



UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNO-MATEMATIČKI
FAKULTET
DEPARTMAN ZA FIZIKU



Faktori koji utiču na koncentraciju ^{222}Rn u zatvorenim prostorijama

- master rad -

Mentor:

Dr Nataša Todorović

Kandidat:

Kristina Fodor, 346m/11

Novi Sad, 2013

Sadržaj

1	Uvod	4
2	Opšti deo.....	5
2.1	Otkriće radioaktivnosti.....	5
2.2	Radioaktivni raspad.....	7
2.3	Zakon radioaktivnog raspada	7
2.4	Sukcesivne radioaktivne transformacije.....	9
2.5	Radioaktivne ravnoteže	10
2.6	Prirodna radioaktivnost	13
2.7	Jedinice radioaktivnosti.....	17
2.8	Dozimetrija zračenja	17
2.8.1	Delovanje jonizujućeg zračenja	18
2.8.2	Dozimetrijske veličine	19
3	Radon u okolini	21
3.1	Fizičke i hemijske osobine radona	21
3.2	Zdrastveni rizik	23
3.3	Rasprostranjenost radona	24
3.3.1	Radon u zatvorenoj prostoriji.....	24
3.3.1.1	Geologija i pojavljivanje	26
3.3.1.2	Pokretljivost atoma radona u zemljištu	26
3.3.1.2.1	Difuzija	26
3.3.1.2.2	Konvekcija i advekcija	27
3.3.1.3	Emanacija radona	27
3.3.1.3.1	Emanacija radona iz zemljišta	27
3.3.1.3.1.1	Karakteristike zemljišta	28
3.3.1.3.1.2	Klimatski uticaj	29
3.3.1.3.2	Emanacija radona iz građevinskih materijala	30
3.3.1.3.3	Emanacija radona iz vode	31
3.3.1.3.4	Emanacija radona iz gasova koji se koristi u domaćinstvu	31
3.3.1.4	Visinska raspodela koncentracije radona	31

3.3.2	Radon u atmosferi	32
4	Eksperimentalni deo	33
4.1	Realizacija eksperimenta	33
4.1.1	Opis eksperimentalne aparature	33
4.1.1.1	Merenje koncentracije aktivnosti radona u vazduhu- kanistar sa aktivnim ugljem	
33		
4.1.1.2	Merenje koncentracije aktivnosti radona u vodi -alfa spektrometrijska metoda - RAD7 detektor	35
4.1.1.3	HPGe detektor	37
4.1.2	Rezultati merenja	39
4.1.2.1	Radon u vazduhu	39
4.1.2.2	Radon u vodi	47
4.1.3	Analiza rezultata	48
5	Teorijski model	49
5.1	Ekshalacija iz građevinskih materijala	51
5.2	Difuzija iz zemljišta	52
5.2.1	Granični uslovi	53
5.3	Određivanje doprinosa pojedinih izvora	55
6	Zaključak	58
7	Literatura	59

1 Uvod

Prva indikacija razmatranja kako prirodna radijacija utiče na zdravlje ljudi, zabeležena je 1556. godine u istočnoj Evropi, kada je registrovan veliki broj fatalnih respiratornih bolesti rudara u Erz Mountains-u. U XIX veku je zaključeno da je u pitanju kancer pluća.

To je uzeto kao povod da se jonizujuće zračenje ozbiljnije shvati i da se krene u merenje i izučavanje njegovog prisustva u životnoj sredini i uticaja na ljude. Postepeno, tokom prve polovine dvadesetog veka razvija se jasnija slika o posledicama izlaganja ionizujućem zračenju. Istraživanja vršena poslednjih decenija pokazuju da u normalnim uslovima preko 70% ukupne godišnje doze koju primi stanovništvo potiče od prirodnih izvora ionizujućeg zračenja, pri čemu je 40% uslovljeno inhalacijom i ingestijom prirodnog radioaktivnog gasa, radona ^{222}Rn , odnosno njegovih potomaka. Izuzetno je važno merenje koncentracije aktivnosti radona u zatvorenim prostorijama pre svega jer u današnjim uslovima mnoge ljudske aktivnosti: smanjenje prirodne ventilacije u cilju uštede toplotne energije, korišćenje prefabrikovanih otpadnih materijala u građevinske svrhe i opšta tendencija da čovek sve veći deo svog vremena provodi u zatvorenim prostorijama, dovode do povećane potencijalne izloženosti čoveka radonu i njegovim kratkoživećim potomcima. Istraživanja potvrđuju da je radon odgovoran za preko 20.000 smrtonosnih slučaja obolelih od kancera pluća godišnje u EU, tj. za oko 9% svih smrtnih slučajeva uslovljenih kancerom pluća. [1,33,37,38]

Glavni izvor prisustva radona u zatvorenoj prostoriji je zemljište ispod posmatrane prostorije, međutim neki građevinski materijali takođe mogu značajno uticati na povećanje koncentracije aktivnosti radona u zatvorenim prostorijama. Pokazano je da pored zemljišta i građevinskog materijala postoje i drugi faktori koji imaju veći ili manji uticaj na koncentraciju aktivnosti radona u zatvorenoj prostoriji, ali zbog jednostavnosti modela koji se želi prikazati u ovom radu neće baš svi faktori biti uzeti u obzir. [33]

Cilj rada je određivanje doprinosa pojedinih izvora radona ukupnoj koncentraciji aktivnosti radona u zatvorenoj prostoriji. Iako je poznato da bi glavni izvor kod prizemnih objekata trebao da bude zemljište a sekundarni izvor građevinski materijali ne može se precizno reći koji je udeo doprinosa pojedinačnih faktora na ukupno prisustvo radona. Pored eksperimentalno dobijenih podataka za koncentraciju aktivnosti radona u vazduhu u posmatranim zatvorenim prostorijama, u ovom radu biće predstavljen i pojednostavljen model koji nam definiše uticaj pojedinačnih faktora na ukupnu koncentraciju.

2 Opšti deo

2.1 Otkriće radioaktivnosti

Radioaktivnost je otkrivena na osnovu svoga dejstva na fotografsku ploču od strane Anrija Bekerela 1896. godine. Ta godina se smatra godinom rođenja nuklearne hemije i nuklearne fizike i uopšte čitave nuklearne ere.

Treba skrenuti pažnju na još neke bitne činjenice koje su prethodile ovom otkriću [3]:

- luminescencija je bila poznata i uglavnom razjašnjena pojava u drugoj polovini 19. veka
- poznata je bila i fotografска tehnika, koja je takođe počela u Francuskoj kao dagerotipija u prvoj polovini prošlog veka, da bi se zahvaljujući N. Nijepsu i njegovom rođaku Abelu razvila do prave fotografije
- 1895. godine su otkriveni X-zraci, kao veoma prodorno zračenje. Njihov pronalazač Rendgen je ubrzo nakon otkrića pomoću tih zraka napravio snimak šake svoje žene na kome se jasno vide sve kosti. To zračenje se dobija prilikom električnog pražnjenja u gasu pod niskim pritiskom u Kruksovoj cevi.

Polazeći od pretpostavke da X-zraci nastaju kao posledica vidljive i lako uočljive fluorescencije staklenih zidova Kruksove cevi (što je bila pogrešna pretpostavka), Anri Poenkare, francuski matematičar je smatrao da bi se i od drugih supstancija koje fluoresciraju moglo očekivati da emituju vidljivu svetlost kao i nevidljivo prodorno X-zračenje. To bi značilo da se to zračenje može dobiti i kada se fluorescirajući materijali osvetle običnom svetlošću, npr. sunčevom.

U ovu potragu za X-zracima na navedeni način uključio se i Anri Bekerel, što je čudno, jer je već bilo poznato da se zračenjem manje energije ne može izazvati reemisija većih energija (Stoksov zakon), ali se kao olakšavajuća okolnost može uzeti to što priroda X-zračenja nije bila razjašnjena.

Zapaženo je da postoji efekat luminescencije koji ostavlja trag na fotografskoj ploči samo ako se između te ploče i izvora luminescencije nalazi staklo od uranijum-oksida. Ako se efekat javlja i u slučajevima kada takvog stakla nema, onda jedinjenja koja luminesciraju moraju imati nečistoće u obliku uranijumovih soli, smatrao je Bekerel, na osnovu svog iskustva sa ovim pojavama. Logičan zaključak je da će čisti uranijum proizvesti znatno jači efekat. Anri Bekerel je tako i postupio i našao veoma jaku „fluorescenciju“, čiji trag je ostao na fotoploči. Ploča je prethodno bila dobro umotana u dvostruki tamni papir, preko toga je stavljen kalijum-uranil-sulfat $[K_2UO_2(SO_4)_2 \cdot 2H_2O]$ i sve to stavljeno u prozor da bi bilo izloženo sunčevoj svetlosti krajem februara 1896. Bekerel je stavljaо i novčić između soli urana i ploče, i dobijao je senku tog novčića. Iznenadenje je nastalo kada je identično pripremljena ploča stavljena u fijoku pa

razvijena posle nekoliko dana bez da je bila osvetljena, pokazala isti efekat. Zacrnjenja na foto-ploči su bila baš na onim mestima na kojima se nalazila so uranijuma i morala su, dakle poticati od njega, a ne od luminescencije. On je sve ponovio i u mraku i dobio istu sliku.

To su bili „uranijumovi zraci“. Otkrivena pojava zračenja je prvo dobila ime *Bekerelovi zraci*, kasnije su ih nazvali *radioaktivnim zracima* a pojavu *radioaktivnost* (uveđena od strane Marije Kiri). Ovo se desilo na dan 29. februara 1896. godine. Tako se desilo, da je jedna zabluda, koja je uzgred bila praćena slučajnošću pri izvođenju eksperimenata, dovela do jednog od najvećih otkrića u istoriji nauke. Ajnštajn je smatrao da je otkriće radioaktivnosti po svojoj revolucionarnosti ravno otkriću vatre koje je učinio preistorijski čovek [3]. Bekerel je kasnije pokazao da sva jedinjenja uranijuma, kao i čisti metal, emituju nađeno zračenje, te da se ono apsorbuje, tj. slabi pri prolasku kroz materijale, npr. listove aluminijuma ili bakra, itd.

U ovo vreme nije bio shvaćen značaj Bekerelovog otkrića. Ono nije bilo ni spektakularno, kao npr. Rendgenovo otkriće X-zraka, niti je priroda zračenja bila jasna. Interes je porastao kada je 1898. godine otkriveno da i torijum ima slična svojstva, a što su pokazali Gerard Šmit i Marija Kiri koji mesec kasnije, nezavisno jedno od drugoga. Mariju je navedeno Bekerelovo otkriće podstaklo da pokuša da razjasni poreklo i prirodu te stalne i spontane emisije energije, posebno što je i sama otkrila isti efekat kod izotopa torijuma, pa je taj problem dobila kao temu svoje doktorske disertacije od svoga profesora Pijera Kirija 1898. Ona je istraživala neka jedinjenja uranijuma i torijuma a tokom ovih istraživanja je otkrila i radioaktivnost kalijuma, mada nije bila svesna toga. Za ova otkrića su Marija i Pijer zajedno sa Anrijem Bekerelom dobili Nobelovu nagradu iz hemije 1903, dok je Marija dobila i drugu Nobelovu nagradu 1911. za istraživanja radijuma.

Razvoj je išao dalje pa je do 1912. bilo izolovano oko 30 radioaktivnih elemenata. Otkrivanje radioaktivnih elemenata u prirodnim materijalima [3]:

- U februar-mart 1896. Bekerel
- Th februar 1898. Šmit, M. Kiri
- Po juli 1898. M. i P. Kiri
- Ra december 1898. M. i P. Kiri
- Rn avgust 1899. Dorn
- Ac oktobar 1899. Debrien

Ernest Raderford i Frederik Sodi su dali osnovnu teoriju radioaktivnog atoma u periodu od 1902-1904 god. Oni su objasnili prirodnu radioaktivnost kao spontanu promenu jednog elementa u drugi element.

Od 1896. do 1903. ističu se sledeća otkrića[3]:

-
1. Značajna nestabilnost teških elemenata koja dovodi do radioaktivnog raspada, tj. transformacije jednog elementa u drugi element
 2. Postojanje jonizujućeg zračenja, alfa, beta (otkriveni od strane E. Raderforda) i gama zraci (otkriveni od strane P. Vilarda) sa osobinama da uzrokuju fluorescentno zračenje u određenim mineralima
 3. Energije raspada su veće od energije hemijske veze za faktor 10^6
 4. Identifikacija prirodnih radioaktivnih elemenata uranijuma, torijuma, aktinijuma i još nekih elemenata koji su iz istog minerala kao što je radijum i polonijum
 5. Otkriće radioaktivnih, ali hemijski inertnih gasova kao što su radon, toron i aktinon
 6. Detekcija helijuma povezanog sa radioaktivnim mineralom

2.2 Radioaktivni raspad

Radioaktivnost je pojava, da neki element, zahvaljujući svojoj unutrašnjoj nestabilnosti, spontano iz sebe emituje prodorno zračenje u okolinu. Pri tome se taj radioaktivni element transformiše u drugi element. Putem ovog spontanog procesa nestabilna jezgra prelaze u stabilno ili stabilnije stanje uz emisiju čestice ili elektromagnetskog zračenja. Prikazuje se kao:



Predak → potomak + emitovana čestica ili kvark + energija zračenja

Raspad je process pri kojem se oslobađa energija, što znači da je egzotermni. Ukupna energija raspada se dobija na račun razlike u masi između polaznog jezgra i zbiru masa dobijenog jezgra i emitovane čestice. Može se izračunati pomoću Ajnštajnove jednačine [3]:

$$\text{Energija raspada} = \Delta mc^2 \quad (2.2)$$

$$\Delta m = m_{\text{predak}} - (m_{\text{potomak}} + m_{\text{čestica}}) \quad (2.3)$$

gde je Δm - defekt mase, c-brzina svetlosti. Nestabilnost težih jezgra, tj. jezgra sa većim nanelektrisanjem, izazvana je nepravilnim rastom elektrostatičkog odbijanja među protonima.

2.3 Zakon radioaktivnog raspada

Radioaktivni raspad ne zavisi od predistorije atoma već od dužine interavala Δt u kojem se posmatranje vrši. Broj atoma neke supstance, iako je konačan, razmatra se kao kontinualna promenljiva i na ovakav sistem se može primeniti infinitezimalni račun [2]. Prema tome, promena broja atoma dN u vremenu dt data je kao:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N \quad (2.4)$$

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (2.5)$$

N je broj atoma koji nije pretrpeo radioaktivni raspad u vremenu t , N_0 je broj atoma u nekom početnom trenutku vremena posmatranja $t=0$, a λ je konstanta radioaktivnog raspada, karakteristična za svaki element. $\frac{dN}{dt}$ predstavlja brzinu radioaktivnog raspada ili aktivnost. Negativni predznak na desnoj strani jednačine (2.45) označava da se raspadom smanjuje broj posmatranih radioaktivnih jezgara. Aktivnost se obično izražava kao [2]:

$$A = \lambda N = A_0 e^{-\lambda t} \quad (2.6)$$

Za sve radioaktivne supstance karakteristične su tri veličine: konstanta raspada λ , period polu raspada $t_{1/2}$ i srednji život atoma, odnosno jezgra τ .

Konstanta radioaktivnog raspada λ predstavlja verovatnoću da se neki atom u jedinici vremena raspadne. Ona se određuje iz zakona radioaktivnog raspada gde se relacija $\ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t$ prevodi u dekadni logaritam [2]:

$$\log N = \log N_0 - 0.43439\lambda t \quad (2.7)$$

Ova relacija predstavlja pravu liniju i iz nagiba prave se jednostavno određuje konstanta radioaktivnog raspada.

Period poluraspada $t_{1/2}$ predstavlja vreme u kojem se broj radioaktivnih atoma smanji na polovicu svoje početne vrednosti N_0 , tj. $N = \frac{N_0}{2}$. Primenom ovog uslova na zakon radioaktivnog raspada, dobija se [2]:

$$\ln \frac{N_0/2}{N_0} = \ln 2 = -\lambda t_{1/2} \quad (2.8)$$

$$t_{1/2} = \frac{0.693}{\lambda} \quad (2.9)$$

Srednji život jezgra definiše se kao suma vremenskih egzistencija svih atoma podeljena sa brojem atoma u početnom trenutku posmatranja N_0 . Matematički se srednji život formuliše kao [2]:

$$\lambda = \frac{\int_0^\infty t dN}{N_0} = \frac{1}{\tau} \quad (2.10)$$

Takva granica integrala uzeta je zato, jer pojedini atomi mogu da žive u intervalu od $t=0$ do $t=\infty$.

Ovom jednačinom je data veza između srednjeg života i konstante raspada.

2.4 Sukcesivne radioaktivne transformacije

U prirodi postoje radioaktivne supstance koje nastaju, jedna iz druge, radioaktivnim raspadom, pri čemu se na kraju ovaj radioaktivni lanac završava nekim stabilnim članom. Postavlja se pitanje kako da se odredi broj atoma N, period poluraspada $t_{1/2}$ ili konstanta raspada λ . Razmotriće se sledeći slučaj [2]:



tj. rečima: N_1 se raspada u N_2 , a ova vrsta atoma se raspada u N_3 koji je stabilan član niza. U ovom nizu N_1 se naziva predak, a N_2 potomak, pri čemu su λ_1 i λ_2 konstante radioaktivnog raspada. Ovakav radioaktivni proces se može opisati sa tri diferencijalne jednačine u sledećem obliku:

$$\frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 N_1 \quad (2.12)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 \quad (2.13)$$

$$\frac{dN_3}{dt} = \lambda_2 N_2 \quad (2.14)$$

Prvom jednačinom je data aktivnost pretka N_1 , drugom je data promena broja atoma potomka N_2 , a treća jednačina predstavlja promenu broja atoma potomka N_3 , koji je stabilan, tj. $\lambda_3 = 0$ [2]. Ako se $N = N_0 e^{-\lambda t}$ uvrsti u drugu jednačinu, dobija se:

$$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 = \lambda_1 N_0 e^{-\lambda_1 t} - \lambda_2 N_2 \quad (2.15)$$

Množenjem jednačine sa $e^{\lambda_2 t}$ i sređivanjem izraza dobija se:

$$\frac{d}{dt}(N_2 e^{\lambda_2 t}) = \lambda_1 N_0 e^{(\lambda_2 - \lambda_1)t} \quad (2.16)$$

Integracijom poslednjeg izraza dobija se:

$$N_2 e^{\lambda_2 t} = \lambda_1 N_0 \int e^{(\lambda_2 - \lambda_1)t} dt = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_0 e^{(\lambda_2 - \lambda_1)t} + C \quad (2.17)$$

gde je C konstanta interakcije koja se određuje uzimajući sledeće početne uslove u obzir: u trenutku $t=0$ bilo je N_{02} atoma potomka, pa je tada vrednost integracione konstante:

$$C = N_{02} - \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{01} \quad (2.18)$$

Ako se ova vrednost uvrsti u gornju relaciju i pomnožimo datu relaciju sa $e^{-\lambda_2 t}$, dobija se:

$$N_2(t) = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{01} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) + N_{02} e^{-\lambda_2 t} \quad (2.19)$$

Ova jednačina daje zavisnost broja atoma potomka nastalih radioaktivnim raspadom njegovog pretka N_1 od vremena.

U ovom slučaju je razmatran radioaktivni niz od tri člana, međutim ona se može primeniti i na radioaktivni niz od n članova. Takav se proces opisuje sa n diferencijalnih jednačina:

$$\frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 N_1 \quad (2.20)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 \quad (2.21)$$

$$\frac{dN_3}{dt} = \lambda_2 N_2 - \lambda_3 N_3 \quad (2.22)$$

$$\frac{dN_n}{dt} = \lambda_{n-1} N_{n-1} - \lambda_n N_n \quad (2.23)$$

Ovaj sistem jednačina opisuje raspad radioaktivne familije od n članova u kojoj n -ti član nije radioaktivan, tj. $\lambda_n = 0$. Sistem se rešava za sledeće početne uslove: $t=0$, $N_1 = N_{01}$ i $N_{02} = N_{03} = \dots = N_{0n} = 0$.

2.5 Radioaktivne ravnoteže

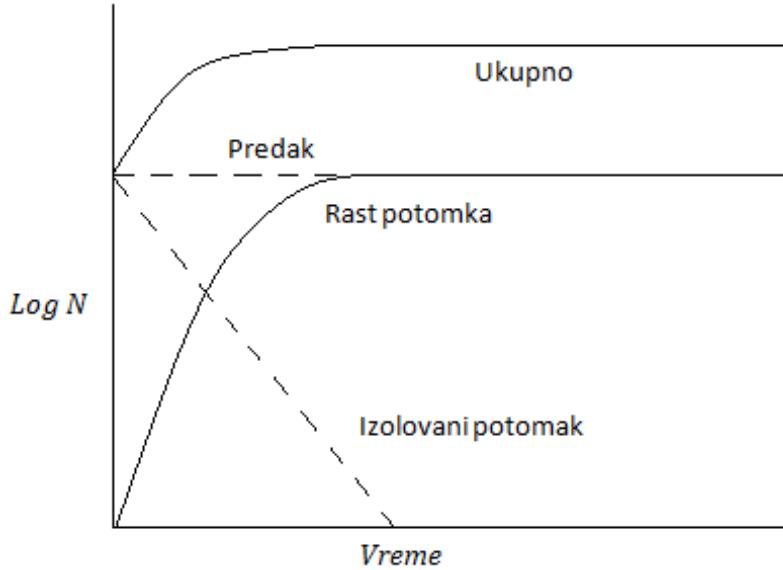
Pojam radioaktivne ravnoteže vezan je za uslov: $\frac{dN}{dt} = 0$. To je ustvari taj trenutak vremena kada se raspadne onoliko atoma koliko se stvori [2]. Strogo matematički, ovi uslovi u potpunosti nikad nisu ispunjeni, međutim stanja bliska radioaktivnim ravnotežama su moguća. Recimo, to je slučaj kada period poluraspada pretka $t_{1/2}$ teži beskonačnosti, ili je znatno veći u odnosu na period poluraspada potomka. Za ovaj tip ravnoteže može se napisati sledeći uslov

$$\lambda_1 \ll \lambda_2 \quad (2.24)$$

tada je

$$\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2 = \dots = \lambda_n N_n \quad (2.25)$$

Ovaj tip radioaktivne ravnoteže se naziva sekularna ravnoteža (slika 1).



Slika 1. Prikaz sekularne ravnoteže [1]

Npr. ^{226}Ra ima period poluraspada od 1,620 god. dok je period poluraspada njenog potomka, ^{222}Rn , 3,82 dana. U ovom primeru je $t_{1/2}^1 \gg t_{1/2}^2$ i iz ovoga sledi, da je po $t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$, $\lambda_1 \ll \lambda_2$. Posle nekog vremena t koji je mnogo duži od perioda poluraspada potomka $t_{1/2}^2$, $e^{-\lambda_2 t}$ teži nuli i dobija se da je $\lambda_2 - \lambda_1 \cong \lambda_2$. Uvrštavanjem ovo u jednačinu (2.19) dolazi se do sledećeg izraza [1]:

$$\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2 \quad (2.26)$$

Drugi tip radioaktivne ravnoteže sledi iz uslova [2]:

$$\lambda_1 < \lambda_2 \quad (2.27)$$

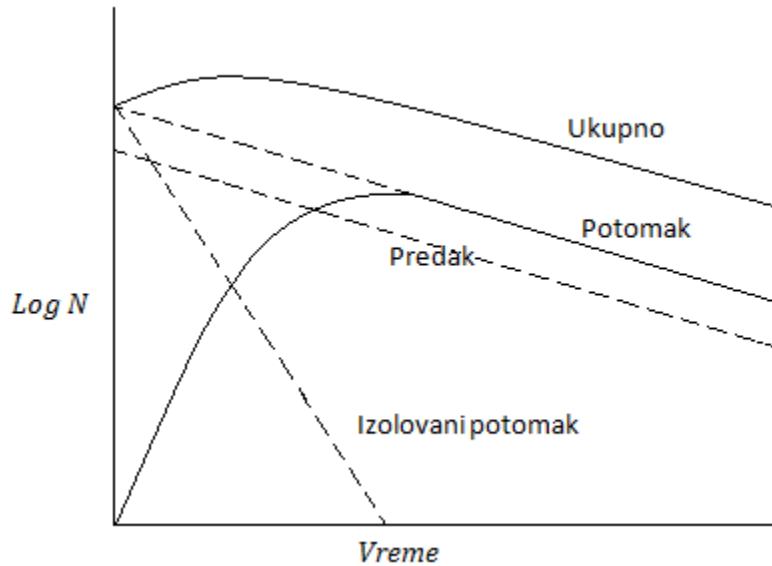
tj. kada konstanta raspada λ_2 nije mnogo veća od konstante λ_1 , ali se znatno razlikuju. To je slučaj, kada je period poluraspada pretka veći od perioda poluraspada potomka, odnosno kada je $t_{1/2}^1 > t_{1/2}^2$. Opet se može zanemariti član $e^{-\lambda_2 t}$ u jednačini (2.19) i ona se sada svodi na:

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{01} e^{-\lambda_1 t} \quad (2.28)$$

tj. dobija se da je

$$\lambda_1 N_1 = (\lambda_2 - \lambda_1) N_2 \quad (2.29)$$

Ovaj tip ravnoteže se naziva tranzitivna ravnoteža (slika 2.).



Slika 2. Prikaz tranzitivne ravnoteže [1]

Ovakav tip ravnoteže se javlja kod ^{222}Rn i njenih potomaka.

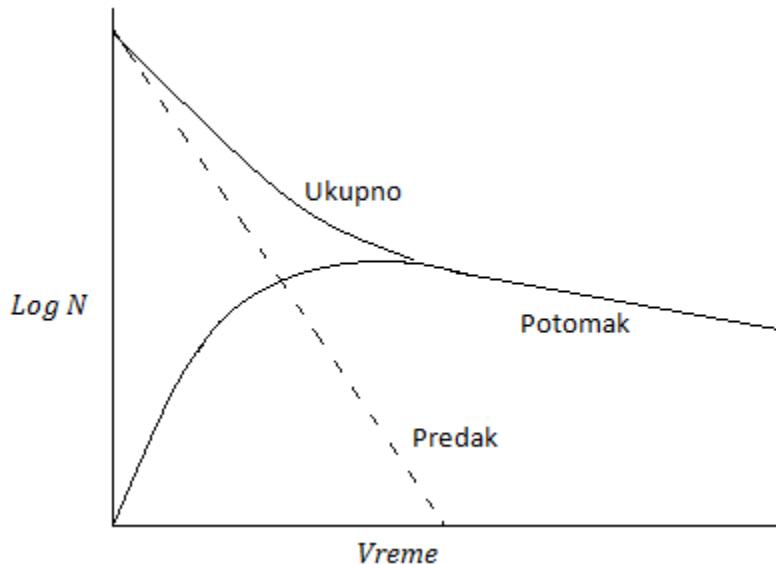
Treći slučaj je radioaktivni raspad bez ravnoteže i on nastaje kada je period poluraspada predaka kraći od perioda poluraspada potomka (slika 3). Počevši od čistog predaka, aktivnost potomka raste, dostiže maksimum i opada po jednačini (2.19):

$$N_2(t) = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{01} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) \quad (2.30)$$

Uzimajući da je $N_{02} = 0$. Vreme maksimalne aktivnosti t_m se može dobiti iz uslova $\frac{dN_2}{dt} = 0$ (prvi izvod jednačine 2.19 po vremenu se izjednači sa nulom) i dobija se [1]:

$$\lambda_1 e^{-\lambda_1 t_m} = \lambda_2 e^{-\lambda_2 t_m} \quad (2.31)$$

$$t_m = \frac{\ln \lambda_2 - \ln \lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1}. \quad (2.32)$$



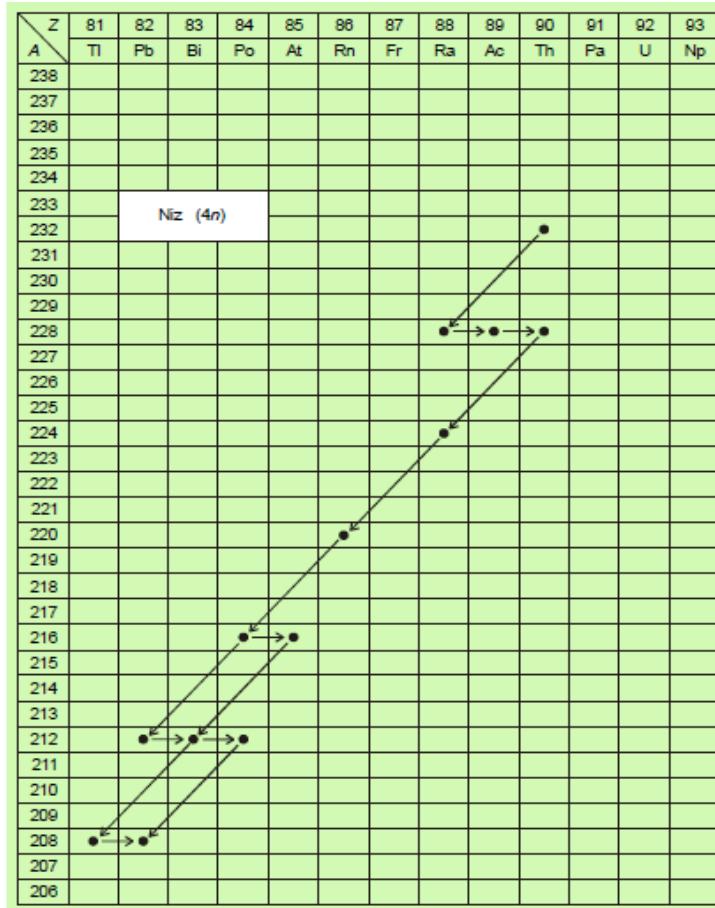
Slika 3. Prikaz raspada bez radioaktivne ravnoteže [1]

Na primer, ne dolazi do ravnoteže između ^{218}Po (3,05 min), prvi potomak ^{222}Rn , i ^{214}Pb (26,8 min) koji je drugi potomak istog elementa.

2.6 Prirodna radioaktivnost

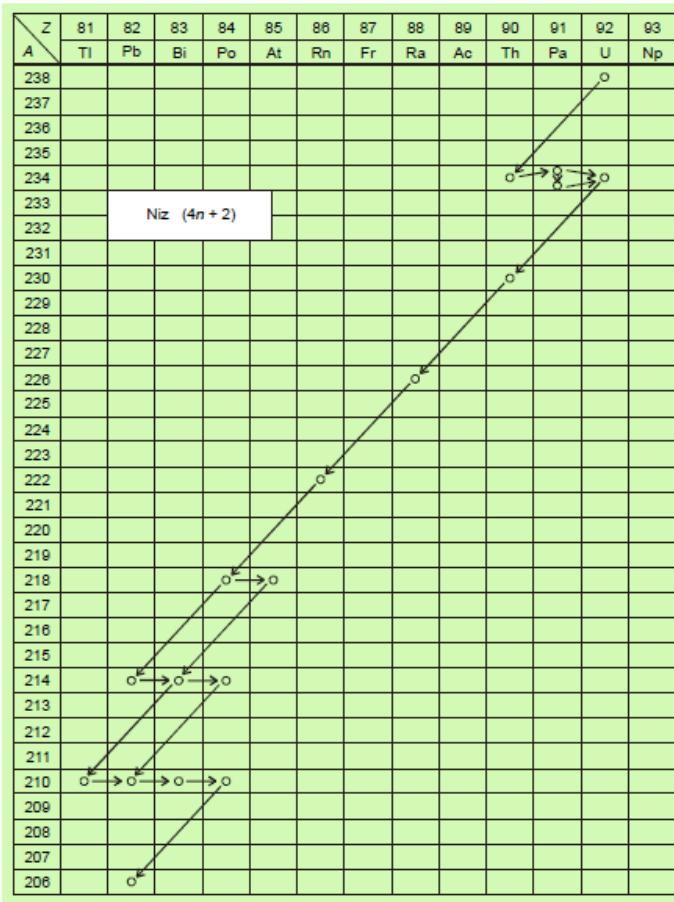
Na osnovu eksperimenata fizičara i radiohemičara ustanovljeno je da većina prirodnih radioaktivnih izotopa pripadaju lancima uzastopnih raspada i sva jezgra u okviru jednog takvog lanca raspada čine tzv. radioaktivne nizove (serije, familije). Rodonačelnik (roditeljski izotop niza) je izotop koji stoji na vrhu niza i čijim raspadom nastaju, jedan iz drugoga, svi članovi niza (potomci). Nizovi su dobili naziv po svom rodonačelniku. Ti nizovi su: uranijumov niz (^{238}U), torijumov niz (^{232}Th) i aktinijumov niz (^{235}U). Između sebe se razlikuju po izgradnji masenog broja. [2,3] Rodonačelnici izotopi ova tri niza su veoma dugoživeći radionuklidi sa vremenima poluraspada koja su reda veličine starosti Zemlje. Prema današnjim gledištima, starost Zemlje je 4,6 milijardi godina. Elementi, koji su nastali sa nastankom Zemlje, ne bi ni postojali u prirodi da se ne raspadaju krajnje sporo, pa prvobitno stvorena količina još nije iscrpljena. Svi drugi članovi nizova imaju znatno kraće periode poluraspada, i da ne dolazi do obnavljanja iz rodonačelnika sa kojim su inače u sekularnoj ravnoteži ($\lambda_1 \ll \lambda_2$), ne bi ni postojali na Zemlji.

Torijumov niz ($4n$) počinje sa ^{232}Th , a završava se stabilnim izotopom olova ^{208}Pb (slika 4).



Slika 4. Šematski prikaz torijumovog niza [3]

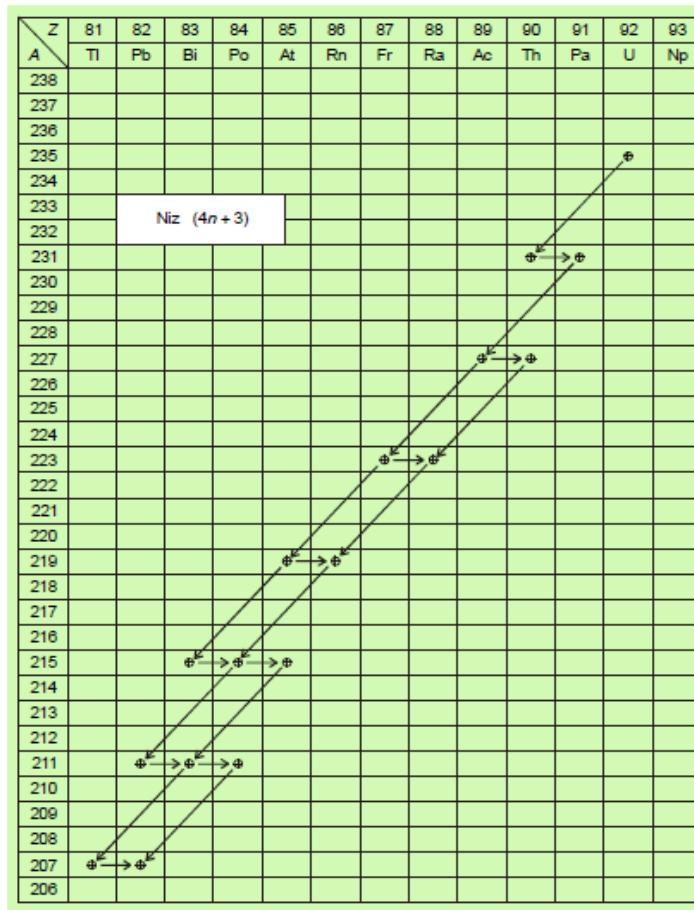
Uranijumov niz počinje sa ^{238}U kao rodonačelnikom i nakon 14 transformacija (8 alfa raspada i 6 beta raspada) dolazi se do stabilnog krajnjeg proizvoda, a to je ^{206}Pb . Relativna atomska masa rodonačelnika ovog niza, pa time i svih njegovih članova, mogu se izračunati po formuli $4n + 2$, gde je n -ceo broj. Zato se ovaj niz zove i $(4n + 2)$ niz, u kojem n varira između 59 i 51. Slika 5 prikazuje raspade u okviru ovog niza. [3]



Slika 5. Šema raspada uranijumovog niza [3]

Niz $(4n + 3)$ ili aktinijumov niz je ustvari niz uranijuma-235 (^{235}U). Poslednji član niza je opet olovo, ali sad izotop ^{207}Pb . Ilustrovani prikaz elemenata ovog raspada je dat na slici 6.

Radioaktivna serija $4n + 1$ je takođe reproducovana nakon otkrića veštačke radioaktivnosti. Njen rodonačelnik je ^{237}Np čiji je period poluraspada $t_{1/2} = 2,14 \cdot 10^6$ godina, što je za oko 2000 puta kraća od vremena koje je proteklo od nastanka Zemlje. To je i razlog zašto data serija više ne postoji u prirodi, tj. pretpostavlja se da se prvobitna količina raspala.



Slika 6. Šematski prikaz niza uranijuma-235 [3]

Sve tri postojeće serije su slične u tome da im je rodonačelnik dugoživeći izotop teškog elementa, a krajnji proizvod neki od stabilnih izotopa olova. Karakteristike krajnjih, stabilnih nukleida svih nizova je što svi sadrže magične brojove protona (82) i magične brojove neutrona (126) ili oba. Nizovi su potpuno nezavisni i nigde se ne ukrštaju. U svakom od nizova postoji po jedan izotop elementa rednog broja 86, poznatog kao radon. Tabela 1 prikazuje osnovne podatke o rodonačelnicima ovih nizova.

Ako se serije na bilo koji način prekinu i neki elementi izdvoje, ravnoteža je narušena i ti radionukleidi se nadalje raspadaju nezavisno. [3]

Tabela 1. Rodonačlnici prirodnih radiaktivnih nizova[3]

Izotop	^{238}U	^{235}U	^{232}Th	^{237}Np
$t_{1/2}$ (god.)	$4,468 \cdot 10^9$	$0,704 \cdot 10^9$	$1,405 \cdot 10^{10}$	$2,14 \cdot 10^6$
Krajnji proizvod	^{206}Pb	^{207}Pb	^{208}Pb	^{209}Bi
Tip niza	$4n + 2$	$4n + 3$	$4n$	$4n + 1$

2.7 Jedinice radioaktivnosti

Količine radioaktivnih supstancija se upoređuju i mere po brzini raspada, tj. broja dezintegracija u jedinici vremena. Jedinica aktivnosti u SI sistemu je *bekerel* (Bq). Predložena je 1975. godine i određena kao

$$1 \text{ } Bq = 1 \text{ } \textit{raspad} \text{ } s^{-1}.$$

To je vrlo mala jedinica i u praksi je pola veka bila u upotrebi jedna veća jedinica-*kiri* (Ci), koja je definisana kao

$$1 \text{ } Ci = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ } \textit{raspad} \text{ } s^{-1} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ } Bq.$$

Jedinica *kiri* je predložena 1930. godine. Zašto baš $3,7 \cdot 10^{10}$? Ta jedinica je bila definisana kao ona količina radioaktivne supstancije u kojoj se u 1 sekundi desi isto toliko raspada koliko u 1 g čistog radijuma izotopa ^{226}Ra ($t_{1/2} = 1600 \text{ god}$). Međutim 1950. godine IUPAC i IUPAP su usvojile sledeću definiciju: *1 Ci je ona količina bilo kojeg radio – nukleida u kojoj se desi $3,7 \cdot 10^{10}$ raspada u sekundi.* [3] U svremenim istraživanjima se međutim koristi isključivo bekerel kao jedinica za aktivnost.

2.8 Dozimetrija zračenja

Zračenje se može podeliti u dve glavne grupe na osnovu toga da li izaziva jonizaciju materije, i to na:

- Ne-jonizujuće zračenje
- Jonizujuće zračenje, koja se dalje deli na direktno jonizujuće zračenje i indirektno jonizujuće zračenje

Direktno jonizujuće zračenje taloži energiju u medijumu posredstvom interakcije nanelektrisane čestice sa orbitalnim elektronima u atomu medijuma. Ovo zračenje je izazvano nanelektrisanim česticama, kao što su β čestice (elektroni), protoni, α čestice (jezgro helijuma) i teški joni.

Za indirektno jonizujuće zračenje odgovorne su neutralne čestice, kao što su foton i neutroni.[8]

2.8.1 Delovanje ionizujućeg zračenja

Prolaskom ionizujućeg zračenja kroz materiju menjaju se svojstva zračenja i materije. Način međudelovanja je različit za EM zračenje i korpuskularno zračenje. [7]

Kod EM zračenja međudelovanje se odvija fotoelektričnim efektom, Komptonovim efektom ili stvaranjem parova elektron-pozitron.

- Fotoelektrični efekat nastaje kada je energija fotona veća od energije vezivanja elektrona u atomu. Tada foton predaje svu energiju elektronu čime mu omogućava da napusti atom. Energija fotona se raspodeljuje na izlazni rad W i kinetičku energiju izbačenog elektrona:

$$E_{fot} = W + E_k \quad (2.33)$$

Kod fotoelektričnog efekta nastaju pozitivni joni i elektroni.

- Kod Komptonovog efekta pri interakciji sa supstancom primarni foton (X-zrak ili γ -zrak) predaje deo energije slobodnom elektronu nakon čega se rasejava tj. skreće sa putanje i ima manju energiju i frekvenciju, a veću talasnu dužinu.

$$E_{fot} = E_e + E'_{fot} \quad (2.34)$$

- Kod stvaranja parova elektron-pozitron celokupna energija fotona se utroši na kreaciju ovih čestica i njihovu kinetičku energiju. Ona nastaje ako je energija fotona dovoljno velika, tj. mora da je iznad dvostrukog mirovanja elektrona ($2m_e c^2 = 1.02 \text{ MeV}$). Višak energije fotona, tj. sve što je iznad 1.02 MeV raspoređuje se na kinetičke energije elektrona i pozitrona [7]:

$$E_{fot} = 2m_e c^2 + E_{ke} + E_{kp} \quad (2.35)$$

Način međudelovanja korpuskularnog zračenja i materije zavisi od nanelektrisanja čestica. Nanelektrisane čestice se mogu podeliti na teške i luke nanelektrisane čestice.

- Kada snop teških čestica prolazi kroz neki medijum, oni interaguju sa elektronima ili jonima u materijama, pobuđuju ili ionizuju atome i pri tome postepeno gube energiju i menjaju smer kretanja. Dužina puta koju može da pređe nanelektrisana čestica u određenoj sredini definiše domet. To je najmanja debljina nekog materijala koja je potrebna da zaustavi nanelektrisanu česticu.
- U slučaju kada luke nanelektrisane čestice prolaze kroz medijum, ponašaju se mnogo složenije nego teške čestice. Na svom putu, elektroni pretrpe višestruke sudare, usled čega im je trag izlomljena linija i zbog toga je teško odrediti domet. [2,7]

2.8.2 Dozimetrijske veličine

Prolaskom jonizujućeg zraka kroz materiju zrak gubi energiju predajući je atomima i molekulima. Veličine kojima se opisuje zračenje dele se na veličine koje karakterišu upadni snop i veličine koje opisuju interakciju zračenja i materije, odnosno tkiva.

Veličine koje karakterišu upadni snop su energija, fluks i gustina fluksa nanelektrisanih čestica ili talasnog snopa.

Veličine koje opisuju međudelovanje zračenja i materije su:

- apsorbovana doza
- ekvivalentna doza
- efektivna doza

Definišu se i brzine promena tih veličina.

- *Apsorbovana doza* „D“ je odnos energije koju je zračenje predalo materiji i mase te energije:

$$D = \frac{dE}{dm} [Gy] \quad (2.36)$$

$$\dot{D} = \frac{dD}{dt} [Gy/s] \quad (2.37)$$

Jedinica apsorbovane doze je Grej, $1Gy = 1 J/kg$, a jedinica brzine doze je $1 Gy/s$, $1 Gy/h$, $1 Gy/god$.

Apsorbovana doza ne iskazuje u dovoljnoj meri efekte štetnog zračenja na biološke sisteme pa je uvedena tzv. ekvivalentna doza u tkivu, H_T .

- *Ekvivalentna doza* je proizvod apsorbovane doze i težinskog koeficijenta zračenja W_R :

$$H_T = W_R D [Sv] \quad (2.38)$$

$$\dot{H}_T = \frac{dH_T}{dt} [Sv/s] \quad (2.39)$$

Jedinica ekvivalentne doze je sivert, $1Sv = 1 J/kg$, a jedinica brzine ekvivalentne doze je $1Sv/s$, $1Sv/h$, $1Sv/god$.

Težinski koeficijent zračenja W_R opisuje biološki učinak nekog zračenja u poređenju sa referentnim zračenjem. Kao referentno zračenje uzima se zračenje nastalo u rendgenskoj cevi kod anodnog napona od $200 keV$.

-
- Isto zračenje na različita tkiva može izazvati različita biološka dejstva u zavisnosti od osjetljivosti pojedinih tkiva i organa. Iz tih razloga se koristi *efektivna doza* koja je jednaka:

$$E = \sum_T H_T W_T \quad (2.40)$$

H_T je ekvivalentna doza zračenja tkiva T, a W_T je težinski koeficijent tkiva vrste T, koji daje meru osjetljivosti pojedinih tkiva na zračenje. [7]

3 Radon u okolini

Proučavajući osobine radijuma ^{226}Ra 1900. god, Fridrik Dorn je otkrio da on emanira gas, koji je isprva nazvao “*niton*¹”. Ovaj gas je 1923 godine dobio naziv “radon”. Radon je inertan gas, koji kad se formira u Zemljinoj kori u nekoj od radioaktivnih nizova, slobodno difunduje iz zemljišta u atmosferu. Radon i njegovi izotopi pojavljuju se u sledećim radioaktivnim nizovima:

- Radon nastaje u uranijumskom nizu ^{238}U i ima poluživot 3,825 dana
- Toron ^{220}Rn potiče iz niza torijum ^{232}Th i ima poluživot 55,6 s
- Aktinijum ^{219}Rn nastaje u nizu ^{235}U i ima poluživot 4,02 s

Osim ovih izotopa radona, postoji još 23 izotopa radona od kojih najduže “živi” izotop ^{211}Rn i većina se raspada alfa raspadom, međutim mogući su i beta raspadi ili zahvat orbitalnog elektrona. [1]

3.1 Fizičke i hemijske osobine radona

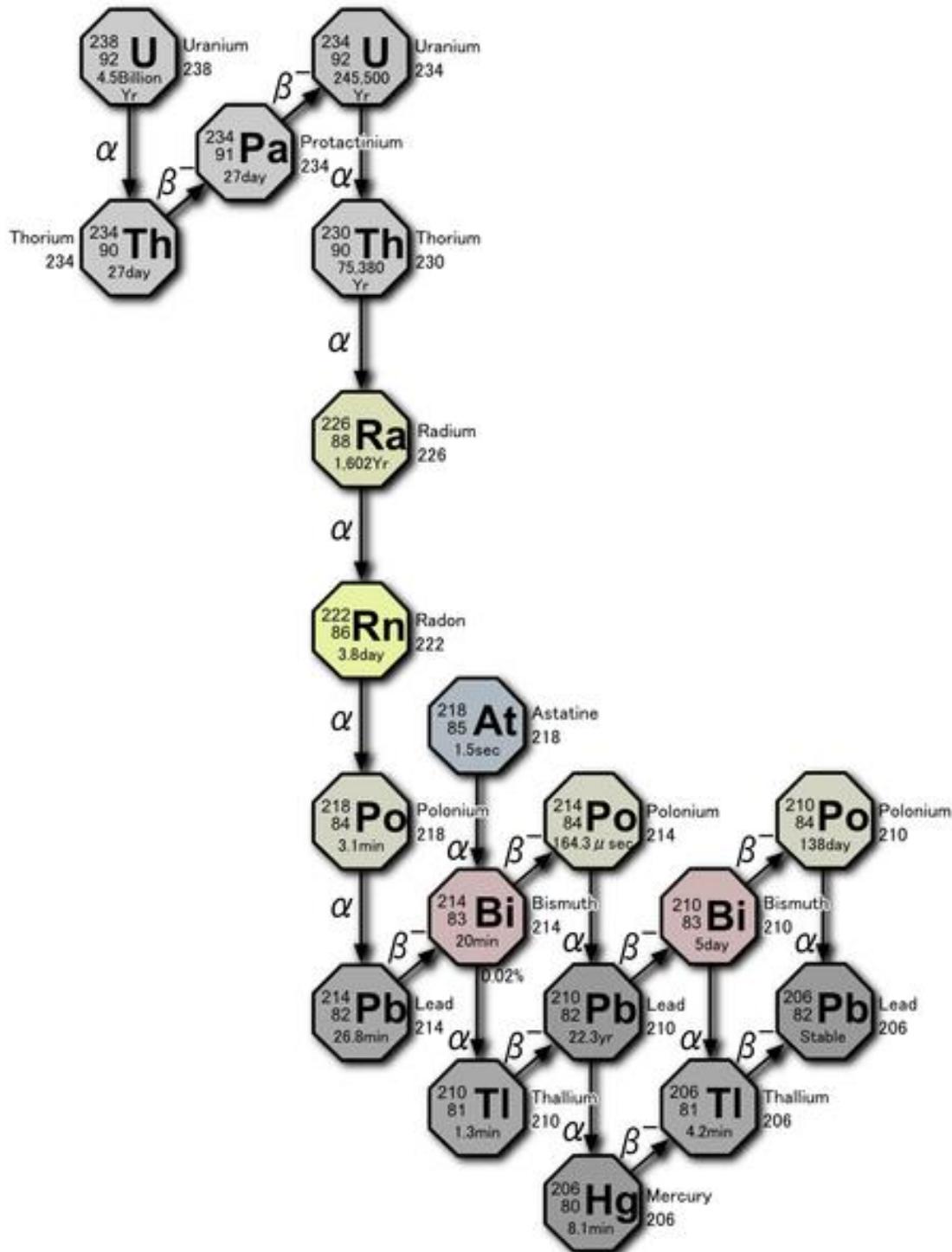
U Periodnom sistemu elemenata radon je element sa atomskim brojem 86 i sa simbolom Rn . Rečeno je da nastaje u uranijumskom nizu koji počinje izotopom urana ^{238}U a završava se stabilnim izotopom olova $^{206}_{82}Pb$. Ukupan broj komponenata u radioaktivnom nizu je 14 (slika 7). Radon je u ovoj seriji jedini radioaktivni gas i to sa najdužim periodom poluraspađa. Nastaje α -raspadom radijuma $^{226}_{88}Ra$ i spade u α -emitere, tj. posle 3,82 dana on se raspada i emituje α -česticu energije $E = 5,5 \text{ MeV}$. [1, 9]

Radon je bezbojan gas, bez mirisa i ukusa, čija je gutina $9,73 \text{ g/l}$ u standarnim uslovima, što ga čini najtežim gasom u prirodi. Kada se ohladi ispod radonove tačke zamrzavanja (202 K), ono emituje svetlost-fotofosforenciju, koja je žute boje na nižim temperaturama i narandžasto-crvene boje na temperaturi tečnog vazduha (temperatura ključanja tečnog vazduha je 78 K). Zbog ove osobine je radon i dobio naziv „*niton*” u vreme njegovog otkrića.

Atom radona ima stabilnu elektronsku konfiguraciju sa popunjениm ljudskama što je i razlog njegovog ponašanja poput plamenitih gasova. Elektronska konfiguracija atoma radona je: $5s^2 5p^6 5d^{10} 6s^2 6p^6$. Ovakva elektronska konfiguracija radona sugerise veoma ograničenu hemijsku aktivnost, međutim zbog relativno niske energije ionizacije od $10,7 \text{ eV}$ -a ipak je moguća poneka interakcija. Zbog rastvorljivosti u vodi ($230 \text{ cm}^3/\text{kg}$ na 20°C) značajna

¹ Naziv potiče iz latinske reči *nitens* koja znači sijati.

količina se pojavljuje u određenim izvorskim vodama. Pregled fizičkih osobina radona je dat u tabeli 2. [1]



Slika 7. Šematski prikaz U^{238} radioaktivnog niza, prikazanog zajedno sa radonom i sa njegovim potomcima. Strelice koje upućuju na gore iz mnogougaonika su beta raspadi, a koje idu na dole su alfa raspadi. Brojevi koji su u mnogougaonicima su periodi poluraspada. [9]

3.2 Zdrastveni rizik

Do pedesetih godina XX veka nije uočena mogućnost štetnog uticaja radona na ljude kao izazivača raka pluća. To je primećeno tek kod rudara u rudnicima uranijuma, jer radon nastaje raspadanjem urana i ima ga u rudnicima u velikim koncentracijama. Opasnost od radona prisutnog u čovekovoj okolini dokazana je 1984. godine kod jednog radnika nuklearne elektrane, jer je utvrđeno da je više ozračen kući nego na poslu. Naime, utvrđeno je da u podrumu njegove kuće prisutan radon u količini oko $100\,000\,Bq/m^3$. [12]

Rečeno je da radon raspadom emituje α - česticu energije $E = 5,5\,MeV$ koja je dovoljna da se izvrši jonizacija nekoliko hiljada atoma. Zbog energije emitovane α - čestice, radon u tkivu živih bića vrši jonizaciju oko trideset hiljada atoma u ćeliji, što ima najveći efekat na tkiva respiratornog sistema kod čoveka. Uticaj jonizovanih atoma na funkciju ćelije je veliki i ukoliko je veći broj atoma u ćeliji jonizovan, dolazi do disbalansa u pojedinim funkcijama ćelija. Manifestovanje negativnih zdravstvenih efekata kod čoveka, usled jonizacije atoma u ćelijama, je pojava malignih oboljenja, upravo usled promena u načinu funkcionisanja grupa ćelija. [9]

Iako je radon često spomenut kao glavni razlog izloženosti stanovnika radiološkom dejstvu, stvarnu radiološku štetu prave njegovi kratkoživeći potomci i zbog toga je potrebno poznavati ponašanje radonovih potomaka u atmosferi. Oko 80% novoformiranih potomaka je pozitivno nanelektrisano i hemijski su veoma aktivni. Potomci posle raspada postoje kao samostalni mobilni joni ili atomi, a nakon izgubljene kinetičke energije pripajaju se molekulima vodene pare, kiseoniku i drugih gasova - tj. pripajaju se prirodnim aerosolima. Nepripojeni potomci ostaju kao slobodni klasteri i lebde u vazduhu. Stalnim sudaranjima slobodnih klastera dolazi do njihovog ponovnog spajanja i povećavanja, a takođe i do raspadanja i do taloženja. Inhalacijom ovih aerosola, potomci radona mogu da se talože na površinu pluća. Radioaktivni aerosoli sa dijametrima u intervalu od 0,1 do $10\,nm$ najbolje se talože u ljudskim plućima. Aerosoli većih dimenzija se zadržavaju u nosu i usnoj duplji ne dopirući do osetljivog respiratornog epitela bronhijalnog stabla. Verovatnoća taloženja potomaka u ljudskim plućima je znatno veća za slobodne nego za pripojene klasterne. Skoro svi radonovi potomci su kratkoživeći: $0,2\,ms - 26,8\,min$, a među njima najvažniji ^{218}Po , ^{214}Po i ^{210}Po su alfa emiteri. ^{218}Po i ^{214}Po sa energijama alfa čestica od $6.00\,MeV$ i $7.69\,MeV$ respektivno, su najjači kontaminenti u plućima, jer sadrže najviše energije u emitovanim alfa česticama, pa vrše intenzivnu ionizaciju živih ćelija. [9, 10, 11]

Pored raka pluća istraživanja su pokazala da unosom vode koje sarži visoku koncentraciju radona dovodi do rizika nastanka raka stomaka. Evropska komisija preporučuje da koncentracija za ^{222}Rn treba da je između $100\,Bq/l$ i $1000\,Bq/l$. [18] Takođe postoji indikacija da

taloženje produkata radona može u određenim situacijama da ostavi značajnu dozu na osetljivim ćelijama kože i da prouzrokuje rak kože. [14]

U Evropi godišnja efektivna doza iz svih izvora radiacije je procenjena na unutrašnjim $3,3 \text{ mSv}$, dok je srednja godišnja izloženost radonu, toronu i njihovim potomacima u zatvorenim prostorijama procenjena na $1,6 \text{ mSv}$. Po nekim istraživanjima utvrđeno je da radon uzrokuje oko 20 000 raka pluća svake godine, to je 9% od ukupnih oboljenja i umiranja od raka pluća, i oko 2 % od oboljenja raka generalno u EU. [14]

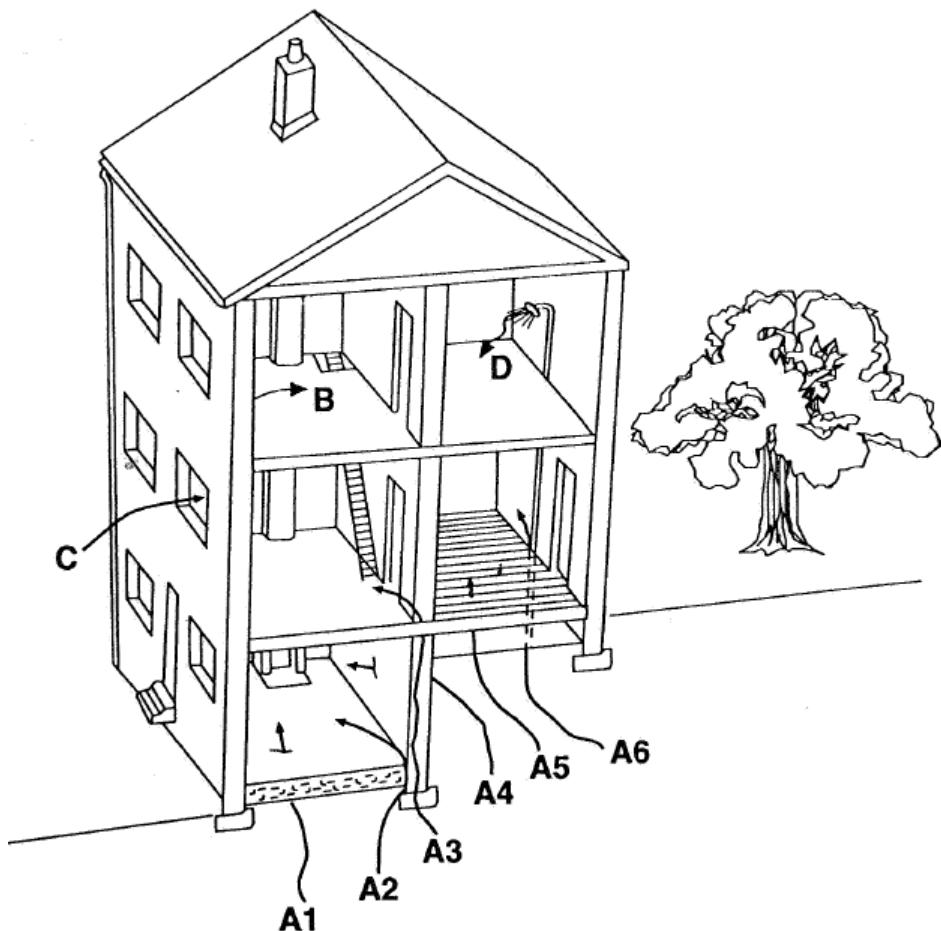
3.3 Rasprostranjenost radona

Radon kao produkt raspada urana nalazi se u prirodi u većoj količini nego kao posledica rada nuklearnih postrojenja. Predak radona, radijum, se može naći u kristalnim materijalima i zbog toga je on prisutan svuda i u zatvorenim prostorijama i na otvorenom. Prema tome radon se nalazi u zemljištu, vodi, prirodnim gasovima, spoljašnjim i unutrašnjim prostorijama i u građevinskim materijalima. [4]

Koncentracija aktivnosti ^{222}Rn u otvorenom prostoru je mala, ali u zatvorenom može dostići značajne vrednosti.

3.3.1 Radon u zatvorenoj prostoriji

Do akumulacije radona u zatvorenim prostorijama dolazi zbog migriranja radona iz zemljišta u stambeni objekat kroz pukotine ili porozne blokove zidova i poda, kroz vodu ili kroz ventilacione cevi, kao i iz građevinskih materijala (slika 8). [6]



Slika 8. Prodor radona kroz/iz: A1, A4, A5, A6-pukotina; A2-spojeva, A3-šupljina u zidovima; B-građevinskih materijala; C-spoljašnjeg vazduha; D-vode.[5]

Ako je pritisak vazduha u zatvorenoj prostoriji manji, radon ulazi u prostoriju putem vazduha koji je prisiljen na tok zbog razlike pritiska. Da li će taj radon predstavljati problem ili ne, zavisi od:

- koncentracije radijuma u zemljištu i stenama ispod date stambene prostorije
- sposobnost radona da se kreće u porama i frakturama u zemljištu i građevinskim materijalima
- sposobnosti radona da „pobegne“- emanira iz materijala koji sadrži radijum. [4]

Sile koje su odgovorne za pokretljivost radona mogu da se menjaju dnevno a i sezonski, pa je dinamička interakcija svih ovih faktora koji utiču na određivanje koncentracije aktivnosti radona u zatvorenoj prostoriji neke odredene zgrade veoma kompleksna. [4]

3.3.1.1 Geologija i pojavljivanje

Koncentracija radijuma u zemljištu zavisi od koncentracije uranijuma i torijuma, predaka u stenama i od geo hemijskih procesa² koji su bili prisutni na posmatranoj lokaciji tokom vremena.

Prirodna rasprostranjenost uranijuma-238 i torijuma-232 se menja u zavisnosti od geoloških svojstava, međutim ipak su široko rasporostranjeni u Zemljinoj kori. Srednja koncentracija uranijuma i torijuma u zemljištu se kreće između 4-12 g/t, dok je, radi poređenja, srednja koncentracija retkih metala u intervalu od 0,02-0,05 g/t. [4, 6] Shodno tome rasprostranjenost radijuma kao i njegovih potomaka u Zemljinoj kori je velik.

Koncentracija radijumovih izotopa u zemljištu je oko 40 Bq kg^{-1} (1 pCi g^{-1}). Uglavnom je njena koncentracija između $\sim 10 - 200 \text{ Bq kg}^{-1}$ ($0,3-5,4 \text{ pCi g}^{-1}$) za zemljišta izvan područja uranijumske mina. Zbog široke rasprostranjenosti radijumovih izotopa, njegovi potomci, radonovi izotopi su prisutni i u fluidima koji se nalaze u porama stena i zemljišta. [4]

3.3.1.2 Pokretljivost atoma radona u zemljištu

Atomi radona u zemljištu mogu da se kreću kroz nju putem difuzije (nije neophodno da se i fluid kreće u porama) ili konvektivnim i advektivnim tokom fluida, noseći sa sobom radon. Pokretljivost radona uglavnom zavisi od veličine i unutrašnje veze između pora, pukotina i još od toga, koliko je vode prisutno, jer upravo voda utiče na pokretljivost zemljišta i vazduha.

3.3.1.2.1 Difuzija

Difuzija je mehanizam prilikom kojeg se atomi radona kreću gradijentom koncentracije sa mesta više koncentracije radona na mesto niže koncentracije. Ona nije osetljiva na veličinu pore ili granula zemljišta, međutim veoma je osetljiva na količinu vode u porama. Sa povećanjem poroznosti zemljišta, povećava se difuzija. Prosečna dužina koju radon prelazi difuzijom, „difuziona dužina“, u suvom zemljištu je određena eksperimentalno i iznosi 1,6-1,9 m, dok u zemljištu sa velikom količinom vode 0,01 m. [4]

² Radiohemski sastav zemljišta (tj. kombinacija čvrstog materijala, vazduha, vode i organskog materijala) pokazuje geološku formaciju mesta uzorkovanja datog zemljišta, mada i klimatski uslovi i još neki procesi mogu znatno da utiču na sastav zemljišta. [4]

3.3.1.2.2 Konvekcija i advekcija

Konvektivni (vertikalna) i advektivni (lateral-horizontalni) tok se javlja zbog gradijenta pritiska u fluidima koji se nalazi u porama zemljišta i pukotinama. U slučaju gasova u zemljištu, gradijent pritiska se može javiti u vazduhu u zemljištu, između vazduha u zemljištu i atmosferskog vazduha ili u njihovoj kombinaciji. Konvekcija i advekcija zavise od unutrašnje permeabilnosti zemljišta, viskoznosti fluida koji se kreće kroz pore zemljišta i od gradijenta pritiska koji pokreće fluid. Permeabilnost zemljišta prema pokretljivosti vode pokazuje i permeabilnost zemljišta na pokretljivost gasova. Zemljište koji ima veliku količinu vode koja se slobodno kreće porama bi imao veoma nisku permeabilnost prema gasu, a slučaj je obrnut ako je zemljište suvo. [4]

3.3.1.3 Emanacija radona

3.3.1.3.1 Emanacija radona iz zemljišta

Sposobnost atoma radona da „pobegne“ iz zemljišta ili mineralnih stena se kvantitativno naziva „moć emanacije“ ili „koeficijent emanacije“ i on zavisi od lokacije dugoživećih predaka radona, tj. od uranijuma-238 i radijuma-226 u trenutku njihove dezintegracije i od postojanja vode blizu radijuma u trenutku dezintegracije. Konkretno, misli se na hemijski sastav, fizičke i vodno-mehaničke karakteristike zemljišta, ali najviše zavisi od propustljivosti-poroznosti zemljišta. [4, 9]

Atom radijuma se raspada na atom helijuma, radona i oslobađa se kinetička energija. Mali, ali ipak važan deo ove energije uzrokuje pomeranje atoma radona od mesta gde se raspodjelio i njegovo prodiranje kroz čvrsti matrijal. Ako ga njegova putanja odnese u zrno zemljišta ili poru koja sadrži vodu onda može da izgubi svu svoju energiju u vodi i da ostane u pori, ili može da “zakopa” sebe u čvrst matrijal i da bude nedostupan porama. Radon se uglavnom skladišti oko granice pora zbog razloga što zemljišta u većini slučajeva sadrže vodu u pukotinama i kapilarima uglavnom 10 do 50 % od svih proizvedenih atoma radona ostaje u porama.

Stene koje oslobađaju najveću koncentraciju radona su granitne i vulkanske stene, aluminijumski škriljci, a sedimentne stene sadrže niže koncentracije ovog gasa, ali su one i manje porozne pa zato vrše manju emisiju u spoljašnjost. [9]

U stambenim objektima ventilacija smanjuje pritisak u objektu, pa je on manji nego u okružujućem zemljištu. Ovo rezultira gradijentom pritiska preko temelja koji varira od 2 do 10 Pa, mada može da dostigne i vrednost od 15 Pa tokom zimske sezone kada se greje. Kao rezultat advektivni tok vazduha transportuje radon i dodatne pare u stambeni objekat i ovaj proces prekoračuje vrednost transportovane količine difuzijom. [13]

Veliki broj analitičkih i numeričkih modela je napravljeno radi ispitivanja transporta radona u zemljištu advekcijom ili difuzijom. Uopšteno, ovi modeli pokazuju da temelj stambenog objekta interaguje sa zemljištem koje ga okružuje, kao i to da tok gasova kroz zemljište zavisi od karakteristika zemljišta. Najveći uticaj ima zemljište koje se nalazi blizu temelja, jer kao što je već istaknuto radon ima period poluraspada od 3.82 dana što određuje granicu udaljenosti koju on može da pređe pre raspada. [4, 5]

Emanacija kao i pokretljivost radona uglavnom zavise od veličine i unutrašnje veze između pora u pukotinama, od količine vode u porama i zemljištu. Međutim, na emanaciju ima uticaj i vremenska promena, promena atmosferskog pritiska kao i temperature. [4]

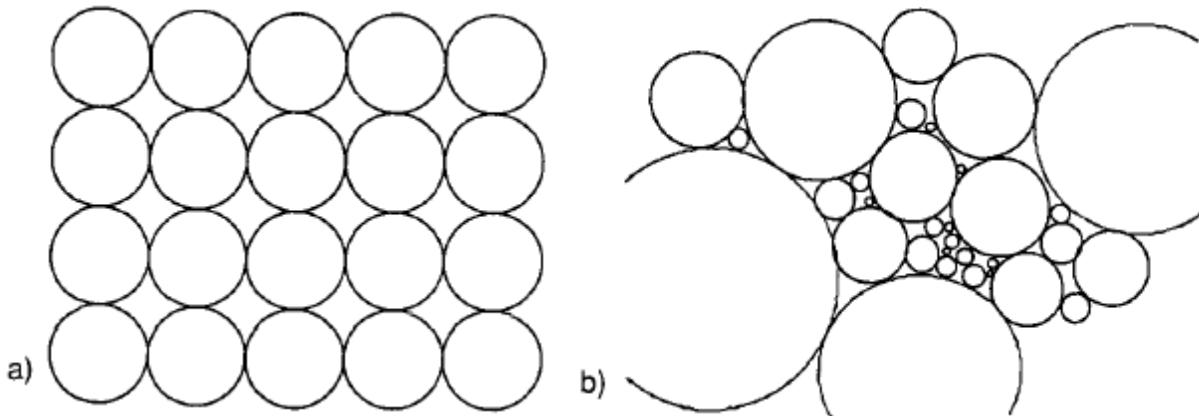
3.3.1.3.1.1 Karakteristike zemljišta

Karakteristike zemljišta imaju takođe značajan uticaj i na produkciju, a ne samo na pokretljivost i emanaciju radona. Značaj ovih karakteristika raste sa „starošću“ zemljišta, sa debljinom i sa stepenom „razvijanja“ jer tada karakteristike zemljišta postaju veoma različite od materijala pretka. Najvažniji faktori su *poroznost*, *permeabilnost* prema pokretljivosti gasa i *sadržaj vlažnosti*. Teorijski, ako su poznati sastav, godina, klimatski uslovi i topografija materijala pretka, mogu se predvideti fizički i hemijski procesi u datom zemljištu. Razumevanje svih ovih faktora je neophodno prilikom modeliranja transporta radona u zemljištu. [4]

Poroznost zemljišta se definiše prema odnosu veličine pore-pukotine u zemljištu u odnosu na veličinu samog posmatranog uzorka zemljišta. Postoje dve veoma bitne komponente: „tekstura“ pore i „struktura“ pore. *Tekstura* pore se odnosi na način pakovanja čestica zemljišta, dok *struktura* pore je zavistan od količine vazduha koji se nalazi u uzorcima zemljišta. [9]

Tekstura zemljišta je veoma važna prilikom proučavanja pokretljivosti radona u njoj, jer ona direktno utiče na *permeabilnost*. Permeabilnost zemljišta je određena veličinom, brojem i stepenom međuveza između *pora*, i zavisi od veličine, oblika i raspodela granula zemljišta. Permeabilnost je veća u zemljištu gde su pore dobro raspoređene- sferna granula, a manja je u zemljištu gde je raspored haotičan, granule su sitnije i popunjavaju vazdušne prostore između velikih granula (slika 9). Ove granule nisu sve sfernog oblika, nego postoji podela i po obliku granula. Orientacija i oblik ovih granula takođe veoma utiču na permeabilnost zemljišta i na

pokretljivost vode i gasa u zemljištu. Naravno, pukotine takođe povećavaju premeabilnost zemljišta. [4]



Slika 9. Granule uniformnog oblika i raspoređenosti (visoka permeabilnost), b) granule zemljišta su različitog oblika i haotično raspoređene (niska permeabilnost)[4]

Struktura zavisi od vlažnosti zemljišta, gde je mali stepen vlažnosti zemljišta omogućen je veći stepen difuzije i emanacije radona kroz zemljište. Ukoliko je viši stepen vlažnosti zemljišta, onda su pore popunjene sa vodom i onemogućen je intezivan proces difuzije radona kroz zemljište i emanacije iz zemljišta. [9]

3.3.1.3.1.2 Klimatski uticaj

Meterološki uslovi imaju značajan uticaj na transport radona, a bitni faktori su uticaj vetra, promena atmosferskog pritiska i temperature.

Uticaj promene pritiska. Ako pritisak padne, on tera gas da napusti zemljište, što povećava koncentraciju radona blizu površinskih slojeva. Ako se pritisak povećava, atmosferski vazduh ulazi u zemljište terajući gas koji se nalazi blizu površine u dublje delove zemljišta zajedno sa radonom. [4]

Vetar i Bernulijev efekat iznad neravne površine zemljišta izvlači vazduh iz zemljišta, tj tera ga da sa većih dubina dođe do površine tj. dovodi do istog efekta kao kada se pritisak povećava. [4]

U početku ispitivanja emanacije radona prepostavka je bila da *promena tempreature* nema uticaj na količinu radona koji "napušta" zemljište, međutim ova prepostavka je bila

pogrešna. Današnja istraživanja pokazuju da promena temperature ima uticaj i to takav da emitovana količina radona raste sa porastom temperature. [4]

3.3.1.3.2 Emanacija radona iz građevinskih materijala

Građevinski materijali su drugi glavni izvor radona u unutrašnjoj prostoriji. Radijum je široko rasprostranjen u zemljinoj kori, pa se u određenim količinama može naći i u građevinskim materijalima koji se dobijaju preradom raznih materijala iz zemlje. [4]

Fizičke veličine koje dozvoljavaju kvantitativni opis transporta radona i brzinu ekshalacije iz građevinskih materijala su: koeficijent emanacije, produkcije radona, koja zavisi od koncentracije radijuma, poroznost, količine vode koja se nalazi u materijalu i koeficijent difuzije. U ovim materijalima, advekcija, koja je dominantan process prilikom transporta kroz zemljište, može da se zanemari zbog niske vrednosti gradijenta pritiska u medijumu. [15, 17]

Proces produkcije i poreklo sirovog materijala su najbitniji faktori koji određuju koncentraciju aktivnosti radioaktivnog materijala u građevinskom materijalu, prema tome radioaktivnost građevinskog materijala zavisi od minerala koji su upotrebljeni za njegovu proizvodnju. Od ovih minerala npr. granit, aluminijumski škriljci i vulkanske stene imaju povišen sadržaj prirodnih radionukleida dok pesak i šljunak imaju specifičnu vrednost aktivnosti radijuma blisku srednjoj vrednosti za zemljišta. Povećan sadržaj prirodnih radionukleida u materijalima može nastati i kao posledica korišćenja sekundarnih sirovina iz industrijskih postupaka, a to su materijali kao što su elektrofilterski pepeo-dobijen sagorevanjem uglja u termoelektranama ili sagorevanjem boksitne rude-šljaka i druge sekundarne sirovine koje se nalaze u prirodi ili se koriste kao konstituent građevinskog materijala. [9, 16] Tipična vrednost količine radijuma i torijuma u građevinskim materijalima je 50 Bq kg^{-1} ili manje. [5]

Materijali se dele prema načinu na koji su obrađeni kako bi dali odgovarajući građevinski materijal i to na termičko obrađene materijale i materijale koje termički još nisu obrađeni. Visokotemperaturska obrada materijala smanjuje jačinu ekshalacije radona iz građevinskog materijala, jer pri termičkoj obradi dolazi do zbijanja mikročestica i do zatvaranja pukotina. Zato crvena cigla, pepeo, cement, šljaka imaju mali koeficijent emanacije oko 1%, dok materijali koji tek treba da se termički obrade (silikatna cigla, šljunak, pesak) imaju daleko veći koeficijent emanacije oko 10%. [9]

Građevinski materijali su glavni izvori torona- ^{220}Rn u zatvorenu prostoriju. Zbog njegovog kratkog perioda poluraspada (55 s) toron koji nastaje u zemljištu ne dostigne unutrašnju prostoriju i njegov doprinos se može zanemariti. Ovo je razlog zašto se manja pažnja obraća na koncentraciju aktivnosti torona u zatvorenoj prostoriji iako njena vrednost u nekim slučajevima može dostići vrednost koncentracije aktivnosti radona- ^{222}Rn . [5]

3.3.1.3.3 Emanacija radona iz vode

Radijum je široko rasprostranjen u zemljinoj kori, pa neki minerali dolaze u kontakt sa podzemnim vodama. Radon je rastvorljiv u vodi i takođe se može naći u podzemnim vodama u nekim slučajevima čak u značajnijoj koncentraciji. Međutim, uglavnom se mala količina radona rastvori u vodi, zato je češća pojava da voda igra ulogu prenosioца, tj. radon prelazi u vodu direktno iz radioaktivnog raspada radijuma u stenama i transportuje se putem vode.

U slučaju da voda koja se koristi u domaćinstvu, potiče iz takvog bunara, koji je okružen stenama ili zemljишtem koji sadrži radijum, postoji mogućnost da se poveća koncentracija aktivnosti radona u zatvorenoj prostoriji. Koncentracija aktivnosti radona u vodama koji dolaze iz ovakvih bunara je u intervalu od $100 kBq/m^3$ do $100 MBq/m^3$. Rezultati merenja pokazuju, da je potrebna koncentracija aktivnosti radona u vodi od $10 kBq/m^3$ da bi ona uticala na unutrašnju promenu koncentracije aktivnosti radona od $1 Bq/m^3$ korišćenjem vode u domaćinstvu. [5]

Korišćenjem vode u domaćinstvu radon biva oslobođen u prostoriju npr. zagrevanjem vode u tušu ili tokom pranja.

3.3.1.3.4 Emanacija radona iz gasova koji se koristi u domaćinstvu

Radon u prirodne gasove dospeva iz stena i materijala koji okružuju mesto gde se formira gas. Koncentracija aktivnosti radona u prirodnim gasovima je oko $1000 Bq/m^3$. [5] U nekim regijama prirodni gas, koji se koristi za grejanje prostorija ili za kuhanje, sadrži povišenu koncentraciju aktivnosti radona, međutim skoro svi gasovi se drže i transportuju putem cevi. Deo radona će da se raspade prilikom transporta, pa je uglavnom njen uticaj na unutrašnju koncentraciju aktivnosti radona mali. [4]

3.3.1.4 Visinska raspodela koncentracije radona

Analizirajući koncentraciju aktivnosti radona po vertikalnoj raspodeli, za građevinske objekte, najveća koncentracija aktivnosti radona se nalazi u podzemnim etažama zgrada, bilo da su u pitanju podrumi ili garaže. U prizemlju je manja koncentracija aktivnosti radona nego u podrumu, a takođe se može izmeriti izvesna manja količina radona i na prvom spratu. Kako se povećava visina koncentracija aktivnosti radona drastično opada, tako da na trećem i višim spratovima koncentracija aktivnosti je u granici greške mernih uređaja. [9]

3.3.2 Radon u atmosferi

Zemljište je glavni izvor radona u spoljašnjem vazduhu, međutim ukupnoj vrednosti koncentracije aktivnosti doprinosi i još 2% radona koji se oslobađa iz okeana. Vazduh iznad okeana ima relativno malu koncentraciju radona $\sim 0,1 \text{ Bq}/\text{m}^3$, zbog veoma male količine radijuma koja se nalazi u morskim vodama i zbog visoke rastvorljivosti radona u vodi na niskim temperaturama.

Iz zemljišta se radon uglavnom oslobađa difuzijom, koja nastaje zbog velikog gradijenta koncentracije između radona u gasovima u zemljištu i radona u sloju vazduha od nekoliko centimetara iznad površine zemlje. [4] Merenja koja su vršena u okolini Novog Sada dala su sledeće rezultate: koncentracija aktivnosti radona emaniranog iz zemljišta kretala se u granicama od $(163\text{-}3146) \text{ Bq}/\text{m}^3$. U Petrovaradinu, na svim mernim tačkama, zabeležena je intenzivnija emanacija radona tako da je srednja koncentracija emaniranog radona $(2214\pm387) \text{ Bq}/\text{m}^3$.

Koncentracija aktivnosti radona u spoljašnjem vazduhu se menja dnevno i u zavisnosti od sezone kao i od geografske lokacije i visinske razlike.

Direktno sezonske promene utiču na temperaturu, pritisak i vlažnost, a od ovih parametara zavisi koncentracija aktivnosti radona koji se zadržava nisko iznad zemljišta. Maksimum koncentracije aktivnosti radona treba očekivati u jesen ili na početku zime, jer je tada najviši vazdušni pritisak i nema puno pomeranja vazdušnih masa, dok se minimum koncentracije aktivnosti može očekivati u proleće. Dnevne varijacije koncentracije aktivnosti radona su takođe vezane za atmosferske promene, gde je oko ponoći i u ranim jutarnjim satima prisutan maksimum koncentracije radona zbog temperaturne inverzije koja sprečava vertikalno strujanje vazduha. Nakon svitanja dolazi do postepenog zagrevanja tla i do izdizanja vazduha sa površine tla i tada dolazi do smanjenja koncentracije aktivnosti radona. Kasno popodne raste stabilnost atmosfere i to dovodi do porasta koncentracije radona. [9]

Spoljašnji vazduh kao izvor radona ima mali uticaj na ukupnu koncentraciju radona u zatvorenoj prostoriji, međutim u stanovima koji su na višim spratovima, on može da bude značajan. [5]

4 Eksperimentalni deo

Cilj rada je da se odredi doprinos pojedinih izvora radioaktivnog gasa radona ^{222}Rn ukupnoj koncentraciji aktivnosti radona u zatvorenoj prostoriji. Realizacija zadatog cilja se vrši merenjem ukupne koncentracije aktivnosti radona u dvema prostorijama koje su u sklopu jednog stambenog objekta. Obe prostorije se nalaze na prizemlju i postoji veome velika razlika u vremenskom period kada su izgrađene. „Stara kuća“, gde se vršilo merenje, je sagrađena pre 1905. godine a novi deo kuće je sagrađen 2011. godine. Dakle, poredili smo prisustvo radona u novoj i staroj gradnji. Način izgradnje kao i građevinski materijali koji su korišćeni veoma su različiti. Pored merenja ukupne koncentracije aktivnosti radona u prostoriji određice se i koncentracija aktivnosti radona u vodi za piće koja se koristi u tom domaćinstvu, dok će se doprinos građevinskog materijala ukupnoj koncentraciji uzeti iz [31, 38, 39].

4.1 Realizacija eksperimenta

- Da bi se odredila koncentraciju radona unutar stambenog objekta koristi se radonski kanistar sa aktivnim ugljem. Kanistar se postavlja na visini od 1 m od podlage, na udaljenosti od 1 m od oba zida. Prostorija se drži zatvorena 48 h, tj. dok traje ekspozicija.
- Merenje koncentracije aktivnosti radona sakupljenog eksponiranjem ugljenog kanistra izvršeno je na HPGe detektoru, koji se nalazi u prizemnoj Laboratoriji Prirodno-matematičkog fakulteta u Novom Sadu. Laboratorija u kojoj je detektor nalazi se na oko 75 m nadmorske visine, a detektor je u prizemnoj prostoriji čiji betonski zidovi debljine 15 cm predstavljaju primarnu zaštitu. [25].
- Merenje koncentracije radona u vodi se vrši pomoću RAD 7 detektora, takođe u Laboratoriji Katedre za nuklearnu fiziku.

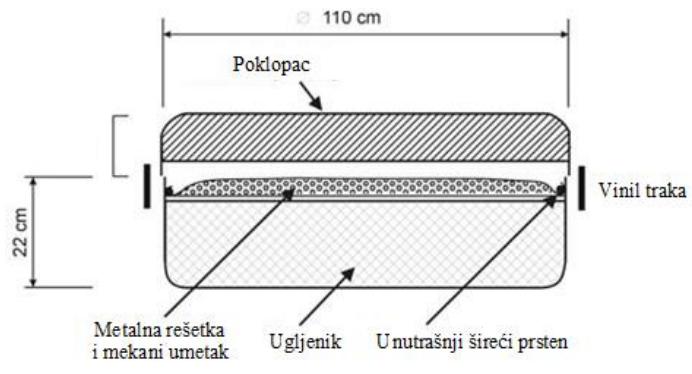
4.1.1 Opis eksperimentalne aparature

4.1.1.1 Merenje koncentracije aktivnosti radona u vazduhu- kanistar sa aktivnim ugljem

Jedna od najpoznatijih integracionih tehnika za pasivno merenje je adsorpcija radonskih čestica na aktivnom uglju. Kanistri sa aktivnim ugljem su najjednostavnija merila koja služe za merenje koncentracije aktivnosti radona (slika 10). Tačnost ovog metoda merenja je izuzetno loša i iznosi oko $\pm 20\%$, a i na izmerenu vrednost veoma utiče vlažnost vazduha i protok vazduha. Još jedna karakteristika ove metode je što njena tačnost opada kako se produžava vreme proteklo od momenta eksponiranja do trenutka merenja kanistra [19, 21]. Ipak, metod određivanja koncentracije aktivnosti radona u vazduhu ugljenim kanistrima predstavlja izuzetno jednostavan metod i kao takav može poslužiti u svrhe utvrđivanja okvirnih vrednosti

koncentracije radona u ispitivanim prostorijama. Ukoliko su potrebna preciznija merenja, onda se mora korisiti neki drugi metod.

Merenje koncentracije ^{222}Rn i njegovih kratkoživećih potomaka adsorpcijom na aktivnom uglju zasnovano je na osobini aktivnog uglja kao poroznog homogenog medijuma da adsorbuje atome radona koji se istovremeno u toku perioda izlaganja radioaktivno raspadaju. [21] Radon adsorbovan u granulama aktivnog uglja raspada se na kratkoživeće potomke: ^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi , ^{214}Po i ^{210}Pb . Radonovi potomci ^{214}Pb i ^{214}Bi emituju gama zračenje (slika 7), što omogućava određivanje koncentracije radona gama spektrometrijski preko navedenih prelaza, jer se već nakon tri časa uspostavi ravnoteža radona i potomaka u uglju [12]. Koncentracija radona je određena merenjem gama zračenja koje emituje olovo ^{214}Pb (295 i 352 keV) i bizmut ^{214}Bi (609 keV). Pasivna priroda aktivnog uglja dozvoljava i adsorbciju i desorpciju, u slučaju da se adsorbovani radon raspade još u toku ekspozicije kanistra [22].



Slika 10. Prikaz radonskog kanistra sa aktivnim ugljem i njegov poprečni presek.

Delovi ugljenog kanistra su:

1. Metalna kutija sa poklopcom
2. Zrna aktivnog uglja
3. Metalna rešetka
4. Unutrašnji šireći prsten
5. Vinil traka
6. Mekani umetak (stiropor) pričvršćen za unutrašnju površinu poklopca

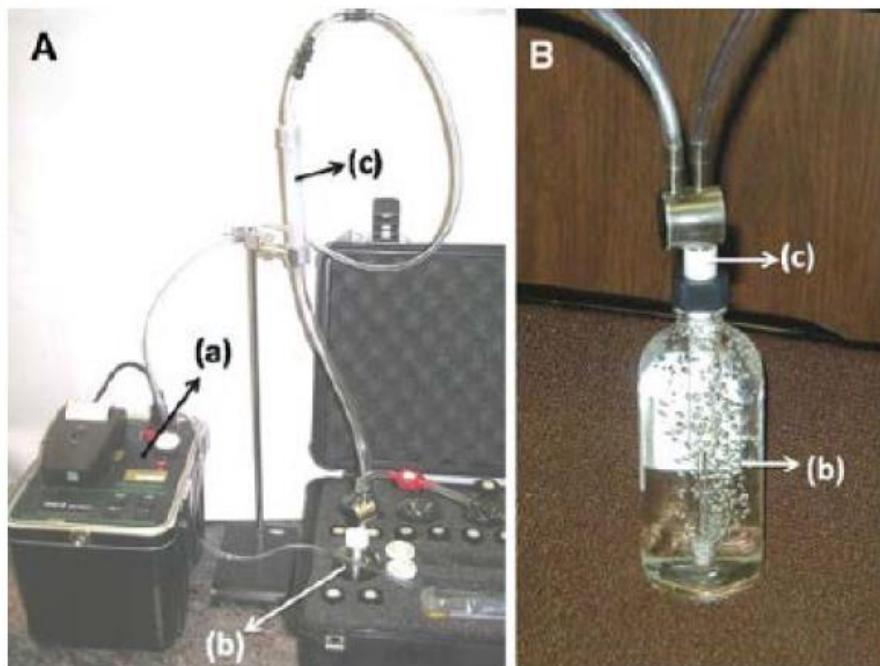
Na kraju izlaganja (ekspozicije), koje traje ne kraće od 48 časova, aktivni ugalj se prekriva stiroporom i kanistar zatvara za to predviđenim poklopcem i polovinil trakom. Sačeka se najmanje tri sata da se uspostavi ravnoteža između radona i njegovih potomaka u aktivnom uglju, pa se gama-spektroskopskom metodom, pomoću scintilacionog ili poluprovodničkog detektora, analizira gama zračenje koje emituju radonovi potomci. [25]

Masa svakog kanistra je izmerena i pre i posle ekspozicije i razlika mase je uzeta u obzir prilikom računanja aktivnosti. [19]

4.1.1.2 Merenje koncentracije aktivnosti radona u vodi -alfa spektrometrijska metoda - RAD7 detektor

Ovi detektori su posve korisni, jer ne samo da se može odrediti koncentracija aktivnosti radona u zatvorenoj prostoriji, nego je moguće i odrediti tačnu lokaciju šupljine u betonu poda ili pukotina u izolaciji gde dolazi do prodiranja radona u unutrašnjost putem procesa difuzije. U zavisnosti od mernih kompleta-uređaja koji prate detekcioni uređaj moguće je koristiti ovu metodu za određivanje koncentracije aktivnosti radona u vodi i u zemljištu.

RAD- H_2O sistem jer zatvoren sistem u kome su zapremina vazduha i vode konstantni i nezavisni od brzine protoka. Vazduh cirkuliše kroz vodu i kontinualno izdvaja radon sve do stanja u kome se uspostavlja ravnoteža (slika 11). RAD- H_2O sistem dostiže stanje ravnoteže u roku od 5 minuta, posle kojih više nema radona koji bi se mogao izdvojiti iz vode. [19]



Slika 11. RAD7 detektor proizveden od strane Durridge Company, postavljen za određivanje koncentracije aktivnosti radona u vodi, gde je a) monitor uređaja, b) voda sa aeratorom i c) crevo za deksikator

Prednost ove metode je mogućnost elektronskog razdvajanja energije svake emitovane α -čestice, a tako se može odrediti od kog izotopa (^{218}Po , ^{214}Po) potiče detektovana alfa-čestica. Po

sposobnosti razdvajanja moguće je alfa spektrometrijskom metodom razdvojiti „stari” od „novog” radona, radon od torona, signal od šuma, a još jedna pogodnost ove metode je veoma nizak i stabilan fon. [9, 19]

Kod ovakvih uređaja korisnik može, po želji da odabere način rada instrumenta, dužinu trajanja merenja, broj ciklusa, izgled izveštaja, režim rada pumpe. Nakon završenog ciklusa merenja podaci koji se dobijaju u vidu štampanog izvaštaja su sledeći [9]:

- srednja koncentracija aktivnosti radona (torona) za dati period merenja
- standardna devijacija srednje koncentracije
- datum i tačno vreme završetka merenja
- temperatura i vlažnost vazduha unutar merne komore
- ukupan odbroj
- odbroj po energetskim prozorima i procentualni deo u ukupnom odbroju
- histogram srednjih koncentracija po zadatim ciklusima
- kumulativan alfa spektar

Tačna vrednost efikasnosti izdvajanja radona zavisi i od temperature okoline, ali je gotovo uvek veća od 90%³. U toku rada sa ovakvim sistemom neophodno je konstantno pratiti i proveravati relativnu vlažnost vazduha unutar merne komore i potrebno je snižavati ispod 10%. Za slučaj kada je vlažnost vazduha veća od 10% smatra se da merenja nisu izvršena pod realnim uslovima, te se merna komora mora ostaviti da radi u prazno, kako bi se relativna vlažnost smanjila do prihvatljivog nivoa. [9]

Električni signal registrovan raspadom radionukleida je pojačan, filtriran i sortiran po jačini. U procesu prikupljanja ovih signala formira se spektar (slika 12). Spektar dozvoljava energije od 0-10 MeV-a, međutim posebna pažnja se poklanja intervalu od 6-9 MeV-a, jer su produkti radnog torona i radona koji emituju alfa čestice većinom u ovom intervalu. Spektar je podeljen na 200 kanala gde po kanalu odgovara energija od 50 keV-a. Analiza spektra je pojednostavljena jer je elektronika RAD7 napravljena tako da grupiše 200 kanala u 8 prozora. Dati prozori su navedni slovima od A-H po azbučnom redu [30].

Prozor A pokriva energije u intervalu od 5,40-6,40 MeV-a, prema tome alfa čestica energije 6 MeV-a od ^{218}Po će se ovde naći. Broj raspada detektovanih u datoj regiji se deli sa vremenom koji je bio potreban da bi se podaci sakupili i ovo se definiše kao brzina brojanja. Sve se ovo čuva u memoriji detektora [30].

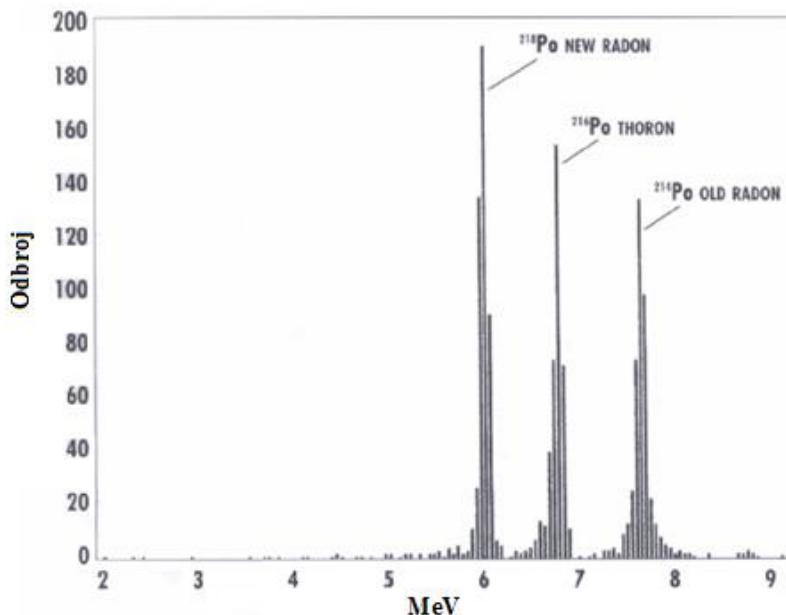
Štampani spektar dat na slici 12 sadrži prozore od A-D. Prozori E-H čine složeni prozor O. Dati prozor je suma svih detekcija kojih su se desili u energetskom intervalu energetskog dela spektra prozora E-H. Sadržaj različitih prozora je:

- Prozor A- Ukupan broj detekcije ^{218}Po

³ Efikasnost izdvajanja, odnosno procenat radona koji se uklanja iz vode u toku jednog ciklusa, veoma je visoka i iznosi oko 99 % za uzorak zapremine za 40 ml I oko 94 % za uzorak zapremine 250 ml. [19]

- Prozor B- Ukupan broj detekcije ^{216}Po
- Prozor C- Ukupan broj detekcije ^{214}Po
- Prozor D- Ukupan broj detekcije ^{212}Po

Da bi se odredila koncentracija aktivnosti radona koristi se prozor A, dok se prozori B i D mogu koristiti za određivanje koncentracije torona.



Slika 12. Idealni visokorezolucioniji alfa spektar

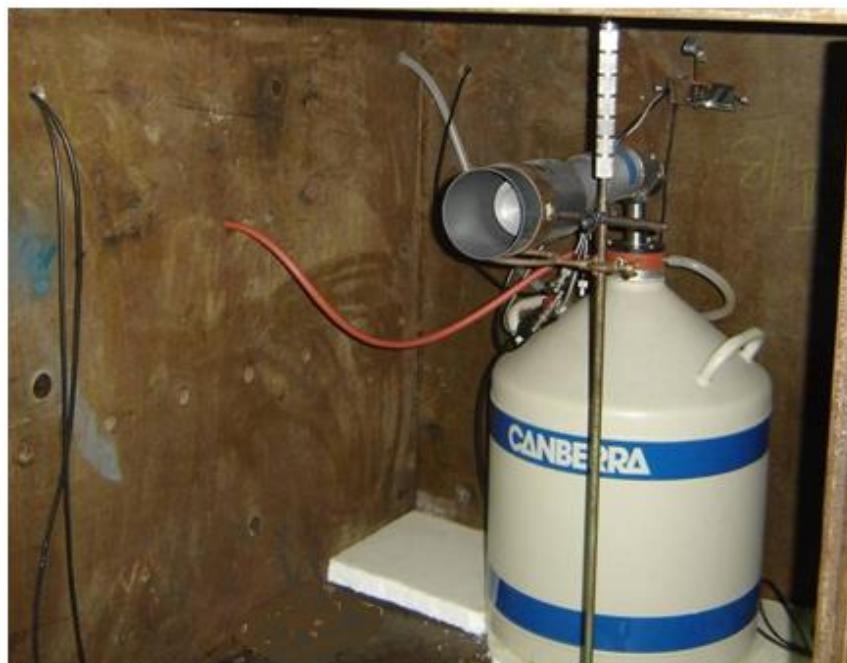
Ukoliko se uzorak vode ne meri odmah po uzorkovanju (odnosno u trenutku punjenja) koncentracija radona se smanjuje i potrebno je izvršiti korekciju na raspad. Ukoliko je uzorak pravilno zatvoren, skladišten i meren u roku od časa, nije potrebno vršiti korekciju na raspad. Korekcija na raspad je jednostavna eksponencijalna funkcija sa vremenskom konstantom od 132,4 časa, pa se korekcija vrši tako što se dobijena aktivnost pomnoži sa faktorom DCF (Decay Correction Factor), $DCF=2^{(T/132,4)}$, gde je T vreme proteklo od trenutka punjenja.

4.1.1.3 HPGe detektor

HPGe detektor je poluprovodnički detektor. Kod ovih detektora je postignuta veoma velika čistoća materijala, čime se povećava oblast prostosnog nanelektrisanja u p-n inverzno polarisanoj diodi (p tip poluprovodnika je priključen na negativni potencijal a n tip na pozitivni).

Glavne karakteristike HPGe detektora su: velika čistoća materijala, niska vrednost ionizujućeg zračenja za stvaranje para elektron-šupljina, visoka provodljivost, visoka rezolucija i trenutni odaziv.

Kada γ -čestica interaguje u aktivnoj zapremini detektora, stvara se par elektron-šupljina koji se električnim poljem pokupe. Sakupljeno nanelektrisanje stvara naponski signal koji je proporcionalan energiji koju je foton prilikom interakcije izgubio unutar aktivne zapremine detektora. Ovaj događaj se prikazuje linijom foto-vrha u spektru ili poznatiji naziv je pik. Za spektroskopske analize se koristi pik totalne apsorpcije. Energija detektovanog zračenja se određuje iz položaja maksimuma pika u spektru, a iz površine pika se može odrediti intenzitet zračenja ili aktivnost izvora. [26]



Slika 13. Prikaz detektora M-Kambera.

U ovom radu analiza gama zračenja emitovanih od strane radonovih potomaka vršena je pomoću detektora proizvođača Kambera (Canberra) čije su karakteristike date u tabeli 2 (slika 13, 14). Navedeni detektor ima gvozdenu zaštitu. Gvožđe koje je korišćeno za spomenutu zaštitu potiče od broda koji je potopljen pre II svetskog rata.

Tabela 2. Karakteristike detektora

Oznaka	M
Proizvođač	Canberra
Tip	Closed end coaxial, p-type
Model	GC2520
Kriostat	7600SL/S
Relativna efikasnost [%]	22.4
Spoljašnji kontaktni sloj	0.6 mm Ge(Li)
Unutrašnji kontaktni sloj	1 μm Au *
Zaštita	25 cm Fe



Slika 14. Prizemna laboratorija Prirodno-matematičkog fakulteta u Novom Sadu. Detektor pomoću kojeg je vršeno merenje je prikazan na slici a.

4.1.2 Rezultati merenja

4.1.2.1 Radon u vazduhu

1987. je od strane EERF-a (Eastern Environmental Radiation Facility) publikovan rad o Standardnim procedurama kod merenja ^{222}Rn pomoću ugljenih kanistara. Da bi korišćenje ovih kanistara bilo olakšano, EPA (Environmental Protection Agency) je objavio uputstvo u kome je dokumentovan detaljan postupak merenja i računanja koncentracije aktivnosti radona pomoću ovih kanistara. [27]

U ovom radu će se koncentracija aktivnosti radona u vazduhu računati po gore spomenutom postupku. Koncertracija aktivnosti radona se izračunava pomoću sledećeg izraza:

$$C = \frac{I - I_F}{T_s \cdot E \cdot C_F \cdot D_F} \quad (4.1)$$

$$\Delta C = \frac{\sqrt{I} + \sqrt{I_F}}{T_s \cdot E \cdot C_F \cdot D_F} \quad (4.2)$$

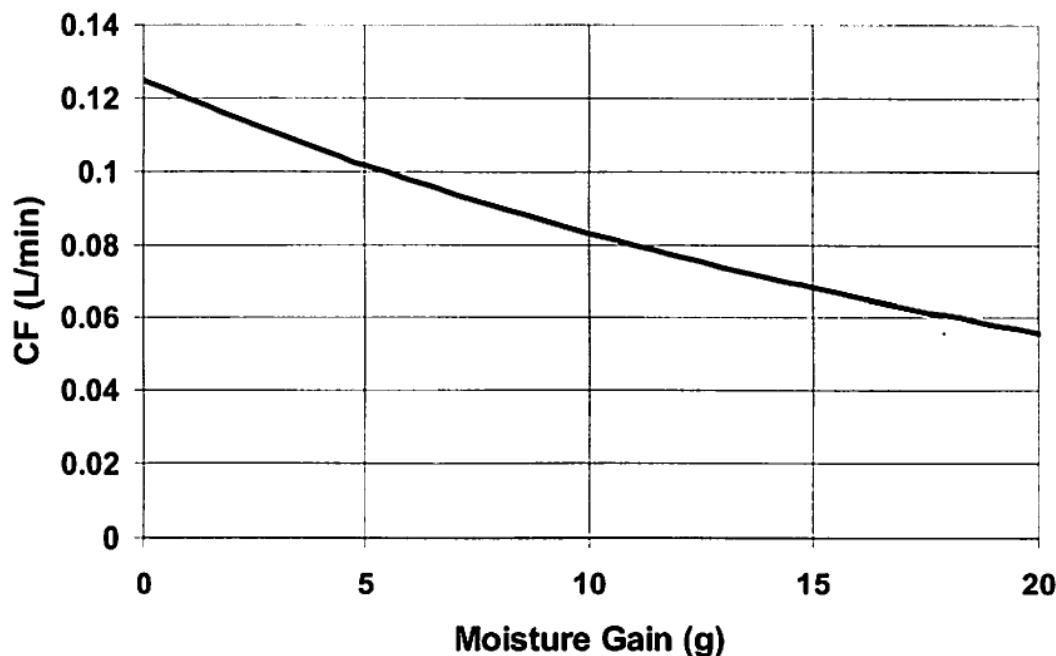
gde je:

- C_F -kalibracioni faktor, tj. brzina adsorpcije radona u $[m^3/ks]$ očitava se sa kalibracione krive na osnovu prinosa mase Δm (slika 15)
- Δm -prinos mase, koji se očitava u l/min i pretvara se u $[m^3/ks]$
- I -ukupan spektralni intenzitet radonskih linija u $[C/ks]$
- I_F -spektralni intenzitet fona u $[C/ks]$
- T_s -vreme ekspozicije kanistra u $[ks]$
- E -efikasnost detektora u $[C/(ksBq)]$
- C -koncentracija radona u $[\frac{Bq}{m^3}]$
- D_F -faktor raspada od polu-vremena ekspozicije do početka brojanja, koji se izračunava pomoću (4.3):

$$D_F = 2^{-\frac{t}{\frac{T_{1/2}(Rn)}{2}}} \quad (4.3)$$

gde je:

- t -vreme u danima proteklo od sredine eksponiranja do početka merenja na detektoru
- $T_{1/2}$ - period poluraspada radona (3,82 dana)



Slika 15. Kalibraciona kriva

Ukoliko je period ekspozicije duži od 48 h, inicijalni kalibracioni faktor C_F mora biti korigovan pomoću krive vlažnosti koja predstavlja zavisnost brzine adsorpcije radona od vremena izlaganja (uzima se u tom slučaju koeficijent AF), a za konstantnu vlažnost aktivnog uglja. Izbor krive vlažnosti (20%, 50% ili 80%) se vrši na osnovu prinosa vlage (tabela 3).

Tabela 3. Selekcija krive vlažnosti u zavisnosti od prinosa vlage

Prinos vlage	Relativna Vlažnost
Manji od 1.0 g	20%
1.0-4.0 g	50%
veći od 4.0 g	80%

Efikasnost detektor-a se određuje pomoću sledećeg izraza:

$$E = \frac{I_s - I_F}{A} \quad (4.4)$$

gde je:

- I_s -intenzitet linije standarda
- I_F -intenzitet linije fona

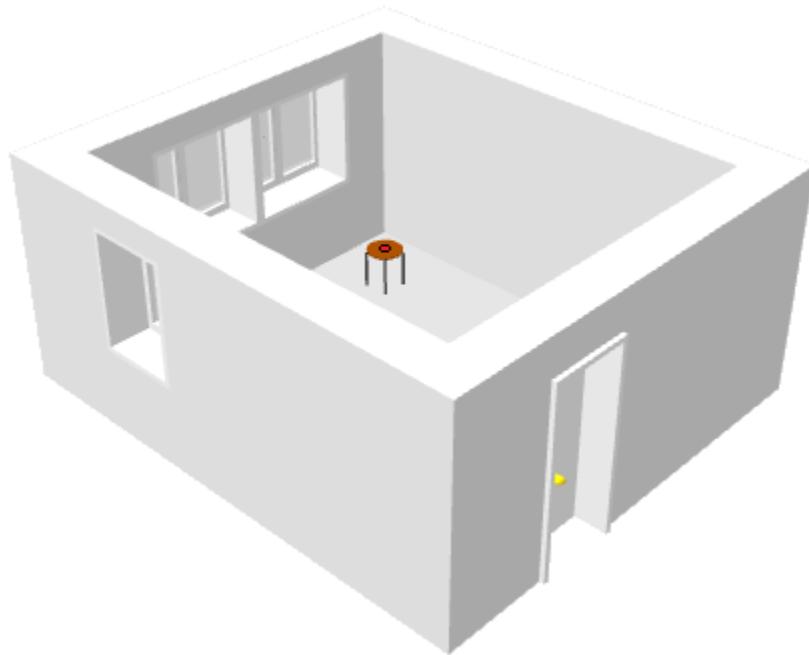
$$A = A_0 \cdot 2^{-\frac{t'}{T_{1/2}}} \quad (4.5)$$

- $A_0=722,618 \text{ Bq}$ na 01.12.1990
- $T_{1/2}=1620 \text{ god}$
- t' – vreme proteklo od 01.12.1990 do vremena merenja u godinama

I prostorija

Ova soba je deo stare kuće, a njene dimenzije su 5 m x 4.40 m x 2.50 m. Zidovi nisu menjani od izgradnje, tako da se sastoje od mešane zemlje. Debljina ovih zidova je 53 cm. Soba ima tri prozora i jedna ulazna vrata. Prostorija ima drveni pod debljine između 15-17 mm ispod koje se nalazi zemljana podloga.

Kanistar se postavlja na visini od 1 m od podlage, a udaljenost kanistra od oba zida je takođe 1 m. Ova postavka kao i izgled prostorije je dat na slici 16.



Slika16. Prikaz prostorije I sa postavljenim kanistrom (obeleženo crvenom bojom).

- Početak merenja je 26.08.2012 u 9:30, početna masa je 163,0 g.
- Kraj merenja je 28.08.2012 u 7:30, a tada izmerena masa je 167,0 g.

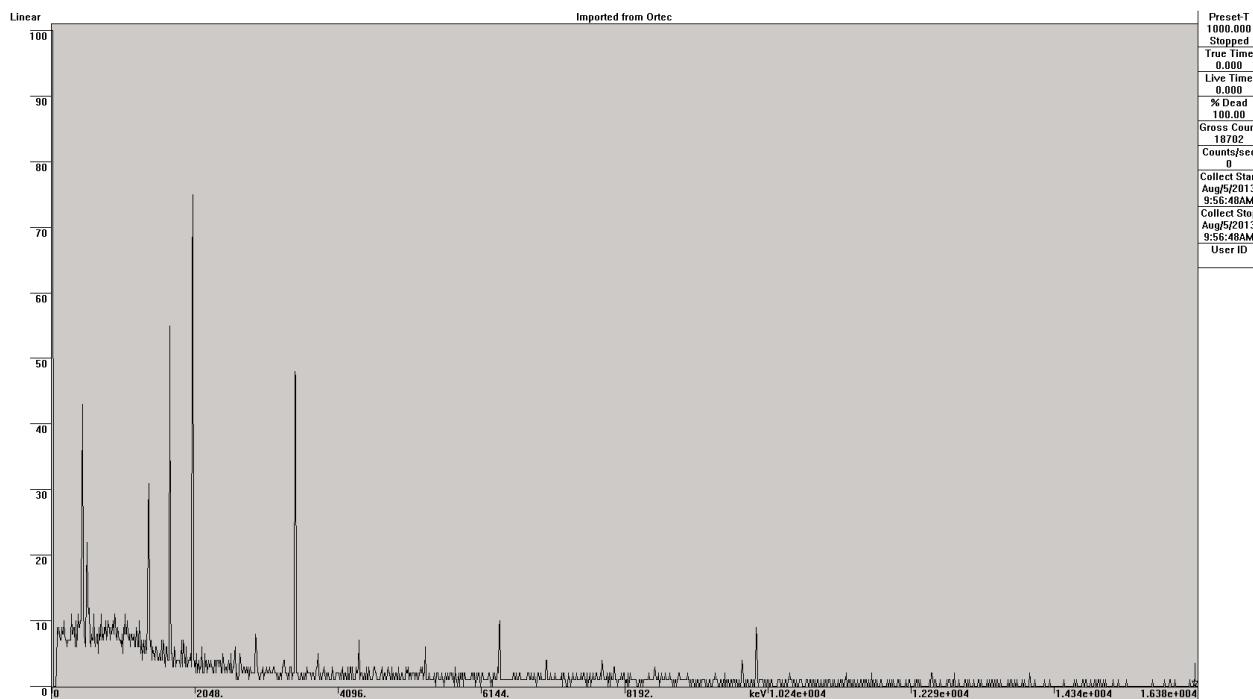
Kanister se stavlja u detektor istog dana u 08:25 (Mradon 120828)

Vreme trajanja razvijanja kanistera je 3000 s.

Dobijeni rezultati:

Tabela 4. Spektralni intenziteti pojedinih radonskih linija

E[keV]	I[area]
295	328
351	571
609	399
	$\bar{I} = 432,67 \text{ C/ks}$

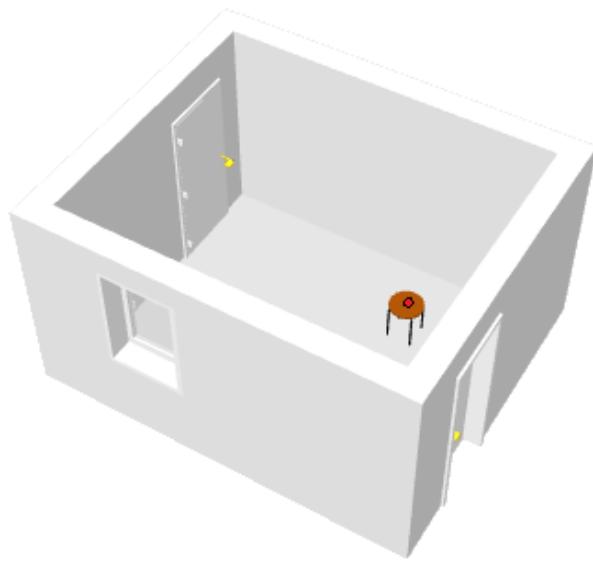


Slika 17. Izgled fonskog spektra - Mradon 120828

II Prostorija

Ova prostorija je savremenije izgradnje. Njene dimenzije su 4.20 m x 3.50 m x 3.30 m. Soba ima jedan prozor i par ulaznih vrata.

Noseći zid je od keramičke cigle debljine 25 cm, na kojem se nalazi krečni malter debljine 3 cm. Podloga date prostorije se satoji od betona debljine od 8-12 cm, na kojoj se nalazi „košuljica“ (smeša peska, cementa i vode) i kao finalna obrada stavljaju se pločice. Kanistar se postavlja na isti način kao i pri prvom merenju. Prikaz prostorije i postavke kanistra je dat na slici 18.



Slika 18. Prikaz prostorije II sa postavljenim kanistrom (obeleženo crvenom bojom).

Rezultati merenja

- Početak merenja 12.09.2012. u 11:30
- Kraj merenja 14.09.2012 u 12:30

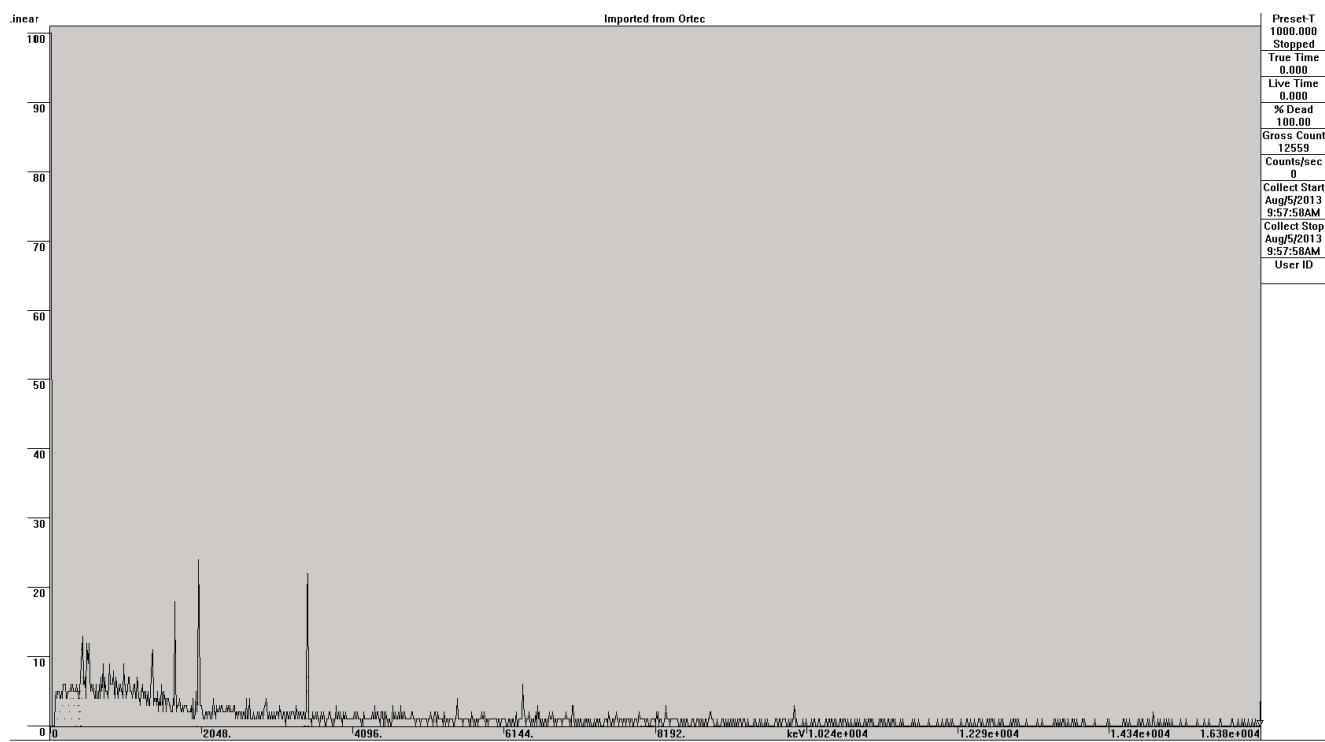
Ukupno vreme trajanja merenja je 49 h. Razvijanje kanistara 14.09.2012 u 14:10 (Mradon 120914).

Vreme trajanja razvijanja je 3000 s

Dobijeni rezultati:

Tabela 5. Spektralni intenziteti pojedinih radonskih linija

E[keV]	I[area]
295	103
351	164
609	123
	$\bar{I} = 130 \text{ C/ks}$



Slika 19. Izgled fonskog spektra- Mradon 120914

Dobijene vrednosti koncentracije aktivnosti radona za I i II prostoriju su dati u tabeli 6.

Tabela 6. Koncentracija aktivnosti radona u zatvorenim prostorijama I i II

	I prostorija	II prostorija
Vreme od 01.12.1990 do merenja $t' [god]$	21,748	21,8
Aktivnost $A [Bq]$	716,14	715,89
Intenzitet linije standarda $I_s \left[\frac{C}{ks} \right]$	17582	17582
Intenzitet linije fona $I_F \left[\frac{C}{ks} \right]$	20,97	20,97
Efikasnost detektora $E \left[\frac{C}{kg Bq} \right]$	24,52	24,53
Vreme od sredine eksponiranja do merenja $t [dan]$	1	1,11
Faktor raspada D_F	0,84	0,82
Masena razlika $\Delta m [g]$	4	1,9
Brzina adsorpcije radona $C_F \left[\frac{m^3}{ks} \right]$	0,0014	0,0016
Vreme ekspozicije $T_s [ks]$	165,6	176,4
Spektralni intenzitet radonskih linija $I \left[\frac{C}{ks} \right]$	432,67	130
Koncentracija radona $C \left[\frac{Bq}{m^3} \right]$	86±39	19±8

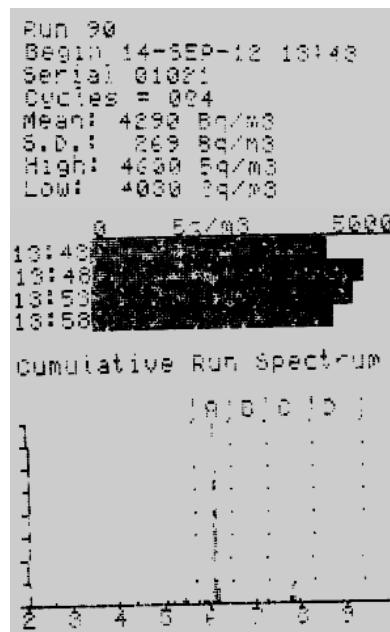
4.1.2.2 Radon u vodi

Radi određivanja koncentracije radona u vodi za piće uzima se i uzorak sa česme na prethodno pomenutoj adresi Njegoševa br 16. Veliki broj faktora utiče na tačnost i preciznost merenja, a među ovim faktorima najveći uticaj ima tehnika uzorkovanja. Tehnika uzorkovanja je često glavni izvor greške koja nastaje prilikom merenja koncentracije radon u vodi. Uzorak vode treba da bude reprezentativan i ne sme da bude u kontaktu sa vazduhom[18]. U ovom radu se koristi tehnika preporučena od strane proizvođača (RAD7 RAD H_2O).

Prilikom uzimanja uzorka vode sa česme, česma se prvo ostavi otvorena da voda iz nje teče 10ak minuta da bi izbegli uzorkovanje ustajale vode u cevima i dobili parametre koji su karakteristični za svežu vodu. Flaša, u koju se sakuplja uzorak, se stavlja direktno ispod slavine, tako da voda koja se toči ne bude u dodiru sa vazduhom (odnosno da u što je mogućoj manjoj meri bude u kontaktu sa vazduhom, jer je praktično nemoguće potpuno eliminisati kontakt), i kada se ona napuni zatvara se takođe pod mlazom vode iz česme, i treba obratiti pažnju da u flaši sa uzorkom ne bude mehurića vazduha [18].

U konkretnom eksperimentu uzorkovanje i merenje je izvršeno istog dana. Pre početka merenja vlažnost vazduha je snižen ispod 10%. Prilikom merenja korišćena je posuda od 250 ml tj. protokol merenja je Wat250. Merenje je vršeno u četiri ciklusa od po 5 min. Rezultat merenja je dat na štampanom isečku (slika 20) [34].

Dobijena srednja vrednost radona u ovom uzorku vode je $(4290 \pm 269) \frac{Bq}{m^3}$.



Slika 20. Deo štampanog isečka dobijeno RAD7 detektorom

4.1.3 Analiza rezultata

Koncentracija aktivnosti radona u zatvorenoj prostoriji dobiljena merenjem za “staru kuću” – prostorija I iznosi $(86 \pm 39) \frac{\text{Bq}}{\text{m}^3}$, dok za prostoriju novije izgradnje- prostorija II njena vrednost je $(19 \pm 8) \frac{\text{Bq}}{\text{m}^3}$. Prema Pravilniku o granicama izlaganja ionizujućim zračenjima (Službeni list SRJ br.32/1998) član 16, interventni nivoi za hronično izlaganje radonu u stanovima jednaki su godišnjoj prosečnoj koncentraciji od 200 Bq/m^3 ^{222}Rn , u vazduhu u novoizgrađenim stanovima, a 400 Bq/m^3 ^{222}Rn , u vazduhu za postojećeg stambenog objekta. [36]

Na osnovu dobijenih podataka može se smatrati da područje gde je vršeno merenje spada u područje sa niskim nivoom prirodne radioaktivnosti, jer nijedna vrednost ne prelazi zakonski predviđen opseg. Iz dobijenih rezultata se može zaključiti da tip podnih obloga i način izgradnje takođe utiče na vrednosti koncentracije aktivnosti ^{222}Rn u zatvorenim prostorijama.

Koncentracija aktivnosti radon u piјaćoj vodi je $(4,3 \pm 0,3) \frac{\text{Bq}}{\text{l}}$ što takođe ne prelazi zakonski određenu graničnu vrednost od $100 \frac{\text{Bq}}{\text{l}}$ [35]. Može se zaključiti da je voda sa česme sigurna za konzumaciju sa ove tačke gledišta.

5 Teorijski model

U ovom radu je predstavljen pojednostavljen model transporta radona u zatvorenoj prostoriji. Cilj je bio da se dobije odgovor koliko pojedini izvori utiču na ukupnu koncentraciju aktivnosti radona u zatvorenoj prostoriji. Radi realizacije ovog modela uzima se u obzir zakon održanja mase.

Modeli bazirani na zakonu održanja mase daju makroskopsku sliku uzimajući u obzir srednju koncentraciju u različitim zonama građevine. Modeli zakona održanja mase su korišćeni da bi simulirali srednju koncentraciju zagađivača vazduha u unutrašnjoj prostoriji u zavisnosti od spoljašnje koncentracije, koncentracije u građevinskom materijalu itd. Ovi modeli razmatraju transport ovih zagađivača između unutrašnje i spoljašnje prostorije kao i između različitih delova građevine.

Modeli su bazirani na sledećem konceptu: -Masa zagađivača u prostoriji u kratkom vremenskom intervalu dt , tokom kojeg se smatra da su parametri konstantni, povećava se za dm kao rezultat dotoka spoljašnjeg vazduha u unutrašnju prostoriju[28]:

$$dm = \text{dotok mase} + \text{unutrašnja produkcija} - \text{gubici}$$

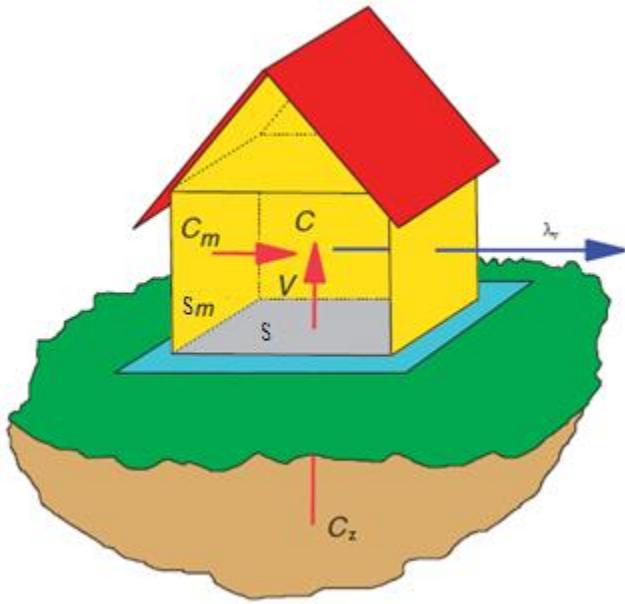
Predstavljajući ovu jednačinu preko koncentracije C , uzimajući da se radi o stacionarnom stanju⁴ gornja postavka se može predstaviti jednom diferencijalnom jednačinom:

$$\frac{dC}{dt} = Q - LC = 0 \quad (5.1)$$

gde je $\frac{dC}{dt}$ brzina promene koncentracije u unutrašnjoj prostoriji, Q je suma svih izvora (emisija, advektivni trasport iz spoljašnje sredine, produkcija itd.), dok je L suma svih gubitaka (transformacija, hemijska reakcija, ventilacija itd.) [28].

Za dati slučaj modela učinjene su neke prepostavke. Uzima se da radon u unutrašnju prostoriju dospeva ekshalacijom iz građevinskih materijala i difuzijom iz zemljišta, da je raspodela koncentracije unutar date prostorije homogena, da je radon inertan i da nestaje samo raspadom i ventilacijom (slika 21). Ostali doprinosi će se zanemariti u ovom modelu.

⁴ Pri uvođenju stacionarnosti podrazumeva se da se prvi izvod koncentracije po vremenu ne menja, tj. brzina promene koncentracije je jednaka nuli.



Slika 21. Prikaz pojedinih doprinosa ukupnoj koncentraciji. C_m -koncentracija radona u materijalu, C -konc. u zatvorenoj prostoriji, C_z -konc.u zemljištu, S_m i S površine zida i poda respektivno, V -zapremina prostorije

Prema tome promena koncentracija aktivnosti radona je data sledećom formulom:

$$\frac{dC}{dt} = \alpha J \frac{S}{V} + \beta E \frac{S_m}{V} - C\lambda - \gamma C\lambda_v \quad (5.2)$$

gde je:

- J - fluks radon iz zemljišta $\left[\frac{Bq}{m^2 s}\right]$
- E -ekshalacija iz građevinskog materijala $\left[\frac{Bq}{m^2 s}\right]$
- S, S_m -površine poda i zida $[m^2]$
- V -zapremina prostorije $[m^3]$
- C -koncentracija radon $\left[\frac{Bq}{m^3}\right]$
- λ -konstanta raspada radona $2,1 \cdot 10^{-6} [s^{-1}]$
- λ_v -jačina ventilacije $[s^{-1}]$
- α, β i γ -deo datog doprinosa

Da bi se odredio udeo pojedinih izvora razmotriće se doprinos po x i po y osi posebno.

Proučavajući sliku 21 vidi se da po x osi glavni doprinos daje ekshalacija iz građevinskih materijala kao i gubici ventilacijom i raspadom, pa se prethodna jednačina može predstaviti, uzimajući u obzir stacionarno stanje, na sledeći način:

$$0 = \alpha E \frac{S_m}{V} - C\lambda - \gamma C\lambda_v \quad (5.3)$$

Po y osi značajan je doprinos difuzije iz zemljišta, dok je u ovom slučaju uzeto da se koncentracija smanjuje jedino raspadom, pa se jednačina (5.2) može predstaviti na sledeći način:

$$0 = \beta J \frac{S}{V} - C\lambda \quad (5.4)$$

Suma svih pomenutih doprinosa treba da bude jednak 100 % iznosu, tj.:

$$\alpha + \beta + \gamma = 1 \quad (5.5)$$

Rešavajući sistem, iz jednačina (5.4) se može dobiti izraz za određivanje doprinosa putem difuzije iz zemljišta:

$$\beta = \frac{C\lambda V}{JS} \quad (5.6)$$

Iz jednačine (5.5) se može izraziti doprinos ekshalacije iz građevinskih materijala:

$$\alpha = 1 - \beta - \gamma \quad (5.7)$$

Uvrštavajući ova dva izraza u jednačinu (5.3) dobijamo deo koji se gubi ventilacijom:

$$\gamma = \frac{\frac{E S_m}{V} (1 - \beta) - C\lambda}{\frac{E S_m}{V} + C\lambda} \quad (5.8)$$

U cilju određivanja ovih udela potrebno je odrediti sve parametre koji figurišu u datim jednačinama. Površina pojedinih zidova i poda kao i zapremina prostorije se veoma lako određuju, međutim ekshalacija iz građevinskih materijala i fluks radona zahteva detaljnije objašnjenje.

5.1 Ekshalacija iz građevinskih materijala

Proces ekshalacija radona iz građevinskih materijala nije potpuno razjašnjen. To se posebno odnosi na građevinske materijale koji nastaju mešanjem puno različitih materijala. Materijali koji su primarni izvori radona među građevinskim matrijalima su beton, cigle i kamenje, jer oni mogu da sadrže značajniju količinu radijuma. Prema tome može se zaključiti da na ekshalaciju pre svega utiče količina radijuma u građevinskom materijalu. Značajan faktor je i poroznost materijala, jer se sa povećanjem poroznosti povećava i mogućnost radona da "pobegne" iz datog materijala i ova osobina je data koeficijentom emanacije η koji predstavlja deo radona (od ukupno proizvedene količine u datom materijalu) koji stigne do površine zida putem difuzije. Ekshalacija iz građevinskih materija se može definisati sledećom formulom [29]:

$$E = \frac{1}{2} A_{Ra} \lambda_{Rn} \rho \eta d \quad (5.9)$$

gde je:

- A_{Ra} -sadržaj ^{226}Ra $\left[\frac{Bq}{kg}\right]$
- λ_{Rn} -konstanta raspada radona $2,1 \cdot 10^{-6} [s^{-1}]$
- ρ -gustina materijala $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$
- η -koeficijent emanacije
- d -debljina materijala [m]

5.2 Difuzija iz zemljišta

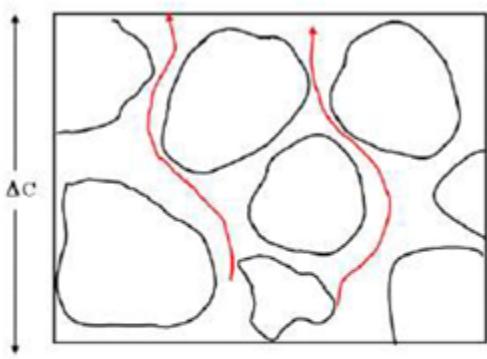
Da bi odredili koliko doprinosi difuzija iz zemljišta potrebno je odrediti fluks radona. Difuzija radona je rezultat kretanja atoma radona niz gradijent koncentracije [23,9]. Ovakav način difuzije opisuje Fikov zakon, koji povezuje gradijent koncentracije sa fluksom radona:

$$J = -D \frac{\partial C}{\partial y} \quad (5.10)$$

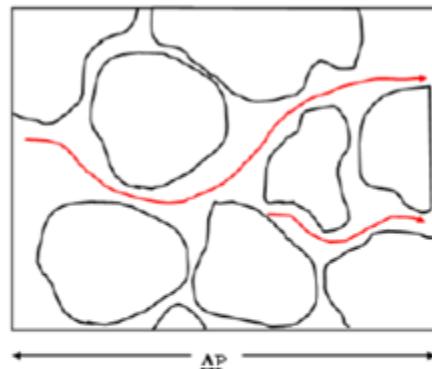
- J -fluks radona izražen u $\left[\frac{Bq}{m^2 s}\right]$
- D -koeficijent difuzije u $\left[\frac{m^2}{s}\right]$
- $\frac{\partial C}{\partial y}$ -gradijent koncentracije duž pravca y ose u $\left[\frac{Bq}{m^4}\right]$

Ova jednačina uzima u obzir pre svega produkciju radona, ali i činjenicu da se radon raspada tokom merenja kao i tokom difuzionog procesa. Negativan znak ispred difuzionog koeficijenta označava da se difuzija vrši u pravcu smanjenja koncentracije. Koeficijent difuzije veoma zavisi od sredine u kojoj se odvija posmatrani transport. Neki autori razlikuju dve vrste difuzione konstante, tj. uzimaju jednu konstantu za čvrst materijal i drugu konstantu koju definišu kao efektivan koeficijent difuzije. Ova dva koeficijenta su povezana poroznošću zemljišta. U daljem radu će se razmatrati samo efektivan koeficijent difuzije. [23]

Pored procesa transporta radona difuzijom postoji i proces transporta putem advekcije. Ona nastaje usled protoka vazduha kroz porozni material, koji u sebi sadrži radon. Ovaj process, kao što je već i rečeno, nastaje zbog razlike pritisaka i smatra se da je glavni razlog cirkulacije radona u zemljištu ispod građevinskih objekata. U ovom pojedostavljenom modelu proces advekcije će biti zanemaren [23, 9].



Slika 22. Transport radona usled procesa difuzije. Pomeranje radonase vrši uz pravac smanjenja koncentracije



Slika 23. Transport radona kroz materijal procesom advekcije, gde se protok vrši u pravcu smanjenja pritisaka.

5.2.1 Granični uslovi

Da bi se odredio fluks neophodno je najpre znati granične uslove. Pretpostaviće se da je raspodela u zemljištu uniformna pa se razmatra jednodimenzionalni slučaj duž y ose, uzimajući da je početak na površini zemljišta i da se vrednosti povećavaju nadole. Koncentracija aktivnosti radona na površini zemljišta je C_0 , a na većim dubinama teži ka nekoj maksimalnoj konstantnoj vrednosti C_{max} , što se može predstaviti na sledeći način [23]:

1. $C \rightarrow C_0 \quad \text{kada} \quad y \rightarrow 0$
2. $C \rightarrow C_{max} \quad \text{kada} \quad y \rightarrow \infty$

Jednačina difuzije opisuje promenu koncentracije radona sa vremenom, međutim u ovom sistemu se razmatra stacionarno stanje, prema tome uzima se:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = 0 \quad (5.11)$$

Jednodimenzionalna difuziona jednačina koja odgovara preporučenom modelu je data kao:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} - \lambda C + Q \quad (5.12)$$

Primenjujući uslov stacionarnosti dobija se:

$$D \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} - \lambda C + Q = 0 \quad (5.13)$$

$$\frac{d^2 C}{dy^2} - \frac{\lambda}{D} C = -\frac{Q}{D} \quad (5.14)$$

Rešenje ove jednačine se dobija kao suma homogenog i partikularnog dela jednačine:

$$C = k_1 e^{\sqrt{\frac{\lambda}{D}}y} + k_2 e^{-\sqrt{\frac{\lambda}{D}}y} + k_3 \quad (5.15)$$

Konstanta k_3 se dobija partikularnim rešenjem:

$$k_3 = \frac{Q}{\lambda} \quad (5.16)$$

Kada se to uvrsti u jednačinu (5.15) dobija se sledeći izraz:

$$C = k_1 e^{\sqrt{\frac{\lambda}{D}}y} + k_2 e^{-\sqrt{\frac{\lambda}{D}}y} + \frac{Q}{\lambda} \quad (5.17)$$

Uzimajući u obzir drugi granični uslov vidi se da se mora uzeti da je $k_1 = 0$ pa jednačina postaje:

$$C = k_2 e^{-\sqrt{\frac{\lambda}{D}}y} + \frac{Q}{\lambda} \quad (5.18)$$

Kako $y \rightarrow \infty$ prvi deo jednačine (5.18) teži nuli prema tome dolazimo do sledećeg rešenja:

$$C_{max} = \frac{Q}{\lambda} \quad (5.19)$$

Vrednost C_{max} će prema tome biti konstanan na većim dubinama, što je i logično jer sa velikih dubina radon ne može da „pobegne“ iz zemljišta pa će ^{222}Rn i ^{226}Ra biti u ravnoteži. Član Q predstavlja brzinu produkcije radona gde je uzet u obzir i emanacija radona iz zemljišta kao i poroznost zemljišta:

$$Q = \frac{\eta_z \rho_z \lambda A_{Ra}(1-\varepsilon)}{\varepsilon} \quad (5.20)$$

- η_z -koeficijent emanacije radona iz zemljišta
- ρ_z -specifična gustina zemljišta u $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$
- λ -konstanta raspada radona ($2.1 \times 10^{-6}s^{-1}$)
- A_{Ra} -sadržaj radijuma [$\frac{Bq}{kg}$]
- ε -poroznost zemljišta

Ako se sada primeni prvi granični uslov ($C \rightarrow C_0$ kada $y \rightarrow 0$):

$$C_0 = k_2 + \frac{Q}{\lambda} \quad (5.21)$$

$$k_2 = C_0 - \frac{Q}{\lambda} \quad (5.22)$$

Uvrštavajući dobijene konstante u jednačinu (5.17) dobija se sledeći izraz:

$$C = (C_0 - \frac{Q}{\lambda}) e^{-\sqrt{\frac{\lambda}{D}}y} + \frac{Q}{\lambda} \quad (5.23)$$

I dobija se konačan izraz za koncentraciju:

$$C = \frac{Q}{\lambda} (1 - e^{-\sqrt{\frac{\lambda}{D}}y}) + C_0 e^{-\sqrt{\frac{\lambda}{D}}y} \quad (5.24)$$

Po jednačini (5.10) dobija se da je fluks:

$$J = -D \frac{\partial}{\partial y} (\frac{Q}{\lambda} (1 - e^{-\sqrt{\frac{\lambda}{D}}y}) + C_0 e^{-\sqrt{\frac{\lambda}{D}}y}) \quad (5.25)$$

$$J = -D \sqrt{\frac{\lambda}{D}} e^{-\sqrt{\frac{\lambda}{D}}y} (\frac{Q}{\lambda} - C_0) \quad (5.26)$$

5.3 Određivanje doprinosa pojedinih izvora

Radi određivanja doprinosa pojedinih izvora ukupnoj koncentraciji aktivnosti radona u zatvorenoj prostoriji dati model se primenjuje na I prostoriju, zbog jednostavnosti računa. Naime, jedini materijal koji se pojavljuje u izgradnji ove prostorije a da igra ulogu pri razmatranju koncentracije radona je zemlja. Pojedine vrednosti, neophodni za određivanje ovih doprinosa, dati su u tabeli 7.

Tabela 7. Karakteristike datog materijala i parametri neophodni za račun

Materijal	Zemlja	Reference
Koeficijent emanacije η_z	0.24	[31]
Koeficijent difuzije $D \left[\frac{m^2}{s} \right]$	$(3.0 \pm 1.3) \cdot 10^{-6}$	[31]
Poroznost ε	0.58	[39]
Sadržaj radijuma $A_{Ra} \left[\frac{Bq}{kg} \right]$	39 ± 7	[38]
Gustina matrijala $\rho \left[\frac{kg}{m^3} \right]$	1100	[39]
Dubina $d' [m]$	0.70	
Debljina $d [m]$	0.53	-
Brzinu produkcije radona $Q \left[\frac{Bq}{m^2 s} \right]$	$15.66 \cdot 10^{-3}$	-
Ekshalacija $E \left[\frac{Bq}{m^2 s} \right]$	$5.73 \cdot 10^{-3}$	-
Fluks $J \left[\frac{Bq}{m^2 s} \right]$	$-10.3 \cdot 10^{-3}$	-

Iz tabele 7 se vidi da je uzeta dubina $d' = 70 \text{ cm}$ radi određivanja fluksa. Data vrednost je uzeta, jer su uзорци, prikupljeni iz zemljišta prilikom radiološkog mapiranja Vojvodine, uzeti sa te dubine. Itraživanjima je dokazano, da se koncentracija radona povećava sa povećanjem dubine, međutim ustanovljeno je da to povećanje ima neobičan trend. Koncentracija radona se povećava do dubine od 80 cm, pa je njena vrednost skoro konstantna u intervalu od 80-130 cm, kada se opet povećava. [41]. Za početnu koncentraciju unutar zatvorene prostorije C_0 uzeta je vrednost koncentracije koja je određena eksperimentalnim putem u ovom radu, tj: $C_0 = C = (86 \pm 39) \frac{Bq}{m^3}$.

Kao što je gore navedeno dimenzije I prostorije su: 5 m x 4.40 m x 2.50 m. Debljina zidova je 53 cm. Dimenzije ulaznih vrata su: 0.9 m x 1.9 m, dok su dimenzije prozora 1.4 m x 1.6 m i 0.7 m x 1 m. Površina zidova sa kojih se vrši ekshalacija se može odrediti tako, što se od ukupne površine oduzme površina prozora S_p i ulaznih vrata S_v : $S_m = S_u - S_p - S_v$.

Tabela 8. Karakteristike prostorije

	I Prostorija
Zapremina $V[m^3]$	55
Površina poda $S[m^2]$	22
Površina zidova $S_m[m^2]$	42.35

Da bi model bio što relaniji mora da se uzme u obzir i ventilacija. Današnja preporuka je 0.5 izmena vazduh/h, tj. barem jedna izmena vazduha u svakih pola sata [40].

Kako su sada svi parametri određeni može se odrediti pojedini doprinos datim izvoru, tj. mogu da se odrede koeficijenti α, β i γ . Računski dobijene vrednosti ovih koeficijenata pomoću jednačina (5.6-5.8) su sledeći::

- Doprinos ekshalacijom radon iz građevinskog materijala:

$$\alpha = 0.71 = 71\% \quad (5.27)$$

- Doprinos difuzijom radon iz zemljišta:

$$\beta = 0.044 = 4.4\% \quad (5.28)$$

- Gubici ventilacijom:

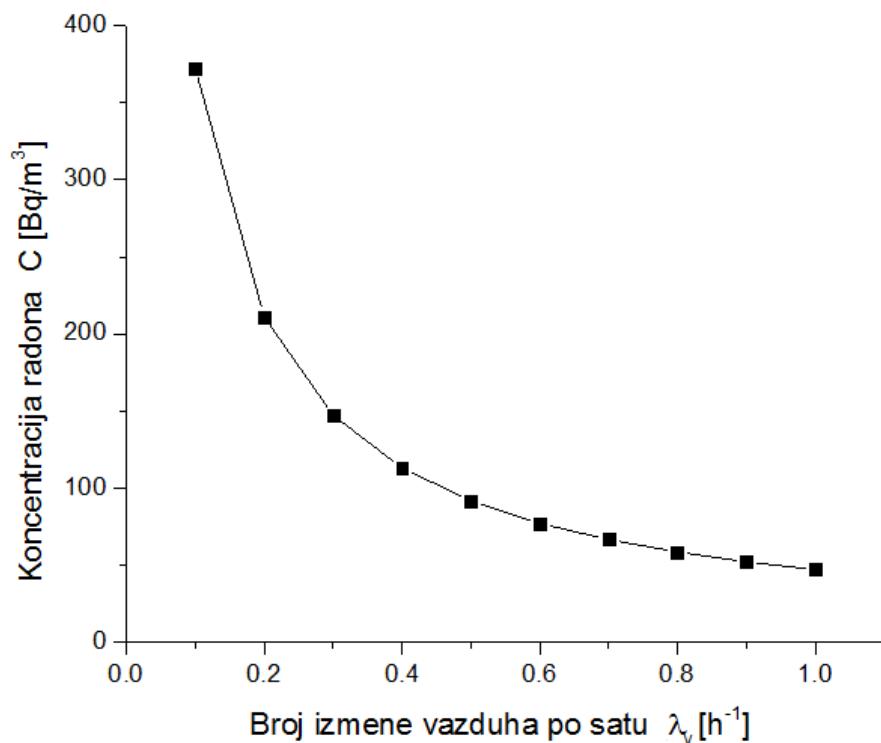
$$\gamma = 0.245 = 24.5\% \quad (5.29)$$

Dobijene vrednosti su iznenađujući. Očekivano je da će najveći doprinos dati djifuzija iz zemljišta, međutim ako se uzme u obzir da su i zidovi napravljeni od zemlje, tj. sadržaj radijuma će biti isti, i još i činjenicu da je površina sa koje se ekshalira radon mnogo veća (veća je površina zidova od površine poda), dati rezultat je prihvatljiv.

Koristeći jednačinu (5.2), razmatrajući stacionarno stanje, dobija se sledeći izraz za koncentraciju aktivnosti radona u zatvorenoj prostoriji:

$$C = \frac{\alpha E \frac{S_m}{V} + \beta J \frac{S}{V}}{\gamma \lambda_v + \lambda} \quad (5.30)$$

Pomoću date jednačine (5.30) može se za ovaj slučaj odrediti kako se menja koncentracija aktivnosti radona u zatvorenoj prostoriji u zavisnosti od ventilacije (slika 24).



Slika 24. Zavisnost koncentracije aktivnosti radona u zatvorenoj prostoriji od broja izmene vazduha po času.

Po dobijenom grafiku se jasno vidi da se koncentracija radona smanjuje u zatvorenoj prostoriji sa povećanjem broja izmene vazduha po času, što je i očekivan rezultat.

6 Zaključak

U ovom radu razmatrani su doprinosi pojedinih izvora koji utiču na koncentraciju aktivnosti radona u zatvorenoj prostoriji, pored toga je predstavljen jednostavan model pomoću kojeg se određuje udeo pojedinih faktora. Predmet istraživanja bile su dve prostorije, koje se nalaze na istoj adresi na relativno maloj udaljenosti jedna od druge, ali su veoma različite i po starosti objekta i po materijalima koji su korišćeni prilikom izgradnje. Izmerena je koncentracija aktivnosti radona u ovim prostorijama pasivnim metodom ugljenih kanistera i dobiljeni su sledeći rezultati: Za prvu prostoriju, koja se nalazi u "staroj kući" i za čiju izgradnju su se koristili jedino zemlja i drvo, kod kojeg je na zemljani temelj stavljen brodski pod (veoma oronuo tokom vremena), dobijena koncentracija aktivnosti radona iznosi $(86 \pm 39) \frac{Bq}{m^3}$. U drugoj prostoriji, koja je kao što je već i navedeno savremenije izgradnje, korišćeni su savremeni građevinski materijali (keramička cigla, krečni malter, podloga je od betona a kao finalna obrada se stavljaju pločice) dobijena vrednost koncentracije aktivnosti radona iznosi $(19 \pm 8) \frac{Bq}{m^3}$. Pored datih prostorija izmerena je koncentracija radona i u vodi za piće koja se koristi u ovom domaćinstvu, a dobiljeni rezultat je $(4,3 \pm 0,3) \frac{Bq}{l}$. Svi dobijeni rezultati su u granicama zakonski propisanih vrednosti, čime se zaključuje da su objekti "bezbedni za život" sa ove tačke gledišta. Radi jednostavnijeg računa model je primenjen na I prostoriju jer u ovoj prostoriji postoji veća mogućnost da se pojavi radon u značajnjim koncentracijama u vazduhu (na primer, ukoliko se neko vreme ne bi provetrala). Razmatran je doprinos ekshalacijom radona iz građevinskih materijala, doprinos difuzijom radona iz zemljišta kao i gubici ventilacijom. Određeni su udeli pojedinih doprinsa i dobijeni su sledeći rezultati: doprinos ekshalacijom radona iz građevinskog materijala je oko 71 %, doprinos difuzijom radon iz zemljišta je oko 4,4% i gubici ventilacijom su oko 24,5%. Doprinos građevinskog materijala je iznenađujuć u ovom slučaju, ali je i ekshalirajuća površina mnogo veća od površine poda. Treba takođe naglasiti da se u slučaju kada se razmatra difuzija sa veće dubine dobija značajniji doprinos putem difuzije. U konkretnom slučaju je predpostavljeno da je dubina 70 cm.

Predstavljeni model se može proširiti uzimajući u obzir sve doprinose koji postoje, međutim za takav model bi se trebao odrediti veoma veliki proj parametara, pa se dobijeni rezultati mogu iskoristiti kao polazna osnova budućim istraživanjima.

7 Literatura

- [1] *Radon in the enviroment*, M. Wilkening, New Mexico Institute of Mining and Tehnology, Socorro, 1990
- [2] *Osnovi nuklearne fizike*, Dr Lazar Marinkov, Novi sad 1976
- [3] *Udžbenik Nuklearne Hemije*, Šćepan S. Miljanić, Univerzitet u Beogradu,Fakultet za fizičku hemiju, Beograd 2008
- [4] *Radon: Prevalence, mesurments, health risk and control*, Niren L. Nagda, Philadelohia, 1998
- [5] *Radon in indoor air*, Report No 15, F.Bochicchio, J.P.McLaughling, S.Piermattel, Luxemburg 1995
- [6] *Radon indoor concentrations and activity of radionucleides in building materials in Serbia*, D.Popović, D.Todorović, University of Belgrade, 2005
- [7] *Fizički parametri radne i životne sredine*, Prof.dr Dragan Cvetković
- [8] *Radiation oncology physics: A handbook for teachers and students*, International Atomic Energy Agency, Vienna 2005
- [9] *Merenje koeficijenta difuzije radona kroz građevinske materijale*, Aleksandar Radukin Kosanović, diplomski rad
- [10] *Simulation of thoron and progeny concentrations in the indoor environment*, Journal of Building Physics, 2011
- [11] *Radon indoor concentrations and activity of radionucleides in building materials in Serbia*, D. Popović, D. Todorović, Department of Physics and Biophysics, Faculty of Veterinary Medicine, University of Belgrade, 2005
- [12] Diplomski rad, Merenje Radona
- [13] *Radon migration trough soil and into indoor environments*, enclosure 1:Project description of the project entitled
- [14] *Doses from radon progeny as a source of external beta and gamma radiation*, V. M. Marković, D. Krstić, D. Nikezić, Department of Physics, Faculty of Science, Unyversity of Kragujevac, 2012
- [15] *Simulation of Radon Transport trough Building Materials: Influence of the Water Content on Radon Exhalation Rate*, F.Fournier, J.E.Groetz, F.Jacob, J.M. Crolet, H.Lettner,University of Salzburg, University of Franche-Comte, 2005
- [16] *Natural Radioactivity and Radon in Building Materials*, Gustav Haquin, Sorq Nuclear Research Centre, Radiation Safety Division, Yavne, Israel
- [17] *Natural radioactivity and radon exhalation in building materials used in Italian dwellings*, Serena Righi, Luigi Bruzzi, University of Bologna, Ravenna, Italy, 2006
- [18] *Public exposure to radon in drinking water in SERBIA*, Nataša Todorović, Jovana Nikolov, Sofija Forkapić, Ištvan Bikit, Dušan Mrđa, Miodrag Krmar, Department of Physics, Faculty of Science, University of Novi Sad, Serbia 2010

-
- [19] *Exposure to radon in the spa Niška Banja*, Serbia, J. Nikolov, N.Todorović, T.Petrović Panić, S.Forkapić, D.Mrđa, I.Bikit, M.Krmar, M.Vesković, University of Novi Sad, Faculty of Science, Department of Physics, Geological Institute of Serbia, Belgrade, Serbia, 2012
 - [20] Italian cirkonium
 - [21] *Simulacija procesa merenja radona kao radioaktivnog elementa*, Vlade Urošević , Dragoslav Nikezić
 - [22] *Simulacija skim off metoda pri merenju radona*, V. Urošević, D. Nikezić
 - [23] *Modelling and measurement of radon diffusion trough soil for application on mine tailings dams*, Wilcot John Speelman, Thesis for the degree of Magister Scientiae, Faculty of Natural Sciences, University of the Western Cape, 2004
 - [24] *Doprinos rasejanja neutron niskoenergetskom delu fonskog g-spektra*, Diplomski rad, Aleksandar Gostojić, Prirodno Matematički Fakultet, Novi Sad, 2010
 - [25] *Optimizacija metoda merenja koncentracije radona u vazduhu*, Sofija Forkapić, Dušan Mrđa, Ištvan Bikit, Miroslav Vesović, Jaroslav Slivka, Nataša Todorović, Departman za fiziku, PMF, Univerzitet u Novom Sadu
 - [26] *High purity germanium detector in gamma-ray spectrometry*, Mayeen Uddin Khandaker, Department of Physics, University of Malaya, Kuala Lumpur 50603, Malaysia 2011
 - [27] *U.S. Environmental Protection Agency. National Residential Radon Survey: Summary Report*. EPA-402-R-92-004.1992
 - [28] *J.T. Milner, C. Dimitroulopoulou, H.M. ApSimon: Indoor concentrations in buildings from sources outdoors*, ADMCLC/2004/2 This study was funded by the UK Atmospheric Dispersion Modelling Liaison Committee.
 - [29] *Radon concentration in indoor environments covered with Brazilian granites*, Roberto Meigikos dos Anjosa, Jimena Juri Ayuba,b, Alberto Silva Cida, Renan, Pereira Cardoso, Thiago Corrêa Lacerda, XXXIV edition of the Brazilian Workshop on Nuclear Physics,Foz de Iguaçu, Parana state, Brasil 5-10 June 2011
 - [30] Web.ead.anl.gov/resrad/datacoll/radon.htm.-Effective radon diffusion coefficient
 - [31] *Radon generation, entry and accumulation indoors*, PhD thesis , Lluis Font Guiteras, Universitat Autonoma de Barcelona
 - [32] *Radon indoor concentrations and activity of radionuclides in building materials in Serbia*, D. Popović₁, D. Todorović₂, Environmental and Radiation Protection Laboratory, Institute Of Nuclear Sciences, Vinča, P.O.Box 522, 11001 Belgrade, Serbia & Montenegro, 2005
 - [33] *RAD H2O User Manual Radon in Water Accessory*, DURRIDGE Company Inc.524 Boston Rd, 2012
 - [34] *Commission recommendation of 20 December 2001 on the protection of the public against exposure to radon in drinking water supplies*, Margot WALLSTRÖM, (2001/928/Euratom)
 - [35] *Analiza uticaja faktora na koncentraciju aktivnosti radona u zatvorenim prostorijama*, Nataša TODOROVIĆ, Sofija FORKAPIĆ, Jasna PAPUGA, Ištvan BIKIT, Jaroslav SLIVKA, Departman za fiziku, Prirodno-matematički fakultet, Novi Sad, Srbija
 - [36] *Radon measurements in Novi Sad*, I .Bikit, Lj. Čonkić, S. Ćurčić, M.Vesković, M. Krmar, J. Slivka, N. Žikić-Todorović
 - [37] *Merenje radona*, S.Forkapić, I.Bikit, Lj.Čonkić, M.Vesković, J.Slivka, M.Krmar, Departman za fiziku, Prirodno-matematički fakultet, Univerzitet u Novom Sadu,
 - [38] *Zemljiste*, Milena Mitrović
-

-
- [39] *Development of a model for radon concentration in indoor air*, Bjørn Petter Jelle , Department of Materials and Structures, SINTEF Building and Infrastructure, NO-7465 Trondheim, Norway
 - [40] *Radon measurement protocol for residences with different ventilation rates*, Indoor and built environment, Thomas C. Tung, J. Burnett, 2004
 - [41] *Experimental and theoretical studz of radon distribution in soil*, M. Antonopoulos-Domis,* S. Xanthos,* A. Clouvas,* and D. Alifrangis



Kristina Fodor je rođena u Novom Sadu 29.04.1986. godine. Završila je osnovnu školu „Jovan Jovanović Zmaj” u Srbobranu i gimnaziju „Gimnazija Bečeј” u Bečeju. Po završetku gimnazije, 2005. godine upisuje Prirodno-matematički fakultet u Novom Sadu, odsek fizika, smer diplomirani fizičar. Diplomske-master studije na matičnom fakultetu, modul-fizičar istraživač, nuklearna fizika, upisala je 2011. godine.

UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

Redni broj:

RBR

Identifikacioni broj:

IBR

Tip dokumentacije: Monografska dokumentacija

TD

Tip zapisa: Tekstualni štampani materijal

TZ

Vrsta rada: Master rad

VR

Autor: Kristina Fodor

AU

Mentor: dr Nataša Todorović, docent

MN

Naslov rada: Faktori koji utiču na koncentraciju ^{222}Rn u zatvorenim prostorijama

NR

Jezik publikacije: srpski (latinica)

JP

Jezik izvoda: srpski/engleski

JL

Zemlja publikovanja: Srbija

ZP

<i>Uže geografsko područje:</i>	Vojvodina
UGP	
<i>Godina:</i>	2013
GO	
<i>Izdavač:</i>	Autorski reprint
IZ	
<i>Mesto i adresa:</i>	Prirodno-matematički fakultet, Trg Dositeja Obradovića 4, Novi Sad
MA	
<i>Fizički opis rada:</i>	7 poglavlja/67 strana/41 literalnih citata/ 8 tabela/ 24 slika/ 1 grafik
FO	
<i>Naučna oblast:</i>	Fizika
NO	
<i>Naučna disciplina:</i>	Nuklearna fizika
<i>Predmetna odrednica/ ključne reči:</i>	Radon, izvori radona, koncentracija radona u zatvorenim prostorijama
PO	
UDK	
<i>Čuva se:</i>	Biblioteka departmana za fiziku, PMF-a u Novom Sadu
ČU	
<i>Važna napomena:</i>	nema
VN	
<i>Izvod:</i>	Ciljovog rada je da se prikaže koji svi faktori utiču na koncentraciju aktivnosti radona u zatvorenim prostorijama. U ovom radu razmatrani su doprinosi pojedinih izvora koji utiču na koncentraciju aktivnosti radona u zatvorenoj prostoriji, pored toga je predstavljen jednostavan model pomoću kojeg se određuje udio pojedinih faktora. Predmet istraživanja bile su dve prostorije, koje se nalaze na istoj adresi na relativno maloj udaljenosti jedna od druge, ali su veoma različite i po starosti objekta i po materijalima koji su korišćeni prilikom izgradnje. Svi dobijeni rezultati su u granicama zakonski propisanih vrednosti, čime se zaključuje da su objekti "bezbedni za život" sa ove tačke gledišta Razmatran je doprinos ekshalacijom radona iz građevinskih materijala, doprinos difuzijom radona

iz zemljišta kao i gubici ventilacijom i dat je model za određivanje udela ovih doprinosova.

Datum prihvatanja teme od NN veća:

DP

Datum odbrane:

30.08.2013

DO

Članovi komisije:

KO

Predsednik: dr Jovan Šetrajčić, redovni profesor

član: dr Ištvan Bikit, redovni profesor

član: Dr Nataša Todorović, docent

UNIVERSITY OF NOVI SAD
FACULTY OF SCIENCE AND MATHEMATICS

KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number:

ANO

Identification number:

INO

Document type: Monograph publication

DT

Type of record: Textual printed material

TR

Content code: MSc paper

CC

Author: Kristina Fodor

AU

Mentor/comentor: Ph.D. Nataša Todorović, docent

MN

Title: Influence of different factors on indoor radon concentration

TI

Language of text: Serbian (Latin)

LT

Language of abstract: English

LA

Country of publication: Serbia

CP

Locality of publication: Vojvodina

LP

Publication year: 2013

PY

Publisher: Author's reprint

PU

Publication place: Faculty of Science and Mathematics, Trg Dositeja Obradovića 4, Novi Sad

PP

7 chapters/ 67 pages/ 41 literature/ 8 tables/ 24 pictures/ 1 graph

Scientific field: Physics

SF

Scientific discipline: Nuclear physics

SD

Subject/ Key words: Radon, sources of radon, radon indoor concentration

SKW**UC**

Holding data: Library of Department of Physics, Trg Dositeja Obradovića 4

HD

Note: none

N

Abstract: The aim of this paper is to show all the factors affecting the activity

concentration of indoor radon. The paper considers the contribution of individual sources that affect the activity concentration of indoor radon, and presents a simple mathematical model for determining the share of individual factors. The subject of the research were two rooms, which are located at the same address at a relatively short distance one from another, but they are very different considering the age of the buildings and the materials used in construction. All the results are within the legally prescribed value, which concludes that the buildings are "safe for life" from this point of view. The presented model considers the contribution

from the building material, the contribution by diffusion and the losses by ventilation.

Accepted by the Scientific Board:

ASB

Defended on: 30.08.2013.

DE

Thesis defend board:

DB

President: Ph.D. Jovan Šetrajčić, full prof.

Member: Ph.D. Ištvan Bikit, full prof.,

Member: Ph.D. Nataša Todorović, docent