC merenih RPM2200 aktivnim monitorom.

Na slikama 6.10 i 6.11 prikazane su vrednosti vremenske varijacije koncentracije radona i EERC, merenih pomoću AlphaGuard i (RTM1688-2 i RPM2200) monitora, respektivno. Na osnovu dobijenih rezultata može se zaključiti da obe koncentracije ( $C_{Rn}$  i EERC) imaju isti trend porasta i opadanja za oba monitora.



Slika 6.10.. Vremenske varijacije  $C_{Rn}$  i EERC merene pomoću AlphaGuard monitora – levo i linearna korelacija dobijenih vrednosti – desno.



Slika 6.11. Vremenska varijacija  $C_{Rn}$  i EERC merenih pomoću SARAD monitora (RTM1688-2 i RPM2200) – levo i linearna korelacija dobijenih vrednosti – desno

Dobra korelacija između koncentracije radona i EERC, posledica je stabilnih uslova atmosfere u ispitivanoj sobi. Dobijene vrednosti za  $F_{Rn}$  pomoću oba monitora imaju slične vrednosti,  $0,28 \pm 0,05$  za AlphaGuard i  $0,24 \pm 0,09$  za SARAD monitore i u dobrom su slaganju sa UNSCEAR vrednošću od 0,4 (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 2000). Pošto se ispitivana kuća nalazi u neurbanom delu, još bolje poklapanje rezultata dobijeno je u odnosu na publikovane rezultate za kuće u Evropi gde je vrednost o 0,4 data za gradove, a 0,32 za sela i neurbana područja.

U cilju utvrđivanja povezanosti koncentracije radona, torona i njihovih potomaka pokrenut je Pirsonov test korelacije za varijable sa normalnom raspodelom (Prilog 3). Utvrđena je statistički značajna ( $p < 0,05$ ) pozitivna višestruka korelacija između vrednosti  $C_{Rn}$ ,  $C_{Tn}$ , EERC i EETC za AlphaGuard i SARAD monitore (Tabele 6.3. i 6.4.). Slaba pozitivna korelacija koncentracije torona i EETC se može objasniti činjenicom da je određivanje koncentracije torona jako zavisno od položaja monitora u prostoriji, što nije slučaj za homogeno raspoređene toronove potomke.

Tabela 6.3. Pirsonova korelacija ispitivanih promenljivih – AlphaGuard

	$C_{Rn}$	EERC	EETC
EERC	0,864**		
EETC	0,406**	0,402**	
$C_{Tn}$	0,386**	0,435**	0,124*

\*\* korelacija je značajna na nivou 0,01

\* korelacija je značajna na nivou 0,05

Tabela 6.4. Pirsonova korelacija ispitivanih promenljivih – SARAD monitori (RTM1688-2 i RPM2200)

	C <sub>Rn</sub>	EERC	EETC
EERC	0,850**		
EETC	0,411**	0,402**	
C <sub>Tn</sub>	0,421**	0,435**	0,124*

\*\* korelacija je značajna na nivou 0,01

\* korelacija je značajna na nivou 0,05

## **7. Procena radonskog potencijala i statistička obrada parametara koji potencijalno utiču na koncentraciju radona**

Sprovedena su sveobuhvatna ispitivanja zemljišta i vazduha, različitim tehnikama i mernim uređajima na 16 lokacija u urbanim i seoskim sredinama na teritoriji Srbije. Pored detaljnog ispitivanja koncentracije radona, torona i njihovih potomaka u vazduhu zatvorenih prostorija, vršena su i merenja koncentracije radionuklida u zemljištu gama-spektrometrijskom metodom, ispitan je granulometrijski sastav zemljišta i merena emanacija radona i torona u zemljištu aktivnim monitorom. Za evaluaciju podataka korišćena je SPSS statistička obrada podataka, a sve u cilju identifikacije prediktora koji utiču na koncentraciju radona u zemljištu i vazduhu zatvorenih prostorija. Procenjena je vrednost geogenog radonskog potencijala datih lokacija. Osnovna prednost primenjenog koncepta je nezavisnost radonskog rizika od antropogenog uticaja i konstantnost u geološkim vremenskim skalama.

### **7.1. Uvod**

Terestrijalna radioaktivnost široko je rasprostranjena u kori Zemlje, najprisutniji radionuklid je  $^{40}\text{K}$  kao i članovi sva tri prirodna radioaktivna niza  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  i  $^{235}\text{U}$ . Kao produkt sva tri prirodna radioaktivna niza javlja se po jedan izotop radona ( $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{220}\text{Rn}$  i  $^{219}\text{Rn}$ ) i svi pripadaju kategoriji plemenitih gasova, i kao takvi, lako mogu migracijom da napuste Zemljinu koru i nađu se slobodni u atmosferi. Usled suviše kratkog perioda poluraspada radonovog izotopa aktinona  $^{219}\text{Rn}$  od svega 3,96 s, njegov uticaj je zamemarljiv te njega nećemo uzimati u obzir. Uticaj nekoliko parametara kao što su: sastav zemljišta, građevinski materijali, prisustvo pukotina u dubljim slojevima zemljišta, kao i životne navike ukućana, može dovesti do povišenih koncentracija radona, torona i njihovih potomaka u zatvorenim prostorijama. U prethodnim poglavljima već smo dokazali da je uticaj na dozu koju prima stanovništvo od torona i njegovih potomaka u nekim slučajevima jednak ili čak i veći od doze koja potiče samo od udisanja radona.

Proces migracije gasovitih radionuklida iz kore Zemlje je složen i zavisi od nekoliko parametara kao što su: permeabilnost zemljišta, prisustvo pukotina, temperatura, pritisak i drugi parametri sredine. Mesta na kojima se češće javljaju prostorije sa povišenim koncentracijama radona zovu se radonu sklona područja (radon-priority area) (Bohicchio et al., 2017; Council of the European Union, 1996). Koncept Radonu sklonih područja kvalitativno se definiše kao: područja gde su detektovane ili očekivane vrednosti varijabli povezanih sa koncentracijom  $^{222}\text{Rn}$  veće u odnosu na referentne vrednosti ili srednje vrednosti u tom domenu (Bossey et al., 2013). Radonu sklona područja uobičajeno se definišu na dva načina, prvi je direktnim merenjem koncentracije radona u zatvorenim područjima, a drugi je indirektnim metodama kao što je ispitivanje radona u zemljištu, procena gama doze zasnovana na gama spektrometriji, a sve u cilju iznalaženja načina transporta gasovitih radionuklida iz kore Zemlje u unutrašnjost objekata (Dubois and Bossey, 2006; García-Talavera et al., 2013). Radonske mape koje imaju za cilj da se označe radonu sklona područja u Evropi najčešće se definišu preko merenja koncentracije radona u zatvorenim prostorijama i geoloških parametara, kao što je to u Velikoj Britaniji (Miles and Appleton, 2005) i Belgiji (Cinelli et al., 2011) ili preko merenja koncentracije radona u zemljištu kao što je to rađeno u Nemačkoj (Kemski et al., 2001) i Republici Češkoj (I. Barnet, P. Pacherova, 2008b).

U ovom istraživanju sprovedena su sveobuhvatna merenja na terenu na 16 lokacija, uglavnom na području Vojvodine, kako bi se ispitao potencijalni rizik od radona, odnosno radonski potencijal. Na svakoj lokaciji vršen je niz merenja različitih parametara koji bi potencijalno mogli da utiču na radonski potencijal. Predloženi radonski potencijal u daljem tekstu zasnovan je na proceni radonskih indeksa koje je predložio Barnet u Republici Češkoj (I. Barnet, P. Pacherova, 2008b). Osnovni princip ove metode bazira se na permeabilnosti zemljišta procenjene na osnovu granulometrijskog sastava zemljišta i prisustva koncentracije radona u zemljištu. Prednost ove metode je što se bez merenja koncentracije radona u zatvorenim prostorijama može dobiti informacija o radonskom potencijalu i na taj način predvideti potencijalna koncentracija radona u zatvorenim prostorijama, čak i pre gradnje nekih objekata. Predloženi metod se može primeniti u svrhu skrininga područja na kojima se planira gradnja.

## 7.2. Merne tehnike

U ovom istraživanju korišćen je aktivni uređaj RAD7 u eksperimentalnoj postavci za merenje koncentracije radona i torona u vazduhu i zemljištu, princip rada i eksperimentalna postavka monitora RAD7 za merenje koncentracije radona i torona u vazduhu objašnjen je u poglavlju 5.2.1. Pored RAD7 kao aktivnog detektora korišćeni su i ugljeni kanisteri i trag detektori CR-39 kao pasivni detektori koncentracije radona u zatvorenim prostorijama. Granulometrijski sastav zemljišta određen je pomoću MALVERN MASTERSIZER 2000, a sadržaj radionuklida u uzorcima zemljišta određen je gama-spektrometrijskom metodom. Statistička obrada rezultata izvršena je programom SPSS za statističku obradu.

### 7.2.1. Ugljeni kanister

Pasivni ugljeni kanister je metalni kanister ispunjen aktivnim ugljem i pogodan je za adsorpciju radona iz vazduha zahvaljujući velikoj slobodnoj površini i poroznoj strukturi aktivnog uglja. Prečnik kanistera je oko 10 cm i ispunjen je sa oko 70g aktivnog uglja. Kanisteri se izlažu 48 h i nakon toga određuje se koncentracija radona u vazduhu gama spektrometrijskom metodom. Nakon adsorpcije radona u aktivnom uglju, on se raspada, a njegovi potomci  $^{214}\text{Pb}$  i  $^{214}\text{Bi}$  ostaju kao neisparljivi. Aktivnost koncentracije radona određuje se iz relativnih intenziteta 4 gama linije koje se emituju od kratkoživećih radonovih potomaka  $^{214}\text{Pb}$  (295 keV i 352 keV) i  $^{214}\text{Bi}$  (609 keV i 1764 keV). Gama spektrometrijska merenja vršena su na HPGe ili NaI(Tl) detektorskim sistemima, a vreme merenja tipično iznosi 3000 s. Kalibracija efikasnosti spektrometarskog sistema rađena je prema EPA standardnoj metodi pomoću izvora radijuma u istoj geometriji kanistera. Deljenjem ukupnog odbroja sa poznatom aktivnošću standarda, određuje se efikasnost detektora (Grey, D.J., Windham, 1987).

U realnim uslovima, efikasnost adsorpcije ugljenih kanistera zavisi od vremena izlaganja i mora biti korigovana na prisustvo vlage (razlika u masi kanistera pre i nakon izlaganja). Ukoliko je period izlaganja veći od 48h, inicijalni kalibracioni faktor ( $CF$ ) mora biti korigovan za faktor prilagođavanja ( $AF$ ).  $AF$  faktor zavisi od prisustva vlage u uzorku pa se zato koriste i tri različite krive za različite procenete prisustva vlage (20 %, 50% i 80 %). 20 % vlage odgovara razlici mase pre i nakon izlaganja koja je < 1 g, 50 % odgovara razlici mase od 1-4 g i 80% odgovara razlici mase >4 g. Aktivnost koncentracije radona računa se na osnovu formule:



$$RN = \frac{I - I_f}{T_s \cdot E \cdot CF \cdot DF} \quad (7.1)$$

gde je  $RN$  koncentracija radona [ $Bq/m^3$ ],  $I$  intenzitet gama linija 295, 352 i 609 keV [odbroj/s],  $I_f$  fon spektra [odbroj/s],  $T_s$  vreme ekspozicije,  $E$  efikasnost detekcije [odbroj/(ks Bq)],  $CF$  kalibracioni faktor [l/min] ili [ $m^3/ks$ ] i  $DF$  korekcija na raspad. Korekcija na raspad  $DF$  određuje se sledećom jednačinom:

$$DF = e^{\frac{0.693 t}{T_{1/2Rn}}} \quad (7.2)$$

gde je  $t$  vreme u danima od sredine vremena izlaganja do početka merenja, a  $T_{1/2Rn}$  period poluraspada radona (3,824 dana).

### 7.2.2. Trag detektor CR-39

Trag detektori spadaju u klasu pasivnih detektora za određivanje koncentracije radona u vazduhu zatvorenih prostorija. Osnovni princip rada zasnovan je na difuziji radona u aktivnu zapreminu detektora gde se nalazi plastični film od alil-diglikol-karbonata (komercijalne oznake CR-39) površine  $1 \times 1$  cm. Prolaskom alfa čestica, nastalih raspadom radona, kroz polimerne lance plastičnog filma formiraju se tragovi oštećenja kao posledica jonizacije koji se elektrohemijским nagrizanjem fiksiraju i postaju vidljivi. Nakon toga, automatski ili pomoću mikroskopa određuje se gustina tragova po jedinici površine, koja množenjem sa odgovarajućim kalibracionim faktorom daje koncentraciju aktivnosti radona u zatvorenim prostorijama. Prednost metode trag detektora leži u tome što aktivna zapremina detektora nije osetljiva na klimatske promene i jačinu svetlosti i što rezultat koji se dobije najbolje reprezentuje srednju godišnju koncentraciju radona u zatvorenim prostorijama. Greške koje mogu da se jave prilikom određivanja koncentracije radona nastaju ukoliko se detektorom loše rukuje, odnosno ukoliko se neadekvatno postave tokom izlaganja. Prilikom postavljanja detektora treba voditi računa o poziciji detektora, detektor nikako ne bi smeo da se postavi direktno na pod ili zid iz razloga što je moguće da i gas toron uđe u aktivnu zapreminu detektora, te da i on ostavi tragove na detektoru. Takođe nikako ne bi smeli da se postave u blizini toplotnih izvora. Kao što je već do sada istaknuto, koncentracija torona opada eksponencijalno sa rastojanjem od potencijalnog izvora, a distribucija koncentracije radona je homogena u nekom zatvorenom prostoru, te

bi sledeći te činjenice, trag detektor trebalo postavljati na dovoljnoj udaljenosti od zidova i poda (najmanje 10 cm) kako bi se izbegla eventualna pogrešna procena koncentracije aktivnosti radona.

### **7.2.3. RAD7 aktivni uređaj - eksperimentalna postavka za merenje koncentracije radona i torona u zemljištu**

Koncentracije radona i torona u zemljištu merene su RAD7 aktivnim uređajem, osnovni princip rada monitora objašnjen je u poglavlju 5.2.3. Za merenje koncentracije radona i torona u zemljištu pomoću RAD7 monitora koristi se čelična sonda koja se preko plastičnih cevi i deksikatora (odvlaživača) spaja sa uređajem (slika 7.1). Čelična sonda se postavi u zemljište koje se ispituje, do dubine od oko 80 cm. Jedan od potencijalnih problema koji se može desiti jeste da se otvori na kraju sonde zapuše usled velike vlažnosti zemljišta u dubljim slojevima. U tom slučaju dobijeni rezultati su daleko ispod realnih vrednosti. Da bi se to sprečilo, treba proveriti da li postoji slobodan protok vazduha kroz sondu odmah nakon postavljanja, a zatim započeti merenja. Merenja su vršena korišćenjem grab protokola u sniff modu rada pumpe, što podrazumeva četiri ciklusa sa 5 min usisavanja vazduha iz zemlje nakon čega sledi 5 min brojanja alfa čestica. Rezultati su korigovani na vlažnost pomoću programa CAPTURE, a vrednost koja se izveštava jeste maksimalna vrednost od četiri dobijena rezultata u korišćenom protokolu.



Slika 7.1. Eksperimentalna postavka RAD7 monitora za merenje koncentracije radona i torona u zemljištu, slika sa terena.

### 7.2.3.1. Interkomparacija aktivnog monitora RAD7 u eksperimentalnoj postavci za merenje radona u zemlji

Poslednja interkomparacija merenja radona u zemljištu izvedena je 2017. godine u Ljubljani i organizovana je od strane dve akreditovane laboratorije: Zavod za varstvo pri delu (ZVD) iz Slovenije i Laboratorije za ispitivanje radioaktivnosti PMF, Novi Sad iz Srbije. Interkomparacija je bila fokusirana na proveru stabilnosti i ponovljivosti rezultata laboratorija u odnosu na iste uzorke u realnim uslovima merenja. Radon u zemljištu izmeren je in-situ istovremeno pomoću dva RAD7 alfa spektrometra koji su koristili isti grab protokol sa sniff modom na poljani ispred zgrade ZVD u Ljubljani, u dve tačke locirane na međusobnoj udaljenosti od 78 cm (slika 7.2.).



Slika 7.2. Dve merne tačke na terenu u blizini ZVD, Ljubljana, Slovenija.

Laboratorije su prijavile maksimalne vrednosti za četiri ciklusa merenja definisanih grab protokolom, korigovano na vlažnost. Prijavljene maksimalne vrednosti za svako merno mesto su prikazane i upoređene u tabeli 7.1. Kriterijum slaganja dobijenih rezultata bilo je relativno odstupanje (Bias) manje od 10 %. Relativni Bias procenjen je na osnovu formule:

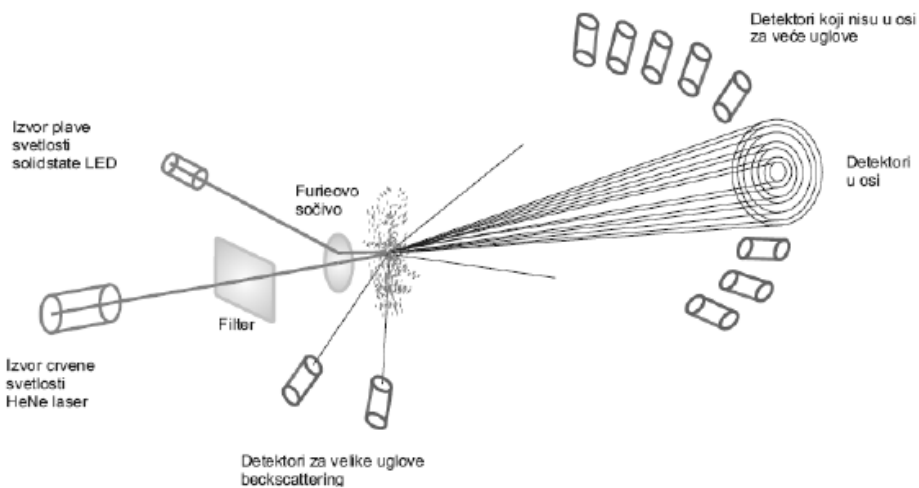
$$\text{Relativni Bias \%} = \frac{|prijavljena\ vrednost_{PMF} - prijavljena\ vrednost_{ZVD}|}{prijavljena\ vrednost_{ZVD}} \times 100\% . \quad (7.3)$$

Tabela 7.1. Rezultati interkomparacije merenja radona u zemljištu

Zemljište, lokacija 1 – lab.code 1			Zemljište, lokacija 2 – lab.code 1		
Mode	Radon u zemljištu [Bq/m <sup>3</sup> ]	2σ Nesigurnost [Bq/m <sup>3</sup> ]	Mode	Radon u zemljištu [Bq/m <sup>3</sup> ]	2σ Nesigurnost [Bq/m <sup>3</sup> ]
Sniff	31600	2300	Sniff	26400	2100
Sniff	35600	2500	Sniff	29000	2200
Sniff	39000	2600	Sniff	30500	2300
Sniff	45000	5300	Sniff	32400	2400
Prijavljena vrednost	45000	5300	Prijavljena vrednost	32400	2400
Zemljište, lokacija 1 – lab.code 2			Zemljište, lokacija 2 – lab.code 2		
Mode	Radon u zemljištu [Bq/m <sup>3</sup> ]	2σ Nesigurnost [Bq/m <sup>3</sup> ]	Mode	Radon u zemljištu [Bq/m <sup>3</sup> ]	2σ Nesigurnost [Bq/m <sup>3</sup> ]
Sniff	41236	3292	Sniff	30899	2787
Sniff	44382	3674	Sniff	32584	3056
Sniff	43708	3674	Sniff	32135	3090
Sniff	42584	3685	Sniff	33596	3180
Prijavljena vrednost	44382	3674	Prijavljena vrednost	33596	3180
<b>Rel. greška %</b>	<b>1.4 %</b>		<b>Rel. greška %</b>	<b>4 %</b>	

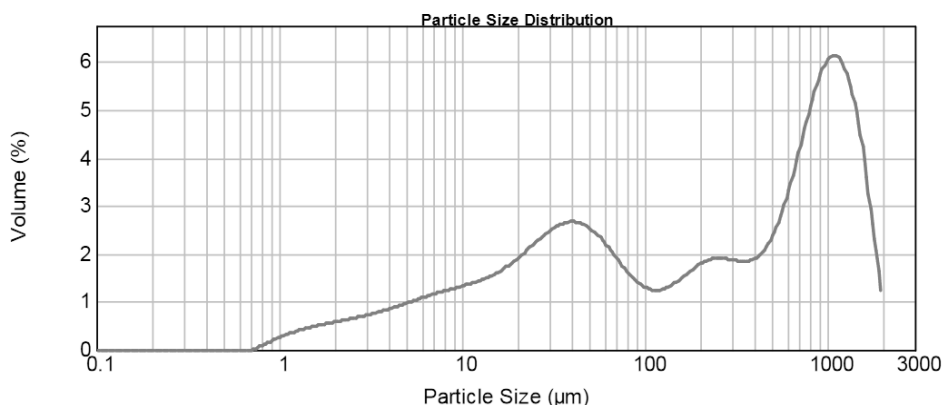
#### 7.2.4. Malvern Mastersizer 2000 - uređaj za granulometrijski sastav zemljišta

Distribucija veličine čestica uzoraka zemljišta određena je uređajem Malvern Mastersizer 2000 koji radi na principu laserske difrakcije svetlosti. Laserska difrakcija u osnovi predstavlja pojavu da je prostorni raspored difraktovane svetlosti funkcija veličine čestica uzorka (praha) koji se ispituje. Metodom je moguće meriti dimenzije čestica koje su u opsegu veličina od 0,02 μm do 2000 μm. Uređaj beleži svetlost rasutu iz polja čestica pod različitim uglovima. Šematski prikaz delova uređaja dat je na slici 7.3. Sprašeni uzorak prolazi kroz fokusirani snop svetlosti koji se rasejava pod različitim karakterističnim uglovima u prostoru. Uređaj Malvern Mastersizer 2000 poseduje dva svetlosna izvora, HeNe laser kao izvor svetlosti crvene boje, talasne dužine 633 nm koji je smešten u osi instrumenta (snaga lasera je 4 mW, prečnik zraka 0,63 mm i divergencija iznosi 1,5 mrad) i drugi LED laser plave boje, talasne dužine 455 nm koji nije u osi instrumenta. Detektorski sistem u osnovi čine detektori za male uglove koji su raspoređeni u koncentričnim krugovima oko ose instrumenta, pored ovih detektora postoje i bočni detektori za detekciju rasejane svetlosti pod uglovima manjim od 90° i većim od 90°. Na taj način pokriveni su uglovi rasejanja svetlosti od 0,01° do 135°.

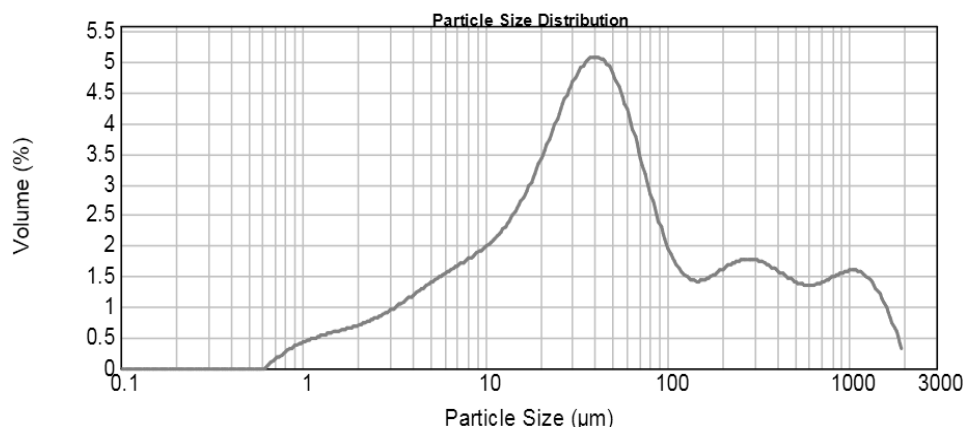


Slika 7.3. Šematski prikaz delova uređaja za lasersku difrakciju

Rezultat analize može da se dobije u vidu relativne distribucije zapremine ili površine čestica sfernog oblika u zavisnosti od veličine. Dva tipična spektra distribucije veličina čestica za dva uzorka zemljišta prikazana su na slikama 7.4 i 7.5 Slika 7.4 prikazuje zapreminsku distribuciju veličine čestica za uzorak zemljišta krupnijeg sastava, a slika 7.5 prikazuje zapreminsku distribuciju veličine čestica za uzorak zemljišta sitnijeg sastava. Priprema uzoraka za merenje na uređaju izvodi se na sledeći način: uzorak zemljišta koji se ispituje prvo se u sušnici osuši na 105°C do konstantne mase, a zatim se usitnjava (sprašuje) u avanu i tako pripremljen uzorak postavlja se na nosač u uređaju. Malvern Mastersizer 2000 spojen je sa PC računarom koji poseduje softver za obradu podataka. Primer izveštaja sa PC računara dat je u prilogu 2.



Slika 7.4. Distribucija veličina čestica uzorka zemlje sa česticama veće veličine.



Slika 7.5. Distribucija veličine čestica uzorka zemljišta sa česticama manje veličine.

### 7.2.5. Gama-spektrometrijska analiza sadržaja radionuklida u zemljištu i priprema uzoraka

U svrhu ovog istraživanja uzeti su uzorci zemljišta iz površinskog sloja (10-30 cm) na svakoj lokaciji na kojoj je merena koncentracija radona u zemljištu pomoću uređaja RAD7. Uzorci zemljišta su sušeni na 105°C do konstantne mase, usitnjeni i homogenizovano pakovani u plastične merne posude za čiju geometriju (cilindar: visine 62 mm i prečnika 67 mm) i matricu uzorka zemlje (gustine  $\rho = 1175 \text{ kg/m}^3$ ) postoji kriva efikasnosti za dati gama-spektrometrijski sistem u skladu sa metodom IAEA Technical Report Series No. 295 – Measurement of Radionuclides in Food and the Environment. Da bi se u uzorcima uspostavila radioaktivna ravnoteža, pripremljeni uzorci su stajali u hermetički zatvorenim posudama 40 dana, pre analize. Masa uzorka zemljišta iznosila je tipično oko (250 - 300) g. Vreme merenja uzoraka od 80 ks je bilo potrebno zbog duže akvizicije događaja kako bi se dobila zadovoljavajuća statistika događaja u pikovima gama spektra.

Spektrometrija gama emitera uzoraka zemljišta urađena je pomoću poluprovodničkog HPGe detektora tipa GMX-20190 (sa proširenim energetske opsegom od 10 keV do 3 MeV-a) proizvođača ORTEC, nominalne efikasnosti 32 % u pasivnoj zaštiti od olova u Laboratoriji za nuklearnu fiziku, Departmana za fiziku na PMF-u u Novom Sadu. Kalibracija detektora izvršena je sertifikovanim referentnim materijalom – smešom radionuklida gama emitera u matriksu smole cilindrične geometrije CZECH METROLOGY INSTITUTE Cert.No:1035-SE-40001-17. Gama spektri uzoraka zemljišta

su prikupljeni i analizirani pomoću programa GENIE 2000 Spectroscopy System Software, proizvođača Canberra USA.

Za određivanje koncentracije aktivnosti uranijuma  $^{238}\text{U}$  u uzorcima zemljišta korišćena je specijalna metoda razvijena u Laboratoriji za nuklearnu fiziku u Novom Sadu na osnovu niskoenergetskih gama linija prvog potomka torijuma  $^{234}\text{Th}$  (Bikit et al., 2003). Procenjene minimalne detektibilne aktivnosti za radionuklide u zemljištu na osnovu vremena merenja su iznosile: 9 Bq/kg za  $^{238}\text{U}$ , 2,5 Bq/kg za  $^{226}\text{Ra}$ , 1,3 Bq/kg za  $^{232}\text{Th}$ , 13,3 Bq/kg za  $^{40}\text{K}$  i 1,2 Bq/kg za  $^{137}\text{Cs}$ . Merna nesigurnost rezultata merenja izražena je kao proširena merna nesigurnost za faktor  $k=2$ , koji za normalnu raspodelu odgovara nivou poverenja od 95 %.

### **7.3. Radonski potencijal – metodologija**

Za određivanje radonskog potencijala korišćen je metod predložen od strane autora (Cinelli et al., 2015; I. Barnet, P. Pacherova, 2008b). Kao što je u uvodnim poglavljima objašnjeno, za procenu radonskog potencijala potrebno je odrediti permeabilnost zemlje i koncentraciju radona u zemljištu. Permeabilnost zemljišta procenjena je na osnovu granulometrijskog sastava zemljišta. Metodologija se sastoji u tome da se odredi procentualna zastupljenost čestica koje imaju veličinu manju od 65  $\mu\text{m}$  (fina frakcija) i na osnovu toga da se odredi klasa radonskog indeksa (Tabela 7.2). Ukoliko je procenat prisustva čestica fine frakcije manji od 15 %, takvo zemljište je visoko permeabilno, ukoliko je procenat fine frakcije između 15 % i 65 %, takvo zemljište je srednje permeabilno i ukoliko je procenat zastupljenosti fine frakcije veći od 65 %, takvo zemljište smatra se slabo permeabilnim (I. Barnet, P. Pacherova, 2008b).

Koncentracija aktivnosti radona u zemljištu određena je korišćenjem aktivnog uređaja RAD7 u eksperimentalnoj postavci za merenje koncentracije radona i torona u zemljištu. Na osnovu dobijenih vrednosti rezultati se klasifikuju u tri kategorije (Tabela 7.2) zajedno sa dobijenim vrednostima za permeabilnost zemljišta. Kombinovanjem dobijenih radonskih indeksa za permeabilnost i koncentraciju radona može se proceniti radonski potencijal ispitivane lokacije.

Tabela 7.2. Procena radonskog potencijala (I. Barnet, P. Pacherova, 2008b)

Kategorija Radonskog Potencijala	Koncentracija radona u zemljištu C [kBq/m <sup>3</sup> ]		
<b>Nizak</b>	$C < 30$	$C < 20$	$C < 10$
<b>Srednji</b>	$30 \leq C < 100$	$20 \leq C < 70$	$10 \leq C < 30$
<b>Visok</b>	$C \geq 100$	$C \geq 70$	$C \geq 30$
Permeabilnost zemljišta (na osnovu udela fine frakcije)	Slabo permeabilno	Srednje permeabilno	Visoko permeabilno

Ovako procenjen radonski potencijal može da se poistoveti sa geogenim radonskim potencijalom, odnosno potencijalom zemlje ili „onoga što zemlja isporučuje“. Geogeni radonski potencijal (GRP) površinskog sloja zemljišta neposredno ispod objekata predstavlja glavni uzrok prisustva radona i njegovih potomaka u zatvorenim prostorijama, te je stoga veoma značajno vršiti ovakva ispitivanja na lokacijama gde je planirana gradnja. Kod već izgrađenih objekata sa detektovanim povišenim vrednostima radona, plan remedijacije treba da obuhvata i ispitivanje zemljišta u neposrednoj blizini objekata. Što se tiče torona, pored zemljišta, glavni izvor predstavlja i građevinski materijal koji je korišćen prilikom gradnje i u pokrivanju zidova i podova. Ukoliko vrednost permeabilnosti može da se odredi korišćenjem specijalnih uređaja koji direktno mere permeabilnost, kao što je RADON-JOK, u tom slučaju procena permeabilnosti putem klasifikacije veličine čestica fine frakcije može da se izbegne ili da se koristi za validaciju ove metode. Vrlo često mape geogenog potencijala nisu u slaganju sa mapama koncentracija radona u zatvorenim prostorijama. Posledica tog neslaganja leži u antropogenim faktorima kao što su: tip gradnje, navike stanara ili parametrima okoline: meteorološki uslovi, građevinski materijali, koncentracija radona na otvorenom i dr.

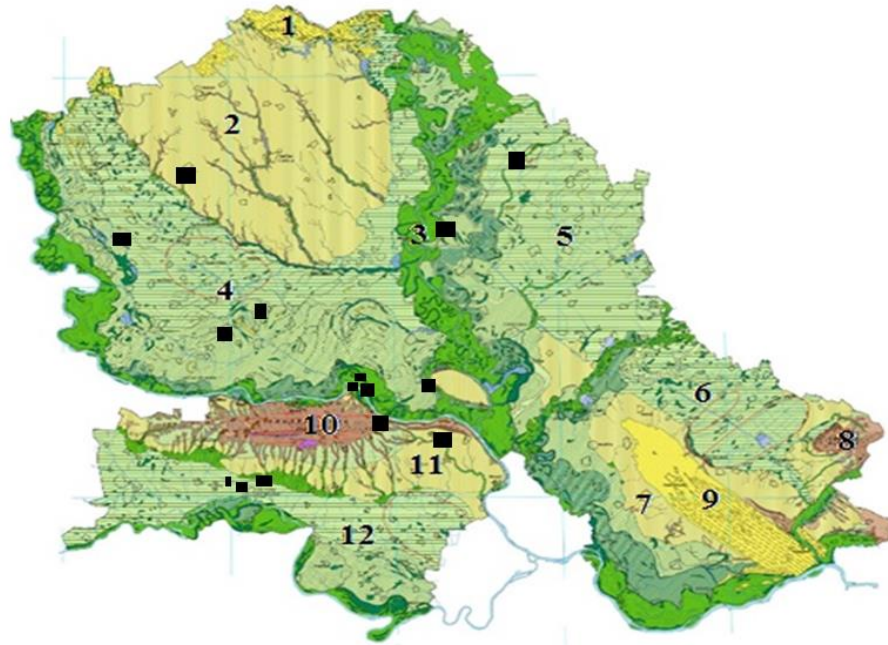
Procena radonskog potencijala veoma je značajna u cilju izrade mape geogenog radonskog potencijala, koja bi se izradila za celu Srbiju i kao takva priključila Evropskoj mapi geogenog potencijala.

## 7.4. Rezultati i diskusija

Lokacije i objekti su odabrani na osnovu rezultata prethodnih nacionalnih programa merenja radona (2015/2016. godina) i preliminarnih rezultata mapiranja severne pokrajine Srbije – Vojvodine (Pantelić et al., 2018). Podjednako su bili zastupljeni objekti sa detektovanim umerenim i povišenim koncentracijama radona u urbanim i seoskim sredinama. Pored toga, osnovni kriterijum za odabir lokacija bio je zastupljenost svih



geomorfoloških jedinica na području Vojvodine: dve planine, četiri lesna platoa, tri lesne terase, četiri aluvijalne ravni i dve pešcare (Slika 7.6) (Forkapic et al., 2017). Dominantni tip zemljišta na području Vojvodine je černoziem čiji je geološki supstrat les – lako porozna sedimentna stena nataložena nanošenjem vetra u doba Paleistocena (za vreme interglacijalnih perioda) (Marković et al., 2008). Pošto je Vojvodina dominantno ravničarski predeo, u ovom istraživanju obuhvaćene su i dve lokacije sa područja zapadne i južne Srbije iz pretežno planinskog predela (lokacije RAD1 i VR1).



Slika 7.6 Geomorfološka karta Vojvodine sa označenim lokacijama ove studije: Horgoška pešćara (1), Bački lesni plato (2), aluvijalna ravan (3), Bačka lesna terasa (4), Banatska lesna terasa (5), Tamiški lesni plato(6), Deliblatski lesni plato (7), Vršačke planine (8), Deliblatska pešćara (9), Fruška Gora (10), Fruškogorski lesni plato (11) i Sremska lesna terasa (12) (Forkapic et al., 2017).

Prikaz objedinjenih rezultata aktivnosti koncentracije radona i torona u zatvorenim prostorijama na 16 lokacija, kao i izmerene vrednosti ambijentalnog doznog ekvivalenta merene za zidove i podove na datim lokacijama prikazani su u tabeli 7.3. Dobijene vrednosti koncentracije aktivnosti radona u zatvorenim prostorijama aktivnim monitorom RAD7 su upoređene sa prethodnim rezultatima za date objekte izmerene različitim tehnikama (CR-39 trag detektori i ugljeni kanisteri). Vrednosti ambijentalnog doznog ekvivalenta su izmerene dozimetrom model Radiation Alert Inspector, proizvođača S.E.INTERNATIONAL, INC, USA, sa ugrađenim GM brojačem. Opseg merenja ambijentalnog doznog ekvivalenta iznosi 0.01  $\mu\text{Sv/h}$  - 1  $\text{mSv/h}$ . Prikazane vrednosti su

određene kao srednja vrednost 5 uzastopnih merenja u kontaktnoj geometriji sa zidovima i podom. Kombinovana merna nesigurnost iznosi  $\pm 20\%$ .

Statistička evaluacija rezultata urađena je korišćenjem programa SPSS u cilju provere korelacije merenih vrednosti aktivnosti koncentracije (Prilog 3). Urađen je Pirsonov test korelacije dobijenih rezultata. U tabeli 7.4 prikazane su vrednosti korelacije dobijene programom. Na osnovu dobijenih vrednosti možemo zaključiti da postoji statistički značajna korelacija između svih varijabli. Postoji statistički značajna pozitivna korelacija između koncentracije radona merene ugljenim kanisterom i RAD7 monitorom  $r=0.864$ ;  $p=0,000$  sa koeficijentom determinacije  $74,65\%$  (slika 7.7). Takođe, ustanovljena je statistički značajna pozitivna povezanost između rezultata koncentracije radona dobijene pomoću dva pasivna detektora (ugljeni kanister i CR-39)  $r=0,805$ ;  $p=0,001$  sa koeficijentom determinacije  $64,80\%$ . (slika 7.8) Dobijena je i statistički značajna korelacija između koncentracija radona merenih pomoću CR-39 pasivnih detektora i RAD7 aktivnim monitorom  $r=0,533$ ;  $p=0,05$  sa koeficijentom determinacije  $28,41\%$ .

Tabela 7.3. Pregled rezultata kcentracije radona, torona i doze u vazduhu

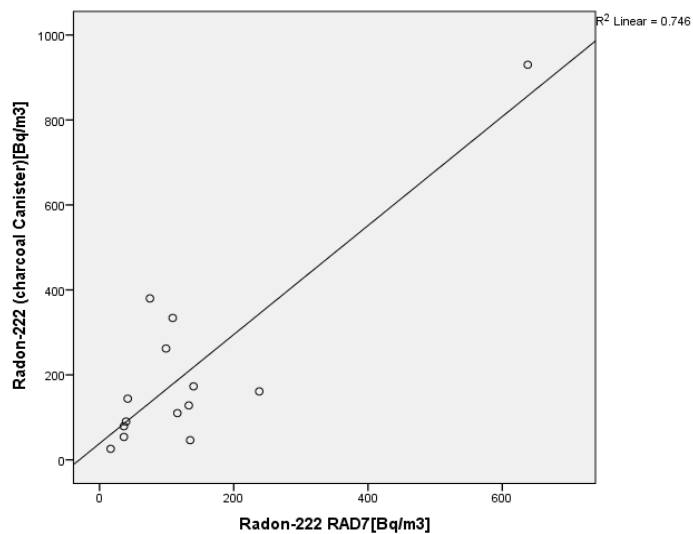
Lokacija	CR39 [Bq/m <sup>3</sup> ]	Ugljeni kanisteri [Bq/m <sup>3</sup> ]	RAD7 <sup>222</sup> Rn [Bq/m <sup>3</sup> ]	RAD7 <sup>220</sup> Rn [Bq/m <sup>3</sup> ]	H*(10) [μSv/h] zid	H*(10) [μSv/h] pod
SM1	188	46,2(2,1)	135(49)	23,5(64,1)	0,215	0,182
SM2	627	380(6)	75(38)	23,5(64,1)	0,221	0,201
SM3	338	128(3)	133(49)	11,7(56,6)	0,257	0,225
BP1	667	334(11)	109(49)	23,5(64,1)	-	-
K2	481	144(6)	42(31)	11,7(56,6)	-	-
P1	370	173(10)	140(34)	17,5(37,7)	0,179	0,203
SAJ1	-	26(4)	16.5(21.3)	23,1(63,2)	0,233	0,209
BE1	96	79(6)	36.2(29.4)	46,2(74,8)	0,197	0,251
DM1	126	110(7)	116(46)	34,7(69,4)	0,167	0,191
TM1	-	90(6)	39,5(30,3)	23,4(64)	0,143	0,125
KI1	28	54(6)	36,3(30,3)	-	0,161	0,143
KI2	-	161(7)	238(63)	25,3(64,2)	0,185	0,205
SU7	315	262(9)	99(43)	35,2(70,4)	0,205	0,191
SU8	455	270(9)	384(78)	23,5(64,3)	0,173	0,143
RAD1	820	930(20)	638(100)	35,4(76,3)	0,167	0,175
VR1		664(20)	524(91)	35,3(70,7)	0,155	0,173

Tabela 7.3. Pirsnove korelacije ispitivanih varijabli.

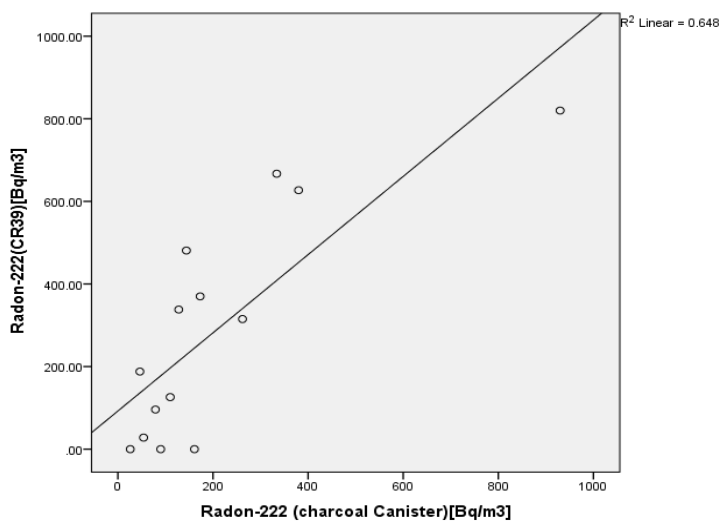
	RAD 7	CR-39
CR-39	0,533*	
Ugljeni kanister	0,864**	0,805*

\*\* korelacija je značajna na nivou 0,01

\* korelacija je značajna na nivou 0,05



Slika 7.7. Korelacija vrednosti koncentracije radona merene ugljenim kanisterima i RAD7 aktivnim monitorom.



Slika 7.8. Korelacija vrednosti koncentracije radona merene ugljenim kanisterima i CR-39 pasivnim detektorima.

Prikaz dobijenih vrednosti koncentracije aktivnosti radionuklida u uzorcima zemljišta prikupljenih na ispitivanim lokacijama dat je u tabeli 7.4. Rezultati su dobijeni obradom prikupljenih spektara na osnovu gama spektrometrijskih merenja.

Tabela 7.4. Prikaz koncentracije aktivnosti radionuklida u uzorcima zemljišta na 16 lokacija

Lokacija	$^{238}\text{U}$ [Bq/kg]	$^{226}\text{Ra}$ [Bq/kg]	$^{232}\text{Th}$ [Bq/kg]	$^{40}\text{K}$ [Bq/kg]	$^{137}\text{Cs}$ [Bq/kg]
SM1	< 40	29,8(1,4)	44(3)	515(28)	6,0(7)
SM2	31(12)	33(5)	47,2(2,9)	558(22)	6,5(6)
SM3	< 70	39,4(1,9)	46(10)	530(30)	9,2(1,1)
BP1	25(11)	37(6)	53(3)	564(22)	6,0(6)
K2	24(8)	30,0(2,5)	41,3(2,1)	511(28)	2,0(6)
P1	34(7)	28,8(1,9)	35(6)	496(16)	9,2(7)
SAJ1	51(13)	33(3)	34(6)	540(30)	3,1(1,1)
BE1	26(21)	24,2(1,4)	34(8)	435(27)	6,1(9)
DM1	15(8)	23,0(2,2)	28,8(2,6)	454(25)	4,4(6)
TM1	37(5)	26,3(1,7)	31,5(2,0)	430(40)	5,5(6)
KI1	< 16	17,6(1,4)	27,4(2,0)	499(26)	1,9(3)
KI2	37(5)	26,3(1,7)	31,5(2,0)	430(40)	5,5(6)
SU7	28(9)	33,8(2,0)	32(10)	463(23)	3,3(6)
SU8	34(8)	38(4)	45(10)	574(19)	4,4(5)
RAD1	36(5)	22,7(8)	31,2(2,3)	530(80)	45,7(1,7)
VR1	55(6)	30,1(9)	39(3)	560(50)	14,2(8)

Dobijene vrednosti koncentracije aktivnosti radionuklida u zemljištu se kreću u okviru uobičajenih vrednosti za vojvođansko zemljište za koje postoji bogata baza podataka za sadržaj ispitivanih radionuklida. Ono što se može uočiti jesu blago povišene vrednosti koncentracije aktivnosti torijuma  $^{232}\text{Th}$  u odnosu na radijum  $^{226}\text{Ra}$ . Ova pojava se može povezati sa činjenicom da je u svim objektima detektovano prisustvo gasa torona u vazduhu zatvorenih prostorija, osim na lokaciji KI1 gde su izmerene nešto niže koncentracije aktivnosti  $^{226}\text{Ra}$  i  $^{232}\text{Th}$ .

Kako bi se proverila korelacija između sadržaja radionuklida u zemljištu i izmerenih koncentracija radona i torona u zemljištu (Tabela 7.5) korišćena je SPSS statistika (Tabela 7.6). Iako vrednosti koncentracije radona i aktivnosti torona u zemlji ne pokazuju normalnu raspodelu, korišćen je bivarijantni Pirsonov test korelacije između aktivnosti koncentracija  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  i  $^{222}\text{Rn}$  u zemlji. Dobijena je statistički značajna korelacija između  $^{232}\text{Th}$

i  $^{226}\text{Ra}$  ( $r=0.770$ ;  $p<0.01$ ) i  $^{232}\text{Th}$  i  $^{222}\text{Rn}$  ( $r=0.727$ ;  $p<0.01$ ). Neparаметarski Spirmanov test pokazuje neznatno bolju povezanost ovih varijabli. Rezultati korelacija prikazani su u tabeli 7.6.

Pošto je jedna od pretpostavki ovog istraživanja bila da je zemljište ispod objekta izvor torona u zatvorenim prostorijama objekata, ispitana je ekshalacija gasa torona iz uzetih uzoraka zemljišta. Ispitivanja su sprovedena u Institutu za nuklearne nauke ‘‘Vinča’’, u Laboratoriji za nuklearnu fiziku i fiziku plazme metodom koja je opisana u (Predrag UJIĆ, Igor ČELIKOVIĆ, Ahmed AWHIDA et al., 2017). Nisu dobijene očekivane korelacije ovih vrednosti sa koncentracijama torona u zemljištu i vazduhu, što se može objasniti kratkim periodom poluraspada ovog radioaktivnog gasa što značajno utiče na proces difuzije i detekciju ovog gasa.

Tabela 7.5. Vrednosti koncentracije radona i torona u zemljištu kao i ekshalacija torona iz uzoraka zemljišta.

Lokacija	RAD7 $^{222}\text{Rn}$ [Bq/m <sup>3</sup> ]	RAD7 $^{220}\text{Rn}$ [Bq/m <sup>3</sup> ]	Ekshalacija torona $^{220}\text{Rn}$ [Bq/(kg h)]
SM1	32247(2787)	261(566)	0,0736(29)
SM2	25056(2506)	174(726)	0,0756(38)
SM3	34831(3034)	58,7(587)	0,0580(41)
BP1	46292(3483)	11,4(232)	0,0753(45)
K2	12809(1753)	88,6(735)	0,0254(28)
P1	10528(1573)	-	0,0455(14)
SAJ1	4977(1213)	-	0,0536(32)
BE1	8989(1506)	165(450)	0,0406(32)
DM1	21685(2270)	173(473)	0,0416(33)
TM1	5888(1202)	-	0,0407(33)
KI1	8843(1472)	-	0,0558(33)
KI2	8820(1461)	-	0,0437(22)
SU7	12584(1730)	74,6(165)	0,0604(48)
SU8	1103(561)	-	0,0463(34)
RAD1	30562(2764)	80,6(253)	0,0785(63)
VR1	96.9(265)	-	0,0416(37)

Tabela 7.6. Pirsonova korelacija dobijenih vrednosti aktivnosti radionuklida u zemljištu i izmerenih vrednosti radona i torona u zemljištu.

	$^{220}\text{Rn}$	$^{222}\text{Rn}$	$^{232}\text{Th}$	$^{226}\text{Ra}$
$^{238}\text{U}$	-0,227	-0,154	0,066	0,416
$^{226}\text{Ra}$	-0,476	0,458	0,770**	
$^{232}\text{Th}$	-0,208	0,727**		
$^{222}\text{Rn}$	-0,267			

\*\* korelacija je značajna na nivou 0,01

Granulometrijski sastav zemljišta, odnosno udeo pet različitih frakcija zemljišta u ukupnoj distribuciji veličine čestica ispitivanog zemljišta dat je u tabeli 7.7. Klasifikacija granulacije zemljišta određena je na osnovu Wentworth-ove skale date u prilogu 4 (“USGS Open-File Report 2006-1195: Nomenclature,”).

Tabela 7.7. Granulometrijski sastav zemljišta, udeo frakcije u zapreminskoj distribuciji veličine čestica

Lokacija	Glina <3,9 $\mu\text{m}$ [%]	Silt (prašina) 3,9-62,5 $\mu\text{m}$ [%]	Sitan pesak 62,5-250 $\mu\text{m}$ [%]	Srednje krupan pesak 250-500 $\mu\text{m}$ [%]	Krupan pesak 500-2000 $\mu\text{m}$ [%]
SM1	4,18	37,75	25,14	17,24	15,75
SM2	6,62	38,99	16,63	11,45	26,27
SM3	7,41	38,58	18,47	16,92	18,61
BP1	9,03	50,46	16,08	10,41	14,02
K2	6,82	38,53	15,89	5,36	33,39
P1	3,75	38,31	26,50	19,61	11,83
SAJ1	7,22	43,92	24,52	11,67	12,73
BE1	4,89	35,39	26,35	13,51	19,86
DM1	4,40	25,08	49,21	4,90	16,41
TM1	4,52	38,29	44,52	7,45	5,22
KI1	5,92	29,35	27,93	29,21	7,56
KI2	5,96	32,48	14,14	9,13	38,28
SU7	8,67	57,58	13,54	4,49	15,72
SU8	8,13	56,49	17,19	7,24	10,95
RAD1	7,68	27,46	35,87	22,63	6,36
VR1	5,43	33,31	37,31	20,49	3,46

Granulometrijski sastav zemljišta nije pokazao korelaciju sa koncentracijama radionuklida u zemljištu, niti sa koncentracijom radona merenog različitim tehnikama. S obzirom na to, nije se dalje očekivao doprinos ovih varijabli u regresionim modelima predikcije. Prvi statistički značajan model dobijen linearnom regresijom predviđa

koncentraciju radona u zemlji na osnovu aktivnosti  $^{232}\text{Th}$  i  $^{226}\text{Ra}$  u zemlji ( $r=0,774$ , adjusted  $R^2=0,473$ ,  $p<0,05$ ). Beta koeficijent pokazuje značajan doprinos aktivnosti torona u zemlji na predikciju radona (92 %), dok vrednost beta koeficijenta za radon (-0,251) nije statistički značajan, te u tom smislu ovaj prediktor može biti isključen iz modela.

Drugi statistički značajan model predviđa srednju godišnju koncentraciju radona u vazduhu koja odgovara CR-39 merenjima, u zavisnosti od koncentracije radona i torijuma u zemljištu ( $r=0,673$ , adjusted  $R^2=0,353$ ,  $p<0,05$ ). Ovi prediktori sa 35 % utiču na srednju godišnju koncentraciju radona. Sa druge strane srednje godišnje koncentracije radona su u korelaciji sa vrednostima određenim metodom adsorpcije na ugljenim kanisterima koji su bili eksponirani 48 h u datim objektima, kao i sa trenutno izmerenim vrednostima koncentracije radona pomoću aktivnog monitora RAD7.

Na kraju, u cilju predviđanja koncentracije aktivnosti radona u zatvorenim prostorijama urađena je standardna linearna regresiona analiza sa aktivnošću koncentracije  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  i  $^{222}\text{Rn}$  u zemljištu. S obzirom da je aktivnost  $^{232}\text{Th}$  u pozitivnoj korelaciji sa aktivnošću  $^{226}\text{Ra}$  i  $^{222}\text{Rn}$  u zemlji, pokušali smo da napravimo model u kojem će on biti isključen. Ako postoje povezane varijable, one generalno utiču na regresione koeficijente, a sa druge strane indirektno utiču na zavisnu varijablu preko varijabli sa kojima su povezane.

Imajući ovo u vidu, dobijen je model  $F(4,9)=3,469$  na granici statističke značajnosti ( $r=0,779$ ; adjusted  $R^2=0,432$ ,  $p=0,056$ ) za predviđanje koncentracije radona koji kao prediktore ima  $^{238}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{222}\text{Rn}$  i udeo gline u zemljištu (Tabela 7.8). Ovakav model može da opiše 43,2 % varijaciju radona, odnosno promena bilo kojih od ovih prediktora utiče sa 43,2 % na koncentraciju radona u zatvorenim prostorijama (u odnosu na ugljene kanistere). Ukoliko u model uključimo i trenutnu vrednost radona merene RAD7 monitorom, dobijamo statistički značajan model  $F(5,8)=8,299$  (adjusted  $R^2=0,737$ ;  $p<0,05$ ) (Tabela 7.9).

Tabela 7.8. Izveštaj multiple regresione analize;  $p=0,056$

Model	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig
	B	Std.Error	Beta		
1 (Constant)	97.863	260.240		0.376	0.716
Zemljište $^{238}\text{U}$	10.836	6.341	0.434	1.709	0.122
Zemljište $^{226}\text{Ra}$	-31.429	11.621	-0.812	-2.704	0.24
Zemljište $^{222}\text{Rn}$	0.012	0.005	0.659	2.485	0.35
Udeo gline	74.432	34.302	0.541	2.170	0.58

Tabela 7.9. Izveštaj multiple regresione analize;  $p < 0,05$ 

Model	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig
	B	Std. Error	Beta		
1 (Constant)	-151.912	191.668		-0.793	0.451
Zemljište <sup>238</sup> U	-3.234	5.986	-0.130	-0.540	0.604
Zemljište <sup>226</sup> Ra	1.921	12.623	0.050	0.152	0.883
Zemljište <sup>222</sup> Rn	0.000	0.05	-0.20	-0.074	0.943
Udeo gline	39.301	25.522	0.286	1.540	0.162
Radon RAD7	1.257	0.371	0.847	3.387	0.010

Na osnovu dobijenih vrednosti udela fine frakcije u uzorcima zemljišta i na osnovu koncentracije radona u zemljištu merene pomoću RAD7 aktivnog uređaja, procenjen je indeks permeabilnosti zemljišta prema kriterijumima datim u tabeli 7.2, i rezultati za ispitane lokacije prikazani su u Tabeli 7.10.

Tabela 7.10. Procena radonskog potencijala

Lokacija	Udeo fine frakcije (<65 $\mu\text{m}$ )	Radonski indeks permeabilnosti	Koncentracija <sup>222</sup> Rn u zemljištu [kBq/m <sup>3</sup> ]	Radonski potencijal
SM1	41,93	srednji	32,247	<b>SREDNJI</b>
SM2	45,61	srednji	25,056	<b>SREDNJI</b>
SM3	45,99	srednji	34,831	<b>SREDNJI</b>
BP1	59,49	srednji	46,292	<b>SREDNJI</b>
K2	45,35	srednji	12,809	<b>NIZAK</b>
P1	42,06	srednji	10,528	<b>NIZAK</b>
SAJ1	51,14	srednji	4,977	<b>NIZAK</b>
BE1	40,28	srednji	8,989	<b>NIZAK</b>
DM1	29,48	srednji	21,685	<b>SREDNJI</b>
TM1	42,81	srednji	5,888	<b>NIZAK</b>
KI1	35,27	srednji	8,843	<b>NIZAK</b>
KI2	38,44	srednji	8,820	<b>NIZAK</b>
SU7	66,25	visok	12,584	<b>SREDNJI</b>
SU8	64,62	srednji	1,103	<b>NIZAK</b>
RAD1	35,14	srednji	30,562	<b>SREDNJI</b>



## 8. Zaključak

Monitoring radioaktivnosti u životnoj sredini nemoguće je zamisliti bez gama-spektrometrijskih merenja, pa je osnovni cilj izloženih istraživanja bio primena gama-spektrometrije za direktno određivanje toronovih potomaka (EETC) u vazduhu zatvorenih prostorija i procenu toronske ravnoteže. Razvijena je nova GAMA metoda koja je optimizovana i validovana kroz komparaciju sa rezultatima aktivnog monitora za određivanje EETC u kontinualnom režimu rada. Zbog mogućih promena koncentracije toronovih potomaka u atmosferi zatvorenih prostorija tokom usisavanja pomoću pumpe velikog protoka, predloženo je kraće vreme uzorkovanja potomaka na filter papiru kako bi se dobili validni realistični rezultati. Pored optimalnog vremena usisavanja od 1 h, verifikovani su i sledeći vremenski intervali: 3 h za vreme hlađenja pre započinjanja gama-spektrometrijske analize sadržaja toronovih potomaka na filter papiru i 1000 s za akviziciju događaja gama-spektrometarskim sistemom.

Glavna svrha sprovedene sveobuhvatne studije radona i torona na 15 različitim lokacija, sa različitim ambijentalnim uslovima, bila je proveriti pouzdanost i primenljivost predloženog GAMA metoda. Rezultati istraživanja su pokazali da povišene vrednosti torona u zatvorenim prostorijama, kao i njegovih potomaka, nisu retkost u porodičnim kućama, naročito na onim mestima gde je prethodno detektovana povišena koncentracija radona (lokacije VR1 i RAD1). Visoke vrednosti toronovih potomaka detektovane su i u kućama sa umerenom koncentracijom radona (lokacije SM2 i SU7), što govori u prilog činjenici da postoje različiti izvori radona i torona u ispitivanim kućama. Procenjene vrednosti za dozu od inhalacije torona na nekim lokacijama uporedive su sa dozom koja potiče od inhalacije radona i na taj način potvrđuje se toronski problem u zaštiti od prirodnih jonizujućih zračenja, što bi trebalo uzeti u obzir u daljim programima merenja. Dobro slaganje dobijenih rezultata interkomparacije RAD7 aktivnih radonskih i toronskih monitora dokazuje pretpostavku da su ovi uređaji pogodni za merenje koncentracije torona u vazduhu zatvorenih prostorija, jer daju ponovljive i stabilne rezultate. Velika zavisnost detekcije koncentracije torona od pozicije instrumenta tokom merenja potvrđuje korišćenje samo EETC kao jedinog podatka za preciznu procenu doze od inhalacije torona, naročito u toronu sklonim kućama.

Dugotrajna merenja radona i torona pasivnim tehnikama prihvatljiva su prilikom opšte procene radijacionog rizika, međutim, ukoliko je potrebno dobiti širu sliku ponašanja radona i torona u nekim zatvorenim prostorijama, neophodno je koristiti i aktivne detektorske sisteme (monitore) tokom dužeg perioda. U cilju provere prethodne tvrdnje, sprovedena su uporedna kontinualna merenja koncentracije radona, torona i njihovih ravnotežnih ekvivalentnih koncentracija (EERC i EETC) sa tri najčešće korišćena aktivna radonska detektora tokom perioda od dve nedelje. Prikazani rezultati ove studije u poglavlju 6. potvrdili su da se korišćenjem aktivnih monitora mogu dugotrajno pratiti dnevne ili nedeljne varijacije koncentracije radona i torona, kao i da se mogu odrediti faktori ravnoteže radona i torona na osnovu ponašanja njihovih potomaka. Suprotno pasivnim detektorskim sistemima, korišćenjem aktivnih monitora moguće je lako pronaći potencijalne izvore torona u ispitivanoj prostoriji, menjanjem pozicije monitora u prostoriji tokom merenja. Kada se takvo mesto detektuje, posebna pažnja mora biti usmerena na rastojanje usisnog ulaza monitora od potencijalnog izvora (pod, zid ili sl.) koje ne bi trebalo biti veće od 10 cm zbog mogućnosti precizne detekcije torona. Statistički značajno slaganje rezultata merenja svih korišćenih aktivnih monitora predstavlja još jednu potvrdu njihove primenljivosti i podobnosti za određivanje faktora ravnoteže za radon i toron. Na osnovu izloženog, merenja radona i torona aktivnim uređajima moraju biti uključena u proces remedijacije objekata sa povišenom koncentracijom radona na početku, ali i nakon remedijacije kao potvrda da je remedijacija uspešno izvršena.

Poslednji rezultat ove disertacije je evaluacija metode za procenu geogenog radonskog potencijala koji se koristi u identifikaciji radonom sklonih oblasti. U nedostatku podataka, kao što su direktna merenja permeabilnosti zemljišta u našoj zemlji, pribeglo se proceni geogenog radonskog potencijala na osnovu sveobuhvatnih ispitivanja parametara koji potencijalno mogu da utiču na radonski potencijal, kao što su sadržaj radionuklida u zemljištu, emanacija radona i torona, granulometrijski sastav zemljišta i udeo fine frakcije u ukupnoj raspodeli veličine čestica. Statističkom analizom svih izmerenih parametara dobijen je model koji izdvaja koncentracije radijuma i uranijuma u zemljištu, koncentraciju radona u zemljištu i sadržaj gline kao prediktore koji sa 60 % predviđaju srednju godišnju koncentraciju radona u zatvorenim prostorijama. Ukoliko se kao prediktor uvrste i merenja radona aktivnim monitorom RAD7, dobijamo statistički značajan model za predikciju srednje godišnje koncentracije radona. Merenjem ekshalacije

torona iz uzoraka zemljišta nismo potvrdili premisu da je zemljište glavni izvor torona u objektu, ali smo dobili interesantan rezultat da koncentracije aktivnosti  $^{232}\text{Th}$  i  $^{226}\text{Ra}$  u zemljištu statistički značajno predviđaju koncentraciju radona u zemljištu. Procenjen geogeni radonski potencijal datih lokacija pokazuje prethodno izložene tvrdnje da koncentracija radona u zatvorenim prostorijama nije usko povezana sa procenom GRP i da antropogeni uticaji i parametri okruženja takođe značajno doprinose koncentraciji radona u zatvorenim prostorijama.

## Literatura

- Ambient Dose Equivalent [WWW Document], n.d. URL <https://www.euronuclear.org/info/encyclopedia/ambientdose.htm> (accessed 1.19.19).
- Atlas-of-Natural-Radiation [WWW Document], n.d. URL <https://remon.jrc.ec.europa.eu/About/Atlas-of-Natural-Radiation>
- Bathesda, 1988. Measurements in Radon and Radon Daughters in Air, NCPR report 97.
- Bikit, I., Slivka, J., Mrdja, D., Zikic-Todorovic, N., Curcic, S., Varga, E., Veskovc, M., Conkic, L., 2003. Simple Method for Depleted Uranium Determination. Japanese J. Appl. Physics, Part 1 Regul. Pap. Short Notes Rev. Pap.
- Bochicchio, F., Venoso, G., Antignani, S., Carpentieri, C., 2017. RADON REFERENCE LEVELS AND PRIORITY AREAS CONSIDERING OPTIMISATION AND AVERTABLE LUNG CANCERS. Radiat. Prot. Dosimetry 177, 87–90. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncx130>
- Bossew, P., Stojanovska, Z., Zunic, Z.S., Ristova, M., 2013. Prediction of indoor radon risk from radium concentration in soil: Republic of Macedonia case study. Rom. Reports Phys.
- Brenner, D.J., 1994. Protection against Radon-222 at Home and at Work. ICRP Publication 65. Int. J. Radiat. Biol. <https://doi.org/10.1080/09553009414551371>
- Chalupnik, S., Skubacz, K., Urban, P., Wysocka, M., 2017. Measurements of Airborne Concentrations of Radon and Thoron Decay Products. Radiat. Prot. Dosimetry 177, 45–48. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncx164>
- Chapter 3 Chemistry and Physics of Radon, 1990. . Stud. Environ. Sci. 40, 25–28. [https://doi.org/10.1016/S0166-1116\(08\)70007-4](https://doi.org/10.1016/S0166-1116(08)70007-4)
- Chen, J., Moir, D., 2012. The concept of equivalent radon concentration for practical consideration of indoor exposure to thoron. Int. J. Environ. Res. Public Health. <https://doi.org/10.3390/ijerph9010286>
- Chen, J., Moir, D., Sorimachi, A., Janik, M., Tokonami, S., 2012. Determination of thoron

equilibrium factor from simultaneous long-term thoron and its progeny measurements. *Radiat. Prot. Dosimetry*. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncr228>

Chen, J., Moir, D., Sorimachi, A., Tokonami, S., 2011. Characteristics of thoron and thoron progeny in Canadian homes. *Radiat. Environ. Biophys.* <https://doi.org/10.1007/s00411-010-0338-5>

Chougaonkar, M.P., Eappen, K.P., Ramachandran, T. V., Shetty, P.G., Mayya, Y.S., Sadasivan, S., Venkat Raj, V., 2004. Profiles of doses to the population living in the high background radiation areas in Kerala, India. *J. Environ. Radioact.* [https://doi.org/10.1016/S0265-931X\(03\)00174-7](https://doi.org/10.1016/S0265-931X(03)00174-7)

Cinelli, G., Tondeur, F., Dehandschutter, B., 2011. Development of an indoor radon risk map of the Walloon region of Belgium, integrating geological information. *Environ. Earth Sci.* <https://doi.org/10.1007/s12665-010-0568-5>

Cinelli, G., Tositti, L., Capaccioni, B., Brattich, E., Mostacci, D., 2015. Soil gas radon assessment and development of a radon risk map in Bolsena, Central Italy. *Environ. Geochem. Health.* <https://doi.org/10.1007/s10653-014-9649-9>

Clouvas, A., Xanthos, S., Antonopoulos-Domis, M., 2006. Simultaneous measurements of indoor radon, radon-thoron progeny and high-resolution gamma spectrometry in Greek dwellings. *Radiat. Prot. Dosimetry*. <https://doi.org/10.1093/rpd/nci366>

Council of the European Union, 1996. Council Directive 96/29/Euratom. *Off. J. Eur. Union*.

Council of the European Union, 1990. Recommendation 90/143/Euratom of the Commission. *Off. J. Eur. Union*.

Csige, I., Szabó, Z., Szabó, C., 2013. Experimental technique to measure thoron generation rate of building material samples using RAD7 detector. *Radiat. Meas.* <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2013.07.003>

Denaturing Thorium with Ionium – Energy From Thorium [WWW Document], n.d. URL <https://energyfromthorium.com/2006/10/06/denaturing-thorium-with-ionium/> (accessed 1.19.19).

- Denman, A.R., Parkinson, S., Johnstone, M., Crockett, R.G.M., Phillips, P.S., 2004. Radon in the workplace: Implications of studies of post-remediation monitoring. *Radiat. Prot. Dosimetry* 111, 51–54. <https://doi.org/10.1093/rpd/nch359>
- Dubois, G., Bossew, P., 2006. A European Atlas of Natural Radiations including harmonized radon maps of the European Union. What do we have, what do we know, quo vadimus?, in: ARPA Piemonte - Atti Del Terzo Convegno Nazionale Sugli Agenti Fisici.
- Durrige, 2017. RAD7 Electronic Radon Detector, User Manual.
- European Atlas of Natural Radiation, Geogenic radon [WWW Document], n.d. URL <https://remon.jrc.ec.europa.eu/About/Atlas-of-Natural-Radiation/Geogenic-radon/Geogenic-radon> (accessed 2.27.19).
- Forkapić, S., 2013. Istraživanje gasovitih radioaktivnih produkata uranijuma i torijuma. University of Novi Sad.
- Forkapić, S., Bikit, I., Slivka, J., Čonkić, L., Vesković, M., Todorović, N., Varga, E., Mrdda, D., Hulber, E., 2007. Indoor radon in rural dwellings of the South-Pannonian region. *Radiat. Prot. Dosimetry*. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncl156>
- Forkapic, S., Vasin, J., Bikit, I., Mrdja, D., Bikit, K., Milić, S., 2017. Correlations between soil characteristics and radioactivity content of Vojvodina soil. *J. Environ. Radioact.* 166, 104–111. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2016.04.003>
- García-Talavera, M., García-Pérez, A., Rey, C., Ramos, L., 2013. Mapping radon-prone areas using  $\gamma$ -radiation dose rate and geological information. *J. Radiol. Prot.* <https://doi.org/10.1088/0952-4746/33/3/605>
- Gierl, S., Meisenberg, O., Feistenauer, P., Tschiersch, J., 2014. Thoron and thoron progeny measurements in German clay houses. *Radiat. Prot. Dosimetry* 160, 160–163. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncu076>
- Grey, D.J., Windham, S.T., 1987. EERF standard operating procedures for radon-222 measurement using charcoal ... - David J. Gray, Sam T. Windham - Google Књиге, EPA.

- Gruber, V., Bossew, P., De Cort, M., Tollefsen, T., 2013. The European map of the geogenic radon potential. *J. Radiol. Prot.* <https://doi.org/10.1088/0952-4746/33/1/51>
- Gulan, L., Milic, G., Bossew, P., Omori, Y., Ishikawa, T., Mishra, R., Mayya, Y.S., Stojanovska, Z., Nikezic, D., Vuckovic, B., Zunic, Z.S., 2012. Field experience on indoor radon, thoron and their progenies with solid-state detectors in a survey of Kosovo and Metohija (Balkan region). *Radiat. Prot. Dosimetry.* <https://doi.org/10.1093/rpd/ncs221>
- Hopke, P.K., 1989. The initial behavior of  $^{218}\text{Po}$  in indoor air. *Environ. Int.* 15, 299–308. [https://doi.org/10.1016/0160-4120\(89\)90042-1](https://doi.org/10.1016/0160-4120(89)90042-1)
- Hosoda, M., Kudo, H., Iwaoka, K., Yamada, R., Suzuki, T., Tamakuma, Y., Tokonami, S., 2017. Characteristic of thoron ( $^{220}\text{Rn}$ ) in environment. *Appl. Radiat. Isot.* <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2016.11.014>
- I. Barnet, P. Pacherova, M.N., 2008a. Radon in geological environment—Czech experience Czech Geological Survey Special Papers, No. 19. Prague.
- I. Barnet, P. Pacherova, M.N., 2008b. Radon in geological environment—Czech experience Czech Geological Survey Special Papers, No. 19. Prague.
- ICRP. International Commission on Radiological Protection, 1990. Recommendations of The International Commission on Radiological Commission. *Ann. ICRP; ICRP Publ.* 60 21. <https://doi.org/10.1148/56.1.117>
- ICRP, 1994. ICRP Publication 66: Human respiratory tract model for radiological protection. *Ann. ICRP.* [https://doi.org/10.1016/0146-6453\(94\)90029-9](https://doi.org/10.1016/0146-6453(94)90029-9)
- ICRP Publication 103 The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, n.d. [https://doi.org/10.1177/ANIB\\_37\\_2-4](https://doi.org/10.1177/ANIB_37_2-4)
- Indoor-radon-concentration [WWW Document], n.d. . Eur. indoor radon map. URL <https://remon.jrc.ec.europa.eu/About/Atlas-of-Natural-Radiation/Indoor-radon-AM/Indoor-radon-concentration>
- Ishimori, Y., Lange, K., Martin, P., Mayya, Y.S., Phaneuf, M., 2013. Measurement and Calculation of Radon Releases from NORM Residues. Technical reports series No.

474. Vienna.

Jílek, K., Thomas, J., Tomásek, L., 2010. First results of measurement of equilibrium factors F and unattached fractions  $f_p$  of radon progeny in Czech dwellings. *Nukleonika*.

Kemski, J., Siehl, A., Stegemann, R., Valdivia-Manchego, M., 2001. Mapping the geogenic radon potential in Germany, in: *Science of the Total Environment*. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(01\)00696-9](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(01)00696-9)

Kolarž, P., Vaupotič, J., Kobal, I., Ujić, P., Stojanovska, Z., Žunić, Z.S., 2017. Thoron, radon and air ions spatial distribution in indoor air. *J. Environ. Radioact.* <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2016.11.006>

Laboratoire National Henry Becquerel [WWW Document], 2018. . Gif-sur-Yvette. URL <http://www.nucleide.org/Laraweb/index.php>

Maiello, M.L., Hoover, M.D., 2011. Radioactive air sampling methods. <https://doi.org/10.1201/b10261-33>

Marković, S.B., Bokhorst, M.P., Vandenberghe, J., McCoy, W.D., Oches, E.A., Hambach, U., Gaudenyi, T., Jovanović, M., Zöller, L., Stevens, T., Machallet, B., 2008. Late Pleistocene loess-palaeosol sequences in the Vojvodina region, north Serbia. *J. Quat. Sci.* <https://doi.org/10.1002/jqs.1124>

Mehra, R., Jakhu, R., Bangotra, P., Kaur, K., Mittal, H.M., 2016. Assessment of inhalation dose from the indoor  $^{222}\text{Rn}$  and  $^{220}\text{Rn}$  using RAD7 and pinhole cup dosimeters. *Radiat. Prot. Dosimetry*. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncw060>

Meisenberg, O., Tschiersch, J., 2010. Specific properties of a model of thoron and its decay products in indoor atmospheres. *Nukleonika*.

Miles, J.C.H., Appleton, J.D., 2005. Mapping variation in radon potential both between and within geological units. *J. Radiol. Prot.* <https://doi.org/10.1088/0952-4746/25/3/003>

Mishra, R., Mayya, Y.S., 2008. Study of a deposition-based direct thoron progeny sensor (DTPS) technique for estimating equilibrium equivalent thoron concentration



(EETC) in indoor environment. Radiat. Meas.  
<https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2008.03.002>

Mishra, R., Mayya, Y.S., Kushwaha, H.S., 2009. Measurement of  $^{220}\text{Rn}/^{222}\text{Rn}$  progeny deposition velocities on surfaces and their comparison with theoretical models. *J. Aerosol Sci.* <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2008.08.001>

Nero, A. V., Nazaroff, W.W., 1988. Radon and its decay products in indoor air. New York.

Pantelić, G., Čeliković, I., Živanović, M., Vukanac, I., Nikolić, J., Cinelli, G., Gruber, V., 2018. Literature review of Indoor radon surveys in Europe. <https://doi.org/10.2760/977726>

Porstendörfer, J., 1994. Properties and behaviour of radon and thoron and their decay products in the air. *J. Aerosol Sci.* 25, 219–263. [https://doi.org/10.1016/0021-8502\(94\)90077-9](https://doi.org/10.1016/0021-8502(94)90077-9)

Predrag UJIĆ, Igor ČELIKOVIĆ, Ahmed AWHIDA, B.L., Gordana PANTELIĆ, Ivana VUKANAC, Predrag KOLARŽ, A., KANDIĆ, Mirjana ĐURAŠEVIĆ, M.Ž., 2017. Proceedings XXIX SYMPOSIUM DZZSCG Srebrno jezero 27- 29. September 2017, in: Петровић, Д.Ј.С., Пантелић, Д.Г. (Eds.), MERENJE EKSHALACIJE RADONA IZ GRAĐEVINSKIH MATERIJALA. SOCIETY FOR RADIATION PROTECTION OF SERBIA AND MONTENEGRO, Srebrno jezero, pp. 219–214.

Radon - Element information, properties and uses | Periodic Table [WWW Document], n.d. URL <http://www.rsc.org/periodic-table/element/86/radon> (accessed 1.22.19).

Raes, F., Janssens, A., Vanmarcke, H., 1985. A closer look at the behaviour of radioactive decay products in air. *Sci. Total Environ.* 45, 205–208. [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(85\)90222-0](https://doi.org/10.1016/0048-9697(85)90222-0)

Report of Committee II on permissible dose for internal radiation (1959), 1960. . *Ann. ICRP/ICRP Publ. OS\_2*, i–v. <https://doi.org/10.1016/S0074-27406080001-3>

Sabol, J., Weng, P.-S., 1995. Introduction to Radiation Protection Dosimetry. *WORLD SCIENTIFIC*. <https://doi.org/10.1142/2612>

Services, S., 2007. Safe handling of radioactive materials.

Skeppström, K., Wåhlin, E., 2015. Is thoron a problem in Swedish dwellings? Results of measurements of concentrations of thoron and its progeny. *Radiat. Prot. Dosimetry* 167, 107–110. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncv212>

The Council of the European Union, 2013. Council Directive 2013/59/Euratom: laying down basic safety standards for protection against the dangers arising from exposure to ionising radiation, *Official Journal of European Union*. [https://doi.org/doi:10.3000/19770677.L\\_2013.124.eng](https://doi.org/doi:10.3000/19770677.L_2013.124.eng)

Ting, D.S., 2010. WHO Handbook on Indoor Radon: A Public Health Perspective. *Int. J. Environ. Stud.* <https://doi.org/10.1080/00207230903556771>

Tollefsen, T., Cinelli, G., Bossew, P., Gruber, V., De Cort, M., 2014. From the European indoor radon map towards an atlas of natural radiation. *Radiat. Prot. Dosimetry*. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncu244>

Udovičić, V., Maletić, D., Savković, M.E., Pantelić, G., Ujić, P., Čeliković, I., Forkapić, S., Nikezić, D., Marković, V.M., Arsić, V., Ilić, J., 2016. First steps towards national radon action plan in Serbia. *Nukleonika*. <https://doi.org/10.1515/nuka-2016-0060>

United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 2008. Annex B. Exposures of the Public and Workers From Various Sources of Radiation. *Unsear 2008 Rep.* <https://doi.org/10.1097/00004032-199907000-00007>

United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 2000. Sources and Effects of Ionizing Radiation: Sources Annex B. Exposures from natural radiation sources, *United Nations Publications*. <https://doi.org/10.1097/00004032-199907000-00007>

UNSCEAR, 2006. ANNEX E Sources-to-effects assessment for radon in homes and workplaces. *United Nations Sci. Comm. Eff. At. Radiat. 2006 Report, Vol. II*. <https://doi.org/10.3868/s050-004-015-0003-8>

UNSCEAR, 2000. Sources and effects of ionizing radiation: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. *UNSCEAR 2000 Rep. to Gen.*

Assem. <https://doi.org/10.1140/epje/i2005-10067-9>

Uranium Isotopes [WWW Document], 2018. . Glob. Secur. URL <https://www.globalsecurity.org/wmd/intro/u-isotopes.htm> (accessed 1.19.19).

Urosevic, V., Nikezic, D., Vulovic, S., 2008. A theoretical approach to indoor radon and thoron distribution. *J. Environ. Radioact.* <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2008.07.010>

User Manual, 2012. AlphaGUARD Portable Radon Monitor, Genitron Instrument GmbH, Model PQ 2000 PRO 1–59.

USGS Open-File Report 2006-1195: Nomenclature [WWW Document], n.d. . U.S. Geol. Surv. Open-File Rep. 2006-1195. URL <https://pubs.usgs.gov/of/2006/1195/htmldocs/nomenclature.htm> (accessed 3.7.19).

Vaupotic, J., Celikovic, I., Smrekar, N., Zunic, Z.S., Kobal, I., 2008. Concentrations of Rn-222 and Rn-220 in indoor air. *Acta Chim. Slov.*

Vogiannis, E.G., Nikolopoulos, D., 2015. Radon Sources and Associated Risk in Terms of Exposure and Dose. *Front. Public Heal.* <https://doi.org/10.3389/fpubh.2014.00207>

WHO, 2009. WHO Handbook on Indoor Radon, *International Journal of Environmental Studies*. <https://doi.org/10.1080/00207230903556771>

Willeke, K., Baron, P.A. (Paul A., 1993. *Aerosol measurement: principles, techniques, and applications*, Published in **1993** in New York (N.Y.) by Van Nostrand Reinhold. Van Nostrand Reinhold.

Zunic, Z.S., Stojanovska, Z., Veselinovic, N., Mishra, R., Yarmoshenko, I. V., Sapa, B.K., Ishikawa, T., Omori, Y., Curguz, Z., Bossew, P., Udovicic, V., Ramola, R.C., 2017. Indoor radon, thoron and their progeny concentrations in high thoron rural Serbia environments. *Radiat. Prot. Dosimetry*. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncx167>

## Biografija



Robert Lakatoš rođen je 09.09.1988. u Novom Sadu. Nakon završene srednje Elektrotehničke škole “Mihajlo Pupin” u Novom Sadu upisuje studije medicinske fizike 2007. godine na Prirodno-matematičkom fakultetu, Univerziteta u Novom Sadu. Osnovne studije obima 180 ESPB završava aprila 2011. godine sa prosečnom ocenom 8,93, a master studije istog studijskog programa (obima 120 ESPB)

11.09.2012. godine sa prosekom 8,80. Doktorske akademske studije fizike upisao je 2013. godine na Prirodno-matematičkom fakultetu u Novom Sadu.

Zaposlen je na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu od januara 2013. godine i u zvanju je asistenta na Katedri za Fiziku.

# Prilozi

## 1. Primer izračunavanja EETC u softverskom paketu Mathematica

In[1]:= **L4 = Log[2] / 10.64 / 60 / 60**

Out[1]:= **0.0000180959**

In[2]:= **L5 = Log[2] / 60.60 / 60**

Out[2]:= **0.000190635**

In[3]:= **PG4 = 0.436**

Out[3]:= **0.436**

In[4]:= **PG5 = 0.0665**

Out[4]:= **0.0665**

In[5]:= **EPS4 = 0.0557**

Out[5]:= **0.0557**

In[6]:= **EPS5 = 0.0223**

Out[6]:= **0.0223**

In[7]:= **v = 0.03055**

Out[7]:= **0.03055**

In[8]:= **ef = 0.98**

Out[8]:= **0.98**

In[9]:= **t1 = 3600**

Out[9]:= **3600**

In[10]:= **Th = 17400**

Out[10]:= **17400**

In[11]:= **Thm = 18400**

Out[11]:= **18400**

In[12]:= **Clear[n4]**

In[13]:= **Clear[n5]**

In[14]:= **Clear[A4]**

In[15]:= **Clear[A5]**

In[16]:=  $N4 = n4 \text{ v ef} / L4 (1 - \text{Exp}[-L4 t1])$

Out[16]= 104.345 n4

In[17]:=  $N5 =$

$\text{v ef} / L5 (n4 (1 - L5 / (L5 - L4) \text{Exp}[-L4 t1] + L4 / (L5 - L4) \text{Exp}[-L5 t1]) + n5 (1 - \text{Exp}[-L5 t1]))$

Out[17]= 157.049 (0.0176043 n4 + 0.496557 n5)

In[18]:=  $P1 = N4 (\text{Exp}[-L4 Th])$

Out[18]= 76.1595 n4

In[19]:=  $P2 = N4 (\text{Exp}[-L4 Thm])$

Out[19]= 74.7938 n4

In[20]:=  $Q1 = N4 L4 / (L5 - L4) (\text{Exp}[-L4 Th] - \text{Exp}[-L5 Th]) + N5 \text{Exp}[-L5 Th]$

Out[20]= 7.59084 n4 + 5.6946 (0.0176043 n4 + 0.496557 n5)

In[21]:=  $Q2 = N4 L4 / (L5 - L4) (\text{Exp}[-L4 Thm] - \text{Exp}[-L5 Th]) + N5 \text{Exp}[-L5 Thm]$

Out[21]= 7.44759 n4 + 4.70621 (0.0176043 n4 + 0.496557 n5)

In[22]:=  $\text{NSolve}[4305 / PG4 / EPS4 == P1 - P2]$

Out[22]= { { n4 → 129 792. } }

In[24]:=  $n4 = 129 792$

Out[24]= 129 792

In[25]:=  $\text{NSolve}[210 / PG5 / EPS5 == Q1 - Q2, \{n5\}]$

Out[25]= { { n5 → 246 051. } }

In[26]:=  $n5 = 246 051$

Out[26]= 246 051

In[27]:=  $A4 = n4 L4$

Out[27]= 2.34871

In[28]:=  $A5 = n5 L5$

Out[28]= 46.9058

In[29]:=  $\text{EEC} = A4 * 0.91 + A5 * 0.09$

Out[29]= 6.35885

## 2. Izveštaj Malvern Mastersizera 2000



# MASTERSIZER



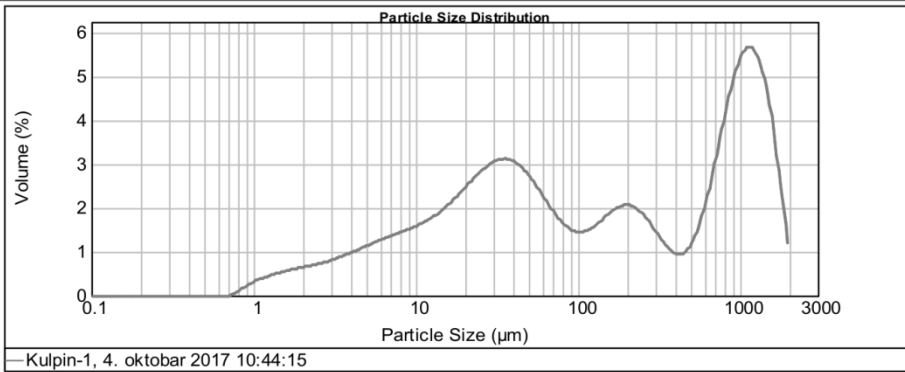
### Result Analysis Report

**Sample Name:** Kulpin-1  
**Sample Source & type:**  
**Sample bulk lot ref:**  
**SOP Name:**  
**Measured by:** User  
**Result Source:** Edited  
**Measured:** 4. oktobar 2017 10:44:15  
**Analysed:** 4. oktobar 2017 10:46:17

**Particle Name:** Zemljiste  
**Particle RI:** 1.500  
**Dispersant Name:**  
**Accessory Name:** Scirocco 2000  
**Absorption:** 0.1  
**Dispersant RI:** 1.000  
**Analysis model:** General purpose  
**Size range:** 0.020 to 2000.000 um  
**Weighted Residual:** 0.773 %  
**Sensitivity:** Normal  
**Obscuration:** 1.61 %  
**Result Emulation:** Off

**Concentration:** 0.0008 %Vol  
**Specific Surface Area:** 0.355 m<sup>2</sup>/g  
**Span :** 11.963  
**Surface Weighted Mean D[3,2]:** 16.890 um  
**Uniformity:** 3.72  
**Vol. Weighted Mean D[4,3]:** 431.599 um  
**Result units:** Volume

d(0.1): 6.585 um                      d(0.5): 108.202 um                      d(0.9): 1300.978 um



Kulpin-1, 4. oktobar 2017 10:44:15

Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %
0.010	0.00	0.105	0.00	1.096	0.38	11.482	1.59	120.226	1.46	1258.925	4.68
0.011	0.00	0.120	0.00	1.259	0.45	13.183	1.74	138.038	1.63	1445.440	3.74
0.013	0.00	0.138	0.00	1.445	0.50	15.136	1.91	158.489	1.79	1659.587	2.21
0.015	0.00	0.158	0.00	1.660	0.55	17.378	2.11	181.970	1.86	1905.461	0.54
0.017	0.00	0.182	0.00	1.905	0.59	19.953	2.33	208.930	1.82	2187.762	0.00
0.020	0.00	0.209	0.00	2.188	0.63	22.909	2.53	239.883	1.64	2511.886	0.00
0.023	0.00	0.240	0.00	2.512	0.68	26.303	2.70	275.423	1.37	2884.032	0.00
0.026	0.00	0.275	0.00	2.884	0.74	30.200	2.80	316.228	1.08	3311.311	0.00
0.030	0.00	0.316	0.00	3.311	0.82	34.674	2.81	363.078	0.88	3801.894	0.00
0.035	0.00	0.363	0.00	3.802	0.90	39.811	2.71	416.869	0.88	4365.158	0.00
0.040	0.00	0.417	0.00	4.365	0.99	45.709	2.51	478.630	1.15	5011.872	0.00
0.046	0.00	0.479	0.00	5.012	1.07	52.481	2.23	549.541	1.72	5754.399	0.00
0.052	0.00	0.550	0.00	5.754	1.16	60.256	1.92	630.957	2.55	6606.934	0.00
0.060	0.00	0.631	0.00	6.607	1.24	69.183	1.63	724.436	3.50	7585.776	0.00
0.069	0.00	0.724	0.07	7.586	1.31	79.433	1.41	831.764	4.38	8709.636	0.00
0.079	0.00	0.832	0.19	8.710	1.39	91.201	1.31	954.993	4.98	10000.000	0.00
0.091	0.00	0.955	0.31	10.000	1.48	104.713	1.34	1096.478	5.11		
0.105	0.00	1.096		11.482		120.226		1258.925			

Operator notes: Usitnjeno u avanu

### 3. Statistička obrada podataka u SPSS softverskom paketu

```

GET
FILE='D:\SELENA\SPSS\RobySofy.sav'.
DATASET NAME DataSet1 WINDOW=FRONT.
GET
FILE='D:\SELENA\SPSS\RobyDoc1705.sav'.
DATASET NAME DataSet2 WINDOW=FRONT.
DATASET ACTIVATE DataSet1.
CORRELATIONS
/VARIABLES=temperatura pritisak vlaznost Radon
/PRINT=TWOTAIL NOSIG
/STATISTICS DESCRIPTIVES
/MISSING=PAIRWISE.

```

#### Correlations

		Notes	
Output Created			04-MAR-2019 13:19:46
Comments			
Input	Data	D:\SELENA\SPSS\RobySofy.sav	
	Active Dataset	DataSet1	
	Filter	<none>	
	Weight	<none>	
	Split File	<none>	
	N of Rows in Working Data File		336
Missing Value Handling	Definition of Missing	User-defined missing values are treated as missing.	
	Cases Used	Statistics for each pair of variables are based on all the cases with valid data for that pair.	
Syntax		CORRELATIONS /VARIABLES=temperatura pritisak vlaznost Radon /PRINT=TWOTAIL NOSIG /STATISTICS DESCRIPTIVES /MISSING=PAIRWISE.	
Resources	Processor Time		0 00:00:00.06
	Elapsed Time		0 00:00:00.06



[DataSet1] D:\SELENA\SPSS\RobySofy.sav

**Descriptive Statistics**

	Mean	Std. Deviation	N
temp	14.8960	1.66696	336
pritisak	1013.6482	5.47584	336
vlaznost	63.2190	1.44139	336
Rn222	457.0754	135.54429	333

**Correlations**

		temp	pritisak	vlaznost	Rn222
temp	Pearson Correlation	1	.447**	.846**	.532**
	Sig. (2-tailed)		.000	.000	.000
	N	336	336	336	333
pritisak	Pearson Correlation	.447**	1	.358**	.304**
	Sig. (2-tailed)	.000		.000	.000
	N	336	336	336	333
vlaznost	Pearson Correlation	.846**	.358**	1	.497**
	Sig. (2-tailed)	.000	.000		.000
	N	336	336	336	333
Rn222	Pearson Correlation	.532**	.304**	.497**	1
	Sig. (2-tailed)	.000	.000	.000	
	N	333	333	333	333

\*\* . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

```
REGRESSION
/MISSING LISTWISE
/STATISTICS COEFF OUTS CI(95) R ANOVA CHANGE ZPP
/CRITERIA=PIN(.05) POUT(.10)
/NOORIGIN
/DEPENDENT Radon
/METHOD=ENTER temperatura pritisak vlaznost.
```

## Regression

### Notes

Output Created		04-MAR-2019 13:22:01
Comments		
Input	Data	D:\SELENA\SPSS\RobySofy.sav
	Active Dataset	DataSet1
	Filter	<none>
	Weight	<none>
	Split File	<none>
	N of Rows in Working Data File	336
Missing Value Handling	Definition of Missing Cases Used	User-defined missing values are treated as missing. Statistics are based on cases with no missing values for any variable used.
Syntax		REGRESSION /MISSING LISTWISE /STATISTICS COEFF OUTS CI(95) R ANOVA CHANGE ZPP /CRITERIA=PIN(.05) POUT(.10) /NOORIGIN /DEPENDENT Radon /METHOD=ENTER temperatura pritisak vlaznost.
Resources	Processor Time	0 00:00:00.09
	Elapsed Time	0 00:00:00.16
	Memory Required	2068 bytes
	Additional Memory Required for Residual Plots	0 bytes

[DataSet1] D:\SELENA\SPSS\RobySofy.sav

### Variables Entered/Removed<sup>a</sup>

Model	Variables Entered	Variables Removed	Method
1	vlaznost, pritisak, temp <sup>b</sup>	.	Enter

- a. Dependent Variable: Rn222  
b. All requested variables entered.

#### Model Summary

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate	Change Statistics			
					R Square Change	F Change	df1	df2
1	.545 <sup>a</sup>	.297	.290	114.18480	.297	46.275	3	329

Model	Sig. F Change
1	.000

- a. Predictors: (Constant), vlaznost, pritisak, temp

#### ANOVA<sup>a</sup>

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	1810031.005	3	603343.668	46.275	.000 <sup>b</sup>
	Residual	4289557.236	329	13038.168		
	Total	6099588.241	332			

- a. Dependent Variable: Rn222  
b. Predictors: (Constant), vlaznost, pritisak, temp

#### Coefficients<sup>a</sup>

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	-3208.288	1355.893		-2.366	.019
	temp	28.216	7.363	.347	3.832	.000

Model	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
	B	Std. Error	Beta		
pritisak	2.201	1.279	.089	1.721	.086
vlaznost	16.033	8.150	.171	1.967	.050

Model	95.0% Confidence Interval for B			Correlations		
	Lower Bound	Upper Bound	Zero-order	Partial	Part	
1 (Constant)	-5875.602	-540.975				
temp	13.732	42.699	.532	.207	.177	
pritisak	-.315	4.717	.304	.094	.080	
vlaznost	.000	32.067	.497	.108	.091	

a. Dependent Variable: Rn222

```
NONPAR CORR
/VARIABLES=EETC Thoron
/PRINT=SPEARMAN TWOTAIL NOSIG
/MISSING=PAIRWISE.
```

#### Notes

Output Created	04-MAR-2019 17:52:45	
Comments		
Input	Data	D:\SELENA\SPSS\RobySofy.sav
	Active Dataset	DataSet1
	Filter	<none>
	Weight	<none>
	Split File	<none>
	N of Rows in Working Data File	336
Missing Value Handling	Definition of Missing	User-defined missing values are treated as missing.
	Cases Used	Statistics for each pair of variables are based on all the cases with valid data for that pair.
Syntax	NONPAR CORR	

Page 5

		/VARIABLES=EETC Thoron /PRINT=SPEARMAN TWOTAIL NOSIG /MISSING=PAIRWISE.	
Resources	Processor Time		0 00:00:00.03
	Elapsed Time		0 00:00:00.03
	Number of Cases Allowed	174762 cases <sup>a</sup>	

a. Based on availability of workspace memory

[DataSet1] D:\SELENA\SPSS\RobySofy.sav

### Nonparametric Correlations

#### Notes

Output Created		04-MAR-2019 17:54:31	
Comments			
Input	Data	D:\SELENA\SPSS\RobySofy.sav	
	Active Dataset	DataSet1	
	Filter	<none>	
	Weight	<none>	
	Split File	<none>	
	N of Rows in Working Data File		336
Missing Value Handling	Definition of Missing	User-defined missing values are treated as missing.	
	Cases Used	Statistics for each pair of variables are based on all the cases with valid data for that pair.	
Syntax		NONPAR CORR /VARIABLES=EETC Ctn /PRINT=SPEARMAN TWOTAIL NOSIG /MISSING=PAIRWISE.	
Resources	Processor Time		0 00:00:00.02
	Elapsed Time		0 00:00:00.02

Page 6

Number of Cases Allowed	174762 cases <sup>a</sup>
-------------------------	---------------------------

a. Based on availability of workspace memory

[DataSet1] D:\SELENA\SPSS\RobySofy.sav

**Correlations**

			EETC	CTn
Spearman's rho	EETC	Correlation Coefficient	1.000	.360
		Sig. (2-tailed)	.	.188
		N	15	15
CTn	CTn	Correlation Coefficient	.360	1.000
		Sig. (2-tailed)	.188	.
		N	15	15

```

DATASET ACTIVATE DataSet2.
CORRELATIONS
/VARIABLES=RAD7Rn222 charcoalCanister CR39
/PRINT=TWOTAIL NOSIG
/STATISTICS DESCRIPTIVES
/MISSING=PAIRWISE.

```

**Correlations**

**Notes**

Output Created	04-MAR-2019 18:00:06	
Comments		
Input	Data	D:\SELENA\SPSS\RobyDoc1705.sav
	Active Dataset	DataSet2
	Filter	<none>
	Weight	<none>
	Split File	<none>
	N of Rows in Working Data File	15

Missing Value Handling	Definition of Missing Cases Used	User-defined missing values are treated as missing.
Syntax		Statistics for each pair of variables are based on all the cases with valid data for that pair. CORRELATIONS /VARIABLES=RAD7Rn222 charcoalCanister CR39 /PRINT=TWOTAIL NOSIG /STATISTICS DESCRIPTIVES /MISSING=PAIRWISE.
Resources	Processor Time	0 00:00:00.05
	Elapsed Time	0 00:00:00.08

[DataSet2] D:\SELENA\SPSS\RobyDoc1705.sav

#### Descriptive Statistics

	Mean	Std. Deviation	N
trenutno Radon	132.39	157.089	14
48h Radon	208.37	233.168	14
sr godišnje Radon	289.7143	274.32250	14

#### Correlations

		trenutno Radon	48h Radon	sr godišnje Radon
trenutno Radon	Pearson Correlation	1	.864**	.533*
	Sig. (2-tailed)		.000	.050
	N	14	14	14
48h Radon	Pearson Correlation	.864**	1	.805**
	Sig. (2-tailed)	.000		.001
	N	14	14	14
sr godišnje Radon	Pearson Correlation	.533*	.805**	1
	Sig. (2-tailed)	.050	.001	
	N	14	14	14

Page 8

- \*\*.
- Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).
- \*.
- Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

```

CORRELATIONS
/VARIABLES=ur238 Ra226 Th232 Rn222 Rn220
/PRINT=TWOTAIL NOSIG
/STATISTICS DESCRIPTIVES
/MISSING=PAIRWISE.

```

### Correlations

#### Notes

Output Created		04-MAR-2019 18:02:43
Comments		
Input	Data	D:\SELENA\SPSS\RobyDoc1705.sav
	Active Dataset	DataSet2
	Filter	<none>
	Weight	<none>
	Split File	<none>
	N of Rows in Working Data File	15
Missing Value Handling	Definition of Missing	User-defined missing values are treated as missing.
	Cases Used	Statistics for each pair of variables are based on all the cases with valid data for that pair.
Syntax		CORRELATIONS /VARIABLES=ur238 Ra226 Th232 Rn222 Rn220 /PRINT=TWOTAIL NOSIG /STATISTICS DESCRIPTIVES /MISSING=PAIRWISE.
Resources	Processor Time	0 00:00:00.05
	Elapsed Time	0 00:00:00.06



[DataSet2] D:\SELENA\SPSS\RobyDoc1705.sav

### Descriptive Statistics

	Mean	Std. Deviation	N
zemlja uranijum	30.69	9.345	14
zemlja radijum	28.92	6.026	14
zemlja thorijum	36.92	7.889	14
zemlja radon	18865.07	12935.106	14
zemlja toron	436.6667	275.73493	9

### Correlations

		zemlja uranijum	zemlja radijum	zemlja thorijum	zemlja radon	zemlja toron
zemlja uranijum	Pearson Correlation	1	.416	.066	-.154	-.227
	Sig. (2-tailed)		.139	.822	.599	.557
	N	14	14	14	14	9
zemlja radijum	Pearson Correlation	.416	1	.770**	.458	-.476
	Sig. (2-tailed)	.139		.001	.100	.195
	N	14	14	14	14	9
zemlja thorijum	Pearson Correlation	.066	.770**	1	.727**	-.208
	Sig. (2-tailed)	.822	.001		.003	.592
	N	14	14	14	14	9
zemlja radon	Pearson Correlation	-.154	.458	.727**	1	-.267
	Sig. (2-tailed)	.599	.100	.003		.487
	N	14	14	14	14	9
zemlja toron	Pearson Correlation	-.227	-.476	-.208	-.267	1
	Sig. (2-tailed)	.557	.195	.592	.487	

Page 10

	zemlja uranijum	zemlja radijum	zemlja thorijum	zemlja radon	zemlja toron
N	9	9	9	9	9

\*\*.  
Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

```
REGRESSION
/MISSING LISTWISE
/STATISTICS COEFF OUTS CI(95) R ANOVA CHANGE ZPP
/CRITERIA=PIN(.05) POUT(.10)
/NOORIGIN
/DEPENDENT RAD7Rn222
/METHOD=ENTER ur238 Ra226 Rn222.
```

## Regression

### Notes

Output Created		04-MAR-2019 18:06:35
Comments		
Input	Data	D:\SELENA\SPSS\RobyDoc1705.sav
	Active Dataset	DataSet2
	Filter	<none>
	Weight	<none>
	Split File	<none>
	N of Rows in Working Data File	15
Missing Value Handling	Definition of Missing	User-defined missing values are treated as missing.
	Cases Used	Statistics are based on cases with no missing values for any variable used.
Syntax		REGRESSION /MISSING LISTWISE /STATISTICS COEFF OUTS CI(95) R ANOVA CHANGE ZPP /CRITERIA=PIN(.05) POUT(.10) /NOORIGIN /DEPENDENT RAD7Rn222 /METHOD=ENTER ur238 Ra226 Rn222.

Page 11

Resources	Processor Time	0 00:00:00.03
	Elapsed Time	0 00:00:00.06
	Memory Required	2412 bytes
	Additional Memory Required for Residual Plots	0 bytes

[DataSet2] D:\SELENA\SPSS\RobyDoc1705.sav

#### Variables Entered/Removed<sup>a</sup>

Model	Variables Entered	Variables Removed	Method
1	zemlja radon, zemlja uranijum, zemlja radijum <sup>b</sup>	.	Enter

a. Dependent Variable: trenutno Radon

b. All requested variables entered.

#### Model Summary

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate	Change Statistics			
					R Square Change	F Change	df1	df2
1	.783 <sup>a</sup>	.613	.496	111.474	.613	5.272	3	10

Model	Sig. F Change
1	.019

a. Predictors: (Constant), zemlja radon, zemlja uranijum, zemlja radijum

#### ANOVA<sup>a</sup>

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	196535.104	3	65511.701	5.272	.019 <sup>b</sup>

Page 12

Model	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Residual	124264.366	10	12426.437		
Total	320799.469	13			

- a. Dependent Variable: trenutno Radon  
b. Predictors: (Constant), zemlja radon, zemlja uranijum, zemlja radijum

#### Coefficients<sup>a</sup>

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	261.053	157.760		1.655	.129
	zemlja uranijum	11.323	4.020	.674	2.817	.018
	zemlja radijum	-23.313	6.929	-.894	-3.364	.007
	zemlja radon	.010	.003	.864	3.533	.005

Model		95.0% Confidence Interval for B		Correlations		
		Lower Bound	Upper Bound	Zero-order	Partial	Part
		1	(Constant)	-90.457	612.563	
	zemlja uranijum	2.366	20.281	.169	.665	.554
	zemlja radijum	-38.752	-7.873	-.218	-.729	-.662
	zemlja radon	.004	.017	.351	.745	.695

- a. Dependent Variable: trenutno Radon

```
REGRESSION
/MISSING LISTWISE
/STATISTICS COEFF OUTS CI(95) R ANOVA CHANGE ZPP
/CRITERIA=PIN(.05) POUT(.10)
/NOORIGIN
```

/DEPENDENT charcoalCanister  
 /METHOD=ENTER ur238 Ra226 Rn222.

## Regression

### Notes

Output Created	04-MAR-2019 18:12:49	
Comments		
Input	Data	D:\SELENA\SPSS\RobyDoc1705.sav
	Active Dataset	DataSet2
	Filter	<none>
	Weight	<none>
	Split File	<none>
	N of Rows in Working Data File	15
Missing Value Handling	Definition of Missing	User-defined missing values are treated as missing.
	Cases Used	Statistics are based on cases with no missing values for any variable used.
Syntax	REGRESSION /MISSING LISTWISE /STATISTICS COEFF OUTS CI(95) R ANOVA CHANGE ZPP /CRITERIA=PIN(.05) POUT(.10) /NOORIGIN /DEPENDENT charcoalCanister /METHOD=ENTER ur238 Ra226 Rn222.	
Resources	Processor Time	0 00:00:00.05
	Elapsed Time	0 00:00:00.05
	Memory Required	2412 bytes
	Additional Memory Required for Residual Plots	0 bytes

[DataSet2] D:\SELENA\SPSS\RobyDoc1705.sav

### Variables Entered/Removed<sup>a</sup>

Model	Variables Entered	Variables Removed	Method
1	zemlja radon, zemlja uranijum, zemlja radijum <sup>b</sup>	.	Enter

- a. Dependent Variable: 48h Radon  
 b. All requested variables entered.

### Model Summary

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate	Change Statistics			
					R Square Change	F Change	df1	df2
1	.633 <sup>a</sup>	.401	.221	205.803	.401	2.229	3	10
Model	Sig. F Change							
1	.148							

- a. Predictors: (Constant), zemlja radon, zemlja uranijum, zemlja radijum

### ANOVA<sup>a</sup>

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	283225.816	3	94408.605	2.229	.148 <sup>b</sup>
	Residual	423550.492	10	42355.049		
	Total	706776.309	13			

- a. Dependent Variable: 48h Radon  
 b. Predictors: (Constant), zemlja radon, zemlja uranijum, zemlja radijum

### Coefficients<sup>a</sup>

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	263.736	291.256		.906	.386
	zemlja uranijum	11.175	7.422	.448	1.506	.163
	zemlja radijum	-22.841	12.793	-.590	-1.785	.105
	zemlja radon	.014	.005	.771	2.534	.030

Model		95.0% Confidence Interval for B		Correlations		
		Lower Bound	Upper Bound	Zero-order	Partial	Part
1	(Constant)	-385.223	912.695			
	zemlja uranijum	-5.363	27.712	.084	.430	.369
	zemlja radijum	-51.346	5.664	-.051	-.492	-.437
	zemlja radon	.002	.026	.432	.625	.620

a. Dependent Variable: 48h Radon

```

REGRESSION
/MISSING LISTWISE
/STATISTICS COEFF OUTS CI(95) R ANOVA CHANGE ZPP
/CRITERIA=PIN(.05) POUT(.10)
/NOORIGIN
/DEPENDENT charcoalCanister
/METHOD=ENTER ur238 Ra226 Rn222 clay.

```

## Regression

### Notes

Output Created	04-MAR-2019 18:13:05
Comments	

Input	Data	D:\SELENA\SPSS\RobyDoc1705.sav
	Active Dataset	DataSet2
	Filter	<none>
	Weight	<none>
	Split File	<none>
	N of Rows in Working Data File	15
Missing Value Handling	Definition of Missing	User-defined missing values are treated as missing.
	Cases Used	Statistics are based on cases with no missing values for any variable used.
Syntax		REGRESSION /MISSING LISTWISE /STATISTICS COEFF OUTS CI(95) R ANOVA CHANGE ZPP /CRITERIA=PIN(.05) POUT(.10) /NOORIGIN /DEPENDENT charcoalCanister /METHOD=ENTER ur238 Ra226 Rn222 clay.
Resources	Processor Time	0 00:00:00.11
	Elapsed Time	0 00:00:00.16
	Memory Required	2732 bytes
	Additional Memory Required for Residual Plots	0 bytes

[DataSet2] D:\SELENA\SPSS\RobyDoc1705.sav

#### Variables Entered/Removed<sup>a</sup>

Model	Variables Entered	Variables Removed	Method
1	clay, zemlja uranijum, zemlja radon, zemlja radijum <sup>b</sup>	.	Enter

a. Dependent Variable: 48h Radon

b. All requested variables entered.



**Model Summary**

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate	Change Statistics			
					R Square Change	F Change	df1	df2
1	.779 <sup>a</sup>	.607	.432	175.775	.607	3.469	4	9

Model	Sig. F Change
1	.056

a. Predictors: (Constant), clay, zemlja uranijum, zemlja radon, zemlja radijum

**ANOVA<sup>a</sup>**

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	428703.225	4	107175.806	3.469	.056 <sup>b</sup>
	Residual	278073.084	9	30897.009		
	Total	706776.309	13			

a. Dependent Variable: 48h Radon

b. Predictors: (Constant), clay, zemlja uranijum, zemlja radon, zemlja radijum

**Coefficients<sup>a</sup>**

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	97.863	260.240		.376	.716
	zemlja uranijum	10.836	6.341	.434	1.709	.122
	zemlja radijum	-31.429	11.621	-.812	-2.704	.024
	zemlja radon	.012	.005	.659	2.485	.035

Model	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
	B	Std. Error	Beta		
clay	74.432	34.302	.541	2.170	.058

Model		95.0% Confidence Interval for B		Correlations		
		Lower Bound	Upper Bound	Zero-order	Partial	Part
1	(Constant)	-490.842	686.567			
	zemlja uranijum	-3.509	25.180	.084	.495	.357
	zemlja radijum	-57.719	-5.140	-.051	-.670	-.565
	zemlja radon	.001	.023	.432	.638	.520
	clay	-3.165	152.029	.451	.586	.454

a. Dependent Variable: 48h Radon

```

REGRESSION
/MISSING LISTWISE
/STATISTICS COEFF OUTS CI(95) R ANOVA CHANGE ZPP
/CRITERIA=PIN(.05) POUT(.10)
/NOORIGIN
/DEPENDENT charcoalCanister
/METHOD=ENTER ur238 Ra226 Rn222 clay RAD7Rn222.

```

## Regression

### Notes

Output Created	04-MAR-2019 18:14:40	
Comments		
Input	Data	D:\SELENA\SPSS\RobyDoc1705.sav
	Active Dataset	DataSet2
	Filter	<none>
	Weight	<none>
	Split File	<none>

Page 19

	N of Rows in Working Data File		15
Missing Value Handling	Definition of Missing Cases Used	User-defined missing values are treated as missing. Statistics are based on cases with no missing values for any variable used.	
Syntax		REGRESSION /MISSING LISTWISE /STATISTICS COEFF OUTS CI(95) R ANOVA CHANGE ZPP /CRITERIA=PIN(.05) POUT(.10) /NOORIGIN /DEPENDENT charcoalCanister /METHOD=ENTER ur238 Ra226 Rn222 clay RAD7Rn222.	
Resources	Processor Time		0 00:00:00.19
	Elapsed Time		0 00:00:00.19
	Memory Required	3092 bytes	
	Additional Memory Required for Residual Plots	0 bytes	

[DataSet2] D:\SELENA\SPSS\RobyDoc1705.sav

#### Variables Entered/Removed<sup>a</sup>

Model	Variables Entered	Variables Removed	Method
1	trenutno Radon, zemlja uranijum, clay, zemlja radon, zemlja radijum <sup>b</sup>	.	Enter

a. Dependent Variable: 48h Radon

b. All requested variables entered.

#### Model Summary

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate	Change Statistics			
					R Square Change	F Change	df1	df2
1	.916 <sup>a</sup>	.838	.737	119.495	.838	8.299	5	8

Model	Sig. F Change
1	.005

a. Predictors: (Constant), trenutno Radon, zemlja uranijum, clay, zemlja radon, zemlja radijum

#### ANOVA<sup>a</sup>

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	592543.496	5	118508.699	8.299	.005 <sup>b</sup>
	Residual	114232.812	8	14279.102		
	Total	706776.309	13			

a. Dependent Variable: 48h Radon

b. Predictors: (Constant), trenutno Radon, zemlja uranijum, clay, zemlja radon, zemlja radijum

#### Coefficients<sup>a</sup>

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	-151.912	191.668		-.793	.451
	zemlja uranijum	-3.234	5.986	-.130	-.540	.604
	zemlja radijum	1.921	12.623	.050	.152	.883
	zemlja radon	.000	.005	-.020	-.074	.943
	clay	39.301	25.522	.286	1.540	.162

Page 21

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
	trenutno Radon	1.257	.371	.847	3.387	.010
Model		95.0% Confidence Interval for B		Correlations		
		Lower Bound	Upper Bound	Zero-order	Partial	Part
1	(Constant)	-593.898	290.074			
	zemlja uranijum	-17.039	10.570	.084	-.188	-.077
	zemlja radijum	-27.189	31.031	-.051	.054	.022
	zemlja radon	-.012	.011	.432	-.026	-.011
	clay	-19.551	98.154	.451	.478	.219
	trenutno Radon	.401	2.112	.864	.768	.481

a. Dependent Variable: 48h Radon

## 4. Wentworth-ova skala veličine čestica

Φ	PHI - mm CONVERSION $\phi = \log_2 (d \text{ in mm})$ 1 μm = 0.001 mm		Fractional mm and Decimal inches	SIZE TERMS (after Wentworth, 1922)	SIEVE SIZES		Intermediate diameters of natural grains equivalent to sieve size	Number of grains per mg		Settling Velocity (Quartz, 20°C)		Threshold Velocity for traction cm/sec	
	mm				ASTM No. (U.S. Standard)	Tyler Mesh No.		Quartz spheres	Natural sand	Spheres (Gibbs, 1971) cm/sec	Crushed	(Nevin, 1946)	(modified from Hjulstrom, 1939)
-8	256		10.1"	BOULDERS (≥ -8φ)									
-7	128		5.04"		COBBLES								
-6	64.0		2.52"	PEBBLES		2 1/2"							
-5	53.9				very coarse	2.12"	2"						
-4	45.3				coarse	1 1/2"	1 1/2"						
-3	33.1		1.26"			1 1/4"	1.06"	1.05"					
-2	26.9				medium	3/4"	.742"						
-1	22.6		0.63"			5/8"	.525"						
0	17.0					1/2"	.371"						
1	16.0		0.32"		fine	3/8"							
2	13.4					5/16"							
3	11.3		0.16"		very fine	.265"	3						
4	9.52			4		4							
5	8.00		0.08"	Granules	5	5							
6	6.73				6	6							
7	5.66			very coarse	7	7							
8	4.76		0.08"		8	8							
9	4.00			coarse	10	10							
10	3.36		1		12	12							
11	2.83			medium	14	14							
12	2.38				16	16							
13	2.00			fine	18	18	1.2	.72	.6				
14	1.63				20	20	.86	2.0	1.5				
15	1.41			very fine	25	24	.59	5.6	4.5				
16	1.19				30	28	.42	15	13				
17	1.00			coarse	35	32	.30	43	35				
18	.840				40	35	.215	120	91				
19	.707			medium	45	42	.155	350	240				
20	.545				50	48	.115	1000	580				
21	.500			fine	60	60	.080	2900	1700				
22	.420				70	65							
23	.354			very fine	80	80							
24	.297				100	100							
25	.250			coarse	140	150							
26	.210				170	170							
27	.177			medium	200	200							
28	.149				230	250							
29	.125			fine	270	270							
30	.105				325	325							
31	.088			very fine	400	400							
32	.074												
33	.062			coarse									
34	.053												
35	.044			medium									
36	.037												
37	.031			fine									
38	.02												
39	.016			very fine									
40	.01												
41	.008			coarse									
42	.005												
43	.004			medium									
44	.003												
45	.002			fine									
46	.001												
47	.001			very fine									
48	.001												
49	.001			coarse									
50	.001												
51	.001			medium									
52	.001												
53	.001			fine									
54	.001												
55	.001			very fine									
56	.001												
57	.001			coarse									
58	.001												
59	.001			medium									
60	.001												
61	.001			fine									
62	.001												
63	.001			very fine									
64	.001												
65	.001			coarse									
66	.001												
67	.001			medium									
68	.001												
69	.001			fine									
70	.001												
71	.001			very fine									
72	.001												
73	.001			coarse									
74	.001												
75	.001			medium									
76	.001												
77	.001			fine									
78	.001												
79	.001			very fine									
80	.001												
81	.001			coarse									
82	.001												
83	.001			medium									
84	.001												
85	.001			fine									
86	.001												
87	.001			very fine									
88	.001												
89	.001			coarse									
90	.001												
91	.001			medium									
92	.001												
93	.001			fine									
94	.001												
95	.001			very fine									
96	.001												
97	.001			coarse									
98	.001												
99	.001			medium									
100	.001												
101	.001			fine									
102	.001												
103	.001			very fine									
104	.001												
105	.001			coarse									
106	.001												
107	.001			medium									
108	.001												
109	.001			fine									
110	.001												
111	.001			very fine									
112	.001												
113	.001			coarse									
114	.001												
115	.001			medium									
116	.001												
117	.001			fine									
118	.001												
119	.001			very fine									
120	.001												
121	.001			coarse									
122	.001												
123	.001			medium									
124	.001												
125	.001			fine									
126	.001												
127	.001			very fine									
128	.001												
129	.001			coarse									
130	.001												
131	.001			medium									
132	.001												
133	.001			fine									
134	.001												
135	.001			very fine									
136	.001												