

UNIVERZITET U PRIŠTINI
PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET

GORDANA MILI

DISTRIBUCIJA RADONA U VAZDUHU
ZATVORENOG PROSTORA U NEKIM REGIONIMA
KOSOVA I METOHIJE

DOKTORSKA DISERTACIJA

Kosovska Mitrovica
2003

SADRŽAJ

	UVOD.....	1
1.	O radonu uošte	8
1.1	Poreklo radona	8
1.2	Fizičke i hemijske osobine radona	11
1.3	Potomci radona	12
1.4	Dometa alfa čestica i uzmaca nukleusa	12
1.5	Izvori radona	13
1.6	Radioaktivnost zemlje	17
1.7	Emanacija radona i njegova koncentracija	19
1.8	Koncentracija radona na različitim dubinama zemlje	25
1.9	Radon u podzemnoj vodi	29
1.10	Transport radona	32
2.	Radon i njegovi produkti raspada u atmosferskom vazduhu	37
2.1	Promenljivost koncentracije emanacija u atmosferskom vazduhu ...	38
3.	Radon u zgradama	40
3.1	Lognormalna raspodela radona u zgradama	40
3.2	Nivoi koncentracije aktivnosti radona i potomaka	41
3.3	Građevinski materijali kao izvori radona	44
3.4	Radon iz vode za domaćinstva	46
3.5	Zemlja i stenovito tlo ispod zgrada kao glavni izvori radona	47
3.6	Distribucija radona unutar kuće	48
3.7	Kratkovremene promene nivoa koncentracije radona u kući	49
3.8	Opšta istraživanja u svetu o radonu u zgradama	49
4.	Metode merenja konsentracije radona	54
4.1	Tehnike merenja radona	54
4.2	Pasivna tehnika	56
4.3	Čvrsti detektori tragova nuklearnih čestica	57
4.4	Odziv dozimetara na radon (detekciona moć dozimetra za radon) .	58
5.	Rezultati istraživanja	60
5.1	Metoda merenja	62
5.2	Rezultati merenja i diskusija	64
5.2.1	Koncentracija aktivnosti radona u rudnicima Trepče	64
5.2.2	Distribucija radona u stambenim objektima	66
	Brezovica i okolina	66
	Priština i okolina	69
	Gornja Stubla	75
	Kosovsko Pomoravlje	80
6.	Zaključak	82
7.	Literatura.....	86

UVOD

Predmet istraživanja disertacije je distribucija radona u stambenom i radnom prostoru u nekim regionima na teritoriji Kosova i Metohije. Istraživanja su obavljena u rudnicima Trep e sa jamskom eksploatacijom i u zgradama integralnom metodom, primenom vrstih detektora tragova alfa estica iz raspada radona $^{222}\text{Rn}_{86}$.

etiri prirodna izotopa radona ^{222}Rn , ^{218}Rn , ^{219}Rn i ^{220}Rn su potomci produkata raspada u uranovom ^{238}U , ^{235}U i torijumovom ^{232}Th nizu. Kao što je dobro poznato, uran (^{238}U , ^{235}U) i torijum (^{232}Th) raspadaju se kroz serije sa širokim spektrom produkata potomaka, koji su svi u vrstom stanju izuzev gasovitih izotopa radona. Uran i torijum sa svojim dezintegracionim produktima i radioaktivni izotop kalijuma, ^{40}K , ubrajaju se u daleko najve i deo prirodnog jonizuju eg zra enja u ovekovoj okolini.

Radonovi izotopi kao gasovi mogu da se kre u daleko od svojih izvornih predaka, kroz prirodnu migraciju ili nošeni konvekcionim strujama fluida u zemljinoj kori. Izotop ^{219}Rn je bezna ajan zbog male koli ine ^{235}U , dok su izotopi ^{218}Rn i ^{220}Rn od manje važnosti zbog svog kratkog vremena poluraspada (0.035 ms i 55 s respektivno). Zbog najdužeg vremena života najve u važnost od etiri prirodna izotopa ima ^{222}Rn i pojam radon odnosi e se na ovaj izotop.

Izotop urana ^{238}U prisutan je svuda u zemlji, naj eš e u malim koncentracijama. Zbog toga njegov potomak radon se široko distribuira u stenama, u zemnom gasu, a odatle u atmosferski vazduh. Tehnikom merenja radona u zemnom gasu mogu da se dobiju brojne informacije u pogledu geoloških karakteristika ispod površine zemlje i prisustvu minerala, nafte i rezervi gasa. Važnost radona kod istraživanja minerala naslanja se na tri odlike: radioaktivnost, njegovu vezu sa uranom i inertnost. Zato što je radioaktivan može da se meri njegova koncentracija aktivnosti, što je zna ajno kod istraživanja ruda urana. Inertost uslovljava mobilnost unutar zemljine kore do ve ih rastojanja, tako da može da bude od velike pomo i u dobijanju korisnih informacija o postojanju mineralizacije urana, kao i o podzemnim fizi kim procesima. Ako merenja aktivnosti radona pokažu anomalno visoku vrednost, razlog je prisustvo mineralizacije urana [1, 2, 3]. Anomalno male vrednosti su preko nalazišta nafte i gasa. Rezerve nafte i gasa su svakako pokrivene nepropusnim stenama koje spre avaju normalno strujanje gasa. Merenjem aktivnosti radona u zemnom gasu i podzemnoj vodi mogu da se identifikuju razli ite pukotine i geotermalni izvori koji leže duboko ispod zemljine površine. Prisustvo geoloških pukotina omogu ava kretanje radonu i samim tim njegovu visoku emisiju do zemljine površine.

U atmosferski vazduh dospeva sa fluktuacijama koje su uslovljene geofizičkim stanjem tla i meteorološkim uslovima. Radon daje najveći i najpromenljiviji doprinos radijacionoj dozi zračenja. Iz tih razloga je prednost integralnih metoda merenja nad ostalim koje mere trenutne vrednosti. To, međutim, može biti i njihov nedostatak ako su iz zdravstvenih razloga neophodna trenutna merenja.

Inače, kod određivanja doza zračenja u životnom prostoru ovekako potrebne su godišnje prosečne vrednosti koncentracije aktivnosti radona i njegovih potomaka. Na koncentraciju radona u zatvorenom prostoru utiču još i građevinski materijali.

Do kraja 1970-ih godina doze zračenja stanovništva od prirodnih izvora nisu razmatrane kao značajan fenomen, a prosečna godišnja doza bila je procenjena na 1 mSv. Situacija se menja kada je 1970-ih i 1980-ih godina otkriveno da neke kuće u brojnim zemljama imaju visoke nivoe koncentracije radona, od nekoliko stotina i nekoliko hiljada Bq m⁻³. Slede brojna istraživanja, nacionalna i regionalna, u mnogim zemljama Evrope, Severnoj Americi, Japanu i Australiji. Na osnovu tih rezultata određeno je da je doza zračenja od radona oko 1 mSv za godinu, kolika je i od svih drugih prirodnih izvora. To je zahtevalo sredinom 1980-ih godina promenu u razumevanju značaja uticaja radona na zdravlje ljudi u životnom prostoru. Na osnovu podataka od epidemioloških studija o zračenjima u rudnicima, eksperimentima na životinjama i drugim relevantnim eksperimentima, radon je klasifikovan u kancerogene supstance I klase. Epidemiološke studije izvide moguće procene rizika stanovništva od izloženosti radonu u svojim domovima. Smatra se da je posle pušenja drugi najveći uzrok kancera pluća [4, 5, 6, 7]

Kako je radon najveći uzrok zračenja u ovekovoj okolini u neakcidentalnim situacijama, merenje koncentracije radona u stambenom i radnom prostoru značajno je za određivanje prosečnih vrednosti izloženosti radonu i za identifikaciju lokacija sa povećanim zračenjem.

1 POREKLO, OSOBINE I TRANSPORT RADONA

1.1. Poreklo radona

Atomski broj radona (Rn) je 86. Prirodni izotopi su: $^{222}\text{Rn}_{86}$ (radon), $^{218}\text{Rn}_{86}$, $^{219}\text{Rn}_{86}$ (aktinon) i $^{220}\text{Rn}_{86}$ (toron). Svi su članovi prirodno radioaktivnih nizova koji počinju sa $^{238}\text{U}_{92}$, $^{235}\text{U}_{92}$ i $^{232}\text{Th}_{90}$, i izuzev ^{218}Rn direktni potomci izotopa radijuma. Serije raspada urana, aktinourana i torijuma date su u tabelama 1.1.1, 1.1.2 i 1.1.3 [9, 10].

Zapremina radona gasa od 0.66 mm^3 nalazi se u vekovnoj ravnoteži sa 1 g radijuma pri normalnim uslovima. Prvobitno je ta količina bila definisana kao jedan kiri. Kasnije je definicija proširena na ravnotežnu količinu svakog izotopa čija je brzina dezintegracije ravna raspadu 1 g radijuma, tj. $3.7 \cdot 10^{10}$ Bq.

Relativna važnost izotopa povećava se sa njihovim srednjim životom i kvantitetom prisustva u prirodi. Srednje vreme života ^{222}Rn je 5.51 dana, ^{219}Rn , 5.71 s i ^{220}Rn 80.2 s. Radon ^{219}Rn , pored toga što kratko živi, on se i stvara u mnogo manjim količinama od ^{222}Rn , jer je odnos njihovih izvornih predaka u prirodi $^{235}\text{U}/^{238}\text{U} = 0.00719$. Radon ^{220}Rn takođe je relativno kratko živi i u odnosu na ^{222}Rn može da pređe daleko manje rastojanje od izvora. Zato informacije sa većih rastojanja o izvoru ili procesima u zemlji daleko su dominantnije preko ^{222}Rn , a samo sa beznačajnih rastojanja preko ^{220}Rn . Izuzetno visok odnos Th/U nekad može da dovede do velikog povećanja ^{220}Rn prema ^{222}Rn . Jedan čuveni primer je u Indiji u državi Kerala, gde pesak monacit (ThPO_4) produkuje obilno oslobođeno ^{220}Rn koji može biti potencijalno opasnost po zdravlje ljudi [11].

Izotopi radona, izuzev ^{218}Rn , su rezultat emisije radijuma, što znači da je njihova produkcija proporcionalna prisustvu radijuma u zemlji. Svakako

^{222}Rn i ^{219}Rn stvaraju se gde je lociran uran, a ^{220}Rn gde je torijum. Tu naravno ima izuzetaka gde se radijum rastvaranjem transportuje i taloži daleko od mesta nastanka [12].

U svakom nizu raspada, u sredini su izotopi radona, a za njima slede elementi koji relativno kratko žive, koji se neretko nazivaju "aktivni talog"

Tabela 1.1.1. Niz ^{238}U [9]

Izotop	Karakter raspada	Energija estica, Mev	Period poluraspada
---------------	-------------------------	-----------------------------	---------------------------

$^{238}\text{U}_{92}$	α	4.18	$4.49 \cdot 10^9$ god.
$^{234}\text{Th}_{90}$	β^-	0.205; 0.111	24.1 dan
$^{234}\text{Pa}_{91}$	β^-	2.32; 1.5; 0.6	1.175 min.
$^{234}\text{U}_{92}$	α	4.763	$2.475 \cdot 10^5$ god.
$^{230}\text{Th}_{90}$	α	4.68; 4.61	$8.0 \cdot 10^4$ god.
$^{226}\text{Ra}_{88}$	α	4.777	1622 god.
$^{222}\text{Rn}_{86}$	α	5.486	3.825 dan.
$^{218}\text{Po}_{84}$	$\alpha > 99\%$		
	$\beta (0.03\%)$	5.998	3.05 min.
$^{214}\text{Pb}_{82}$	β^-	0.65	26.8 min.
	$\alpha > 99\%$	6.75	
$^{218}\text{At}_{85}$	$\beta (0.03\%)$	2.57	2 s
$^{214}\text{Bi}_{83}$	$\alpha(0.04\%),$ $\beta(99.96\%)$	5.46	19.72 min
		$\beta^+ - 1.65, \beta^- - 3.17$	
$^{218}\text{Rn}_{86}$	α	7.25	0.019 s
$^{214}\text{Po}_{84}$	α	7.680	$163.7 \cdot 10^{-6}$ s
$^{210}\text{Tl}_{81}$	β^-	1.8	1.32 min.
$^{210}\text{Pb}_{82}$	β^-	0.018	22.5 ± 0.4 god.
$^{210}\text{Bi}_{83}$	β^-	1.17	4.99 dan.
$^{210}\text{Po}_{84}$	α, β^-	$\alpha - 5.298, \beta^- - 3.3$	138.97 dan.
$^{206}\text{Pb}_{82}$	kona ni stabilan izotop		

Tabela 1.1.2. Niz aktinourana ^{235}U [10]

Izotop	Karakter raspada	Energija estica, MeV	Period poluraspada
$^{235}\text{U}_{92}$	α	4.40; 4.58; 4.46; 4.	$7.13 \cdot 10^8$ god.

$^{231}\text{Th}_{90}$	β^-	20	25.6 h
$^{231}\text{Pa}_{91}$	α	0.094; 0.302; 0.2	$3.43 \cdot 10^4$ god.
$^{227}\text{Ac}_{89}$	α, β^-	16	22.0 god.
$^{223}\text{Th}_{90}$	α	5.0	18.6 dan.
$^{223}\text{Ra}_{88}$	α	$\alpha-4.6; \beta-0.04$	11.2 dan
$^{219}\text{Rn}_{86}$	α	6.0	3.912 s
$^{215}\text{Po}_{84}$	α	5.7	$1.83 \cdot 10^{-3}$
$^{211}\text{Pb}_{82}$	β^-	6.82	36.1 min
$^{211}\text{Bi}_{83}$	α, β^-	7.37	2.17 min
$^{211}\text{Po}_{84}$	α	1.39; 0.50	0.52 s
$^{207}\text{Tl}_{81}$	β^-	$\alpha-6.62;$	4.79 s
$^{207}\text{Pb}_{82}$	kona ni stabilan izotop.	7.43	
		1.44	

Tabela 1.1.3. Niz torijuma $^{232}\text{Th}_{90}$ [10]

Izotop	Karakter raspada	Energija estica, MeV	Period poluraspada
$^{232}\text{Th}_{90}$	α	3.98	$1.39 \cdot 10^{10}$ god.
$^{228}\text{Ra}_{88}$	β^-	0.012	6.7 god.
$^{228}\text{Ac}_{89}$	α, β^-	$\alpha-4.5; \beta^-1.15$	6.13 h
$^{228}\text{Th}_{90}$	α	5.42	1.90 god
$^{224}\text{Ra}_{88}$	α	5.68	3.64 dan.
$^{220}\text{Rn}_{86}$	α	6.28	54.53 s
$^{216}\text{Po}_{84}$	α	6.77	0.15 s
$^{212}\text{Pb}_{82}$	β^-	0.355	10.67 h
$^{212}\text{Bi}_{83}$	α, β^-	$\alpha-6.05; \beta^-2.25$	60.48 min.
$^{212}\text{Po}_{84}$	β^-	8.78	$0.29 \cdot 10^{-6}$ s
$^{208}\text{Tl}_{81}$	β^-	1.79	3.1 min
$^{208}\text{Pb}_{82}$	Kona ni stabilan izotop		

1.2. Fizičke i hemijske osobine radona

Radon je radioaktivan, plemenit gas, hemijski inertan i zato pokretan na normalnoj temperaturi. To je bezbojan gas, bez mirisa, ali mu svojstvo radioaktivnosti omogućava da se lako detektuje i meri. Postojanje u formi fluorida kao RnF_4 bio bi prigovor njegovoj inertnosti. Može da se apsorbuje na finom ugljenom prahu što se koristi za njegovo merenje.

Gustina radona na 0°C je 0.00973 gcm^{-3} , a temperatura topljenja -71°C , ključna tačka -61.8°C , kritična temperatura je 104.4°C , a kritični pritisak $63.2 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ [9].

Njegov spektar je analogan spektru drugih plemenitih gasova. U vodi je rastvorljiv više nego drugi plemeniti gasovi: 0.25 ml na 1 ml vode na 20°C i 760 mm Hg. Rastvorljivost radona u vodi je obrnuto proporcionalna temperaturi. Što je viša temperatura okolne sredine, to je manje radona u vodi. Neke vrednosti odnosa radona u vodi prema radonu u vazduhu (atomi u jedinici zapremine) su: 0.53 (0°C), 0.43 (6°), 0.28 (15°C), 0.22 (26°C), 0.16 (40°C), i 0.11 (100°C) [13]. Tako se rastvara u sumpor ugljeniku, hloroformu, etil etru, ksilolu, toluolu i etilovom špiritusu. Lako se rastvara u krvi, znatno lakše u mastima što uslovljava efikasnu apsorpciju ovekovih masnih tkiva dospevanjem u organizam [9].

O radonu moramo da mislimo kao o izolovanim atomima, koji se u prirodi nalaze u gasovitoj ili tečnoj sredini, kroz koje mogu da se kreću u difuzijom, ili zajedno sa pokretnom sredinom.

Veštački je dobijeno 24 radioaktivna izotopa radona sa masenim brojevima od 200-226 [9].

Radon je otkrio E. F. Dorn 1900. g., a prvi su ga detektovali u vazduhu Elster i Geitel 1901 g. [14].

1.3. Potomci radona

Potomci radona ^{222}Rn su metalni atomi (Po, Bi i Pb) koji se koncentrišu na neku vrstu ili tečnu fazu sa kojom su u kontaktu. U vazduhu su prisutne male estice, kao što su aerosoli, na kojima se talože radioaktivni potomci. Prisustvo tih estica je 10^{-3} cm^{-3} u "istom" vazduhu i do 10^5 cm^{-3} u urbanom prostoru [15]. Vazduh zatvorenog prostora naročito je bogat aerosolima, kao depozitarima radioaktivnih potomaka, tako da se u nižim slojevima može izvanredno približiti ravnotežna aktivnost od svakog potomka onoj od radona.

Radon i toron nisu direktno štetni po zdravlje ljudi, već njihovi potomci koji imaju kratko vreme života. Radon kao plemenit gas sa vremenom života koje je relativno duže od vremena predaha, može biti izdahnut pre nego se raspadne. Nasuprot njemu, neposredno stvoreni raspadom ^{222}Rn , potomci

(^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi i ^{214}Po) kao delovi u vrstoj fazi prilepljeni na aerosolima mogu da se udišu i onda natalože na površinu epitela unutar pluća, i ubrzo raspadnu. Osetljive površine bronhija ozrače se ovim raspadima, najviše energetski i destruktivno teškom jonizacijom kratkog dometa alfa estica od izotopa polonijuma ^{218}Po i ^{214}Po . Treći i alfa aktivni polonijum ^{210}Po od malog je efekta zato što mu prethodi ^{210}Pb sa vremenom poluraspada od 22.5 god. Toron je nešto drugačiji slučaj. Njegov prvi potomak ^{216}Po (srednji život 0.22 s) se tako brzo raspada, praktično gde i ^{220}Rn . Zatim sledi ^{212}Bi sa srednjim životom koji je dovoljno dug da se njegov najveći deo transportuje od bronhija pluća. Primarni zdravstveni efekat biće na mestima gde se raspada alfa emisijom potomak ^{212}Po .

1.4. Dometi alfa estica i uzmarka nukleusa

Za fizičko ponašanje radona i njegovih produkata raspada od pune pomoći je znati penetracionu snagu alfa estica emitovanih raspadom, a takođe i uzmak preostalog atoma. U tabeli 1.4.1 navedene su energije i dometi alfa estica u vazduhu i vodi koje emituju ^{222}Rn , ^{220}Rn i njihovi alfa aktivni potomci.

Tabela 1.4.1. Energije i dometi alfa estica [16].

Nukleid	Energija alfa estica (MeV)	Domet alfa estica u vodi (m)	Domet alfa estica u vazduhu (cm)
^{222}Rn	5.49	39	4.08
^{218}Po	6.00	44	4.67
^{214}Po	7.69	66	6.91
^{220}Rn	6.29	48	5.01
^{216}Po	6.78	41	5.67
^{212}Po (64%)	8.78	83	8.53
^{212}Bi (36%)	6.05	45	4.73

Dometi u tipičnim plastičnim materijalima su slični onim u vodi. Na primer, alfa estice emitovane raspadom ^{222}Rn , čija je energija 5.49 MeV, prodiru 32 μm u polietilen tetraftalatu (gustine 1.2 g/cm^3), 31 μm u polietilenu, 37 μm u Leksan polikarbonatu, ali samo 23 μm u soda kretnoj staklu gustine 2.5 g/cm^3 . Preostali atom od alfa raspada ima daleko manju energiju (~100 KeV) i veoma kratak domet. Uzmarka ^{218}Po pri alfa raspadu ^{222}Rn je 27 nm u liskunu muskovitu i 21 nm u cirkonu, ali 68 nm u polietilenu.

1.5. Izvori radona

Radon sledi normalne zakone prirode. Radon ^{222}Rn formira se raspadom $^{226}\text{Ra}_{88}$, što znači da njegova koncentracija upravlja sa stvaranjem broja atoma radona, a kako je ^{226}Ra jedan od nukleida formiranih u dezintegracionoj seriji ^{238}U , iznos stvorenog radijuma u zemlji i stenama zavisi e od sadržaja urana. Gde se stvara radon i kako se kre e može se videti na osnovu tabele 1.5.1 u kojoj su date tipične prosečne vrednosti koncentracije ^{222}Rn u različitim sredinama.

Najveća koncentracija je u mineralnim zrnima, 25 puta manja u zemnom gasu u zemlji; slede ku e sa 1000 puta manjom vrednošću, 5 puta manjom u vazduhu iznad zemljine površine u odnosu na ku e, a još 100 puta manjom preko okeana. Ovakav tok navodi na sledeći zaključak. Radon vodi poreklo od raspada radijuma u mineralnim zrnima, odakle se mali deo oslobađa pre dezintegracije i kre e kroz prostore pora zemlje do površine zemlje.

Tabela 1.5.1. Tipične koncentracije ^{222}Rn [17].

Lokacija	Koncentracija (atoma cm^{-3})
Vazduh iznad okeana	0.04
Vazduh blizu zemljine površine	4
Tipični dom u SAD	20
Zemljin gas	20 000
Unutrašnjost tipičnih minerala	500 000

Ku e, koje se nalaze u međuprostoru zemlje i kontinentalne atmosfere, imaju koncentraciju radona koja je između vrednosti u ovim sredinama.

Izotopi radona stvaraju se u mineralima sa raspadom radijuma koji je sam produkt od raspada u prirodnim nizovima urana i torijuma. U prirodi se ovi elementi najviše nalaze u materinskim mineralima i drugim mineralima. Njihov sastav veoma široko varira od kvarca (SiO_2), sa $\leq 3 \cdot 10^{-12}$ težinskih delova urana do UO_2 sa 0.88 [17]; tipične kontinentalne stene imaju $\sim 10^{-6}$, bazaltne ispod okeana $\sim 10^{-7}$. Sredine, gde se primarno nalaze zajedno uran i torijum su magmatske stene bogate silicijumom, tj. neke forme granita i sijenita, eruptivne stene riolit i porfir, vulkanske pegmatit i aplit pridružene sa granitom i sijenitom. Po pravilu, oksidi minerala sadrže veću koncentraciju urana nego osnovni. I u istom tipu stena različiti minerali sadrže veoma različitu koncentraciju urana, koji se često koncentrišu u određenim acesornim mineralima kao što su cirkon (ZrSiO_4), apatit ($\text{Ca}_5(\text{F,Cl})(\text{PO}_4)_3$), sfen (CaTiSiO_5), i alanit [$\text{H}(\text{Ca,Fe})(\text{Al,Fe})_3\text{Si}_3\text{O}_{13}$]. Heterogenost sadržaja urana u

različitim cirkonima je od 1-10 ppm i unutar pojedinih od 800-4000 ppm [18].

Procesi formiranja zemlje izmenili su koncentraciju urana i radijuma. Izloženi destruktivnim procesima minerali oslobađaju radioaktivne izotope. U tome glavnu ulogu ima erozija, tj. celokupni fizički i hemijski procesi, kao što su oscilovanje temperature, zaleivanje vode u pukotinama minerala, pod uticajem hemijskog delovanja vode koja sadrži O, C, a tako e i u rezultatu delovanja biljnih i životinjskih organizama. Zatim procesom denudacije prenose se i rasprostiru svi osnovni prirodni radioaktivni izotopi u biosferu. Tu aktivnu ulogu imaju voda, led, morski talasi, vetar, sila teže.

Uran, usled svojih hemijskih osobina koje mu dozvoljavaju migraciju u prirodi u rastvorenom stanju, u prvobitnim mineralima odvaja se od torijuma i radijuma. Uglavnom se u prirodi nalazi u malim koncentracijama; u adsorbovanom vidu u mineralima i zemlji; u rastvorenom stanju u vodama okeana, mora, jezera i reka. U tabeli 1.5.2 navedeni su podaci, koji karakterišu koncentraciju urana u različitim geološkim sredinama i drugim prirodnim materijalima.

Tabela 1.5.2. Sadržaj urana u prirodi [10]

Materijali	Koncentracija urana, %	Materijali	Koncentracija urana, %
Vulkanski minerali	$4 \cdot 10^{-4}$	Bituminozni	$6.5 \cdot 10^{-3}$
Bazalti	$2 \cdot 10^{-5}$	škriljci	$1 \cdot 10^{-7}$
Graniti	$2.5 \cdot 10^{-3}$	Voda okeana	$10^{-2} - 10^{-7}$
Taložni minerali	$2 \cdot 10^{-4}$	@iva materija	$< 10^{-7}$
Fosfatni minerali	$1 \cdot 10^{-2}$	Meteoriti	

Pomoću u geoloških procesa kao što je metamorfoza i hidrotermalnim rastvaranjem, uran i torijum mogu da se pokrenu, transportuju i natalože u pukotinama i drugim permeabilnim strukturama. Taloženje je esto u redukcionoj okolini gde su stene bogate kalcijumom, gvožđem, u pukotinama sa magnezijumom. Velike naslage uranove rude nekada se formiraju pomoću u podzemne vode, koja transportuje uran koji je bio nataložen u redukcionoj okolini.

Kada su stene izložene eroziji, oslobodjena mineralna zrna sa uranom, a delom i radijumom, adsorbovana na glinenim esticama mogu da se transportuju sa vodom i natalože. Glina i glineni škriljci poseduju veće koncentracije urana i radijuma nego druge sedimentne stene, jer se dobro adsorbuju na amorfnim telima. Primeri sedimentnih stena sa relativno visokim koncentracijama urana su neke vrste crnog glinca (tj. alumoglinac

u Švedskoj i Norveškoj i Katanga glinac u SAD) i sedimentni nanosi fosfata u Maroku, Jordanu i Floridi. Me u sedimentnim mineralima najmanje su radioaktivni isti organski i hemijski talozi (kamena so, gips, anhidrit, kretnjak, dolomit, isti kvarc, kvarcni pesak i različite silicijumske forme).

Uran se isto nalazi u stenama u formi vrlo malih zrna uranovih minerala, tj kofenita $[(\text{SiO}_4)_{1-x}(\text{OH})_{4x}]$ i uranita (U_3O_8), ili adsorbovan na zrnima, ili uključen u rešetke drugih minerala, cirkona, apatita, titanita i drugih acesornih minerala. Zajedničko je da su ta zrna mnogo manja nego druga mineralna zrna u steni, u granitu, uglavnom u kvarcu, feldspatu i liskunu. Glinene estice sa mineralnim zrnima urana, zatim zrna cirkona, monacita, titanita se isto transportuju do nanosa peska. Mehani kim razvrstavanjem uključenje se isto u naslage teških minerala, koji se inače sastoje od gvožđa i titana.

Efekat razvrstavanja sa vodom dovodi do toga da se koncentracije urana i radijuma sve više smanjuju, do veoma malih vrednosti u dobro razvrstanim, finim granulama zemlje kao što je kvarcni pesak.

Torijum se ne rastvara lako u vodi, a i dezintegracioni period od ^{228}Ra (prvi produkt raspada ^{232}Th) do ^{208}Pb je oko 20 god. (tri polu-života ^{228}Ra). To vreme nije značajno za neku dezintegracionu neuravnoteženost između ^{232}Th i njegovih potomaka. Odnos između koncentracija ^{232}Th i potomaka ne menja se značajno hemijskim rastvaranjem u stenama ili zemljinim horizontima. Male količine torijuma, putem tekućih voda mogu se nataložiti do najbližih mora. U prirodi se održava u disperzionom stanju i koncentriše samo putem mehaničkog nakupljanja.

Potomci urana i torijuma u prirodi su rasejani još u većem stepenu. Minerali potomaka u prirodi ne postoje, tako da njihove maksimalne količine koje se nakupe neposredno u materijalima urana i torijuma svuda su krajnje male. Najveće koncentracije uranovih materijala ne sadrže više od $2.5 \cdot 10^{-5}$ % radijuma. I takve koncentracije se susreću krajnje retko. Zbog toga se smatra da ne postoje minerali radijuma u prirodi, već se u rasejanom obliku nalazi svuda. Prema jednom pregledu, rasprostranjenost radijuma u biosferi karakteriše se sledećim vrednostima (u %) (tabela 1.5.3) [10]:

Tabela 1.5.3. Rasprostranjenost radijuma u biosferi u %

Lokacija	Radijum (%)
Gornji minerali	10^{-9} - 10^{-10}
Zemlja	10^{-10} - 10^{-11}
Biljke	10^{-12}
Životinje	10^{-13}
Vode reka i mora	10^{-12} - 10^{-14}

U telu oveka sadržina radijuma približava se nivou sadržine radijuma u vodi koju pije u dužem vremenskom roku. Sa hranom jednostavno ovek unese oko 0.15 g. radijuma. Ravnotežno stanje izme u radijuma unešenim sa vodom i hranom, i koli inom nakupljenom u tkivima postiže se u vremenu od 100-300 dana.

Iako se radijum u stenama generalno dovodi u vezu sa prisustvom urana, sekundarne lokalne akumulacije mogu da se na u zato što je slabo mobilan u pore enju sa uranom. Te redukcije mobilnosti objašnjavaju se i injenicom da su radijum forme nerastvorljivi fosfati i karbonati. Radijum je pre imobilan u oksidacionoj okolini i daleko mobilniji u redukcionoj okolini. Radijum se tako e premešta rastvaranjem, sa glinenim esticama, organskim materijama, gvož em i mangan hidroksidom. U nekim prirodnim sredinama, hemijski procesi rastvaranje-taloženje mogu zgusnuti radijum tako mnogo, da se radon stvara u malim zapreminama. Sa druge strane, radon može biti prisutan gde je veoma malo radijuma, zato što je sam mobilan [19].

1.6. Radioaktivnost zemlje

Mineralne supstance zemlje u osnovi su produkti razorenih gornjih minerala: magmatskih, metamorfnih i sedimentnih. Pri tome, zavisno od karaktera uslova i uzroka zbog kojih je proizišlo raspadanje gornjih minerala, sastavni minerali zemlje mogli su da se talože blizu materinskih minerala, ili da se prenesu teku im vodama i vetrom. Taj neorganski deo zemlje formira se uglavnom od estica razli itih minerala ije dimenzije ne prmašuju 1 mm. U svakom tipu zemlje mogu se na i svi poznati hemijski elementi, samo što je njihov odnos razli it. Zemlje koje su nastale od gornjih minerala odlikuju se povišenim sadržajem urana, torijuma i radijuma. Zemlje nastale od granitnih minerala, po pravilu bogatije su radijumom, nego zemlje nataložene od osnovnih i

sedimentnih. Ili, u celini, peskovite zemlje siromašne su radijumom, dok glinene sadrže više radioaktivne elemente, nego peskovite.

Koeficijent koji karakteriše odnos torijuma prema uranu značajnije je i za zemlju, nego za gornje minerale, što se objašnjava dobrom rastvorljivošću u uranovih jedinjenja u vodi i migracijom prema velikim vodenim basenima. Iz istih razloga u zemlji ne postoji radioaktivna ravnoteža između urana i radijuma.

Srednji sadržaji urana, torijuma i radijuma u zemlji i zemljinoj kori (%) dati su u tabeli 1.6.1.

Tabela 1.6.1. Srednji sadržaj torijuma, urana i radijuma u zemlji i zemljinoj kori (%) [10]

Element	Zemlja	Zemljina kora
Torijum	$6 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$
Uran	$2 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$
Radijum	$8 \cdot 10^{-11}$	$2 \cdot 10^{-11}$

Sadržaj urana, po pravilu, nezavisno od tipa zemlje raste od površinskog sloja ka dubini zemlje.

Pored mineralnih supstanci, na ukupnu radioaktivnost zemlje primetno udeo ima vazduh sa određenim količinama radioaktivnih gasova (radona, torona i aktinona) i produkata njihovog raspada (radioaktivni talog). Neposrednim merenjem svuda je ustanovljena radioaktivnost vazduha. Mešaju i se sa vazduhom u porama i kapilarima zemlje, radioaktivni gasovi i produkti njihovog raspada, zahvaljujući difuziji i mehaničkoj razmeni zemljinog vazduha sa atmosferskim, dospevaju u prizemni sloj vazduha. U tabeli 1.6.2 navedene su koncentracije radijuma i radona u zemljinom vazduhu u nekim zemljama

Tabela 1.6.2. Normalna koncentracija ^{226}Ra i ^{222}Rn u zemljama, merena na dubini od 1 metra[20].

Tip zemlje	^{226}Ra (Bq kg^{-1}) 1)	^{222}Rn (Bq kg^{-1}) 3)
Obradiva ili ostale zemlje sa normalnim sadržajem radijuma	15-65	5 000-30 000
Obradiva ili ostale zemlje sa fragmentima granita	130-125	10 000-60 000
Obradiva sa fragmentima urana-bogat granit	125-360	10 000-200
Ijunak	30-75	000
Pesak	5-35	10 000-150
nanos (prašina)	10-50	000
Glina	10-100	2 000-20 000
Zemlja sa fragmentima od alumo glinaca	175-2 500	5 000-60 000
		10 000-100 000
		000
		50 000-> 10^6

$12,3 \text{ Bq kg}^{-1} \text{ } ^{226}\text{Ra}$ je ekvivalent 1 ppm urana

1.7. Emanacija radona i njegova koncentracija

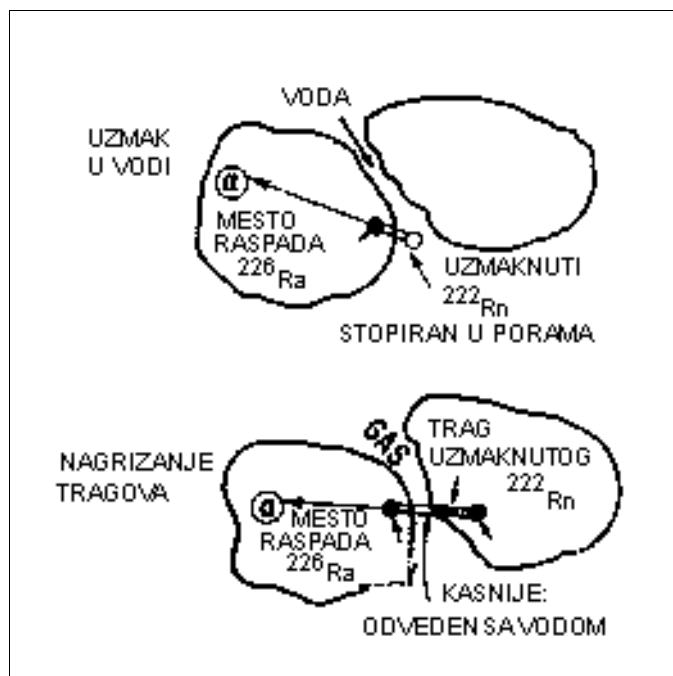
Na osnovu najveće koncentracije radona u mineralima (tabela 1.5.1), može se zaključiti da najveći broj atoma nikada ne napušta mesto stvaranja pre dezintegracije. Postoje tri teorije o tome kako radon ili toron emaniraju iz rešetke minerala, ili molekula gde su stvoreni.

Kada se atom ^{226}Ra raspadne formiraju se atom radona i alfa čestica. Na osnovu zakona održanja energije se može odrediti, da je pri emisiji alfa čestice sa energijom od 4.78 MeV energija uzma nog jezgra ^{222}Rn , 86 KeV. Rastojanje, koje atom radona može da pređe sa mesta u rešetki minerala ili molekula gde je nastao u mineralnom zrnju normalne gustine, bilo bi od 0.02-0.07 μm . To je upravo kretanje koje omogućava atomu radona da emanira iz mineralnog zrna [21, 22, 23, 24].

Druga mogućnost je da atom radona bude izbačen iz mineralnog zrna, pod uslovom da je rezultat uzmaca za to dovoljan, i da se nađe direktno u međuprostoru kako je prikazano na gornjem delu sl. 1.7.1. Kada međuprostor sadrži vodu, izbačeni atom ostaje u vodi i nastavlja dalje kretanje difuzijom u vodi, ili se transportuje sa njom [22].

Treća mogućnost je da je međuprostor suv i nije dovoljno širok da zaustavi atom, već ulazi u susedno mineralno zrno gde se zaustavlja, kao na donjem delu sl. 1.7.1. To oštećenje duž puta atoma radona može kasnije da popuni

voda i oslobodi ga u me uprstor pre nego se raspadne. Takav efekat otkriven je u kvarcu, a kasnije demonstriran u liskunu muskovitu [KAl₃Si₃O₁₀(OH)], diopsidu (CaMgSi₂O₆), ortoklasu (KAlSi₃O₈), apatitu, sfenu i absidianu [21, 24].



Sl. 1.7.1. Dva modela o mehanizmima osloba anja radona: (gornji) uzmaknuti nukleus ²²²Rn je zaustavljen sa vodom u integranularnom materijalu [22]; (donji) nukleus uzmakne u susedno zrno i ošte enim tragom se oslobo eni uzmaknuti nukleus kasnije pokre e hemijski sa intergranularnom te noš u [21].

Koncentraciju radona i torona u zemljinom vazduhu i podzemnim vodama odre uje koncetracija radijuma u zemlji i stenama odre ene lokacije, zatim koliko atoma radona emanira u prostore pora sa mineralnih zrna u kojima su formirani, kao i poroznost i sadržaj vode u zemlji. Drugim re ima to zna i, da na koncentraciju radona uti e to koliko se odstranjuje i nadokna uje preko procesa difuzije i transporta (kretanjem zemljinog vazduha, ili vode, ili kretanjem gasovima kao što su CO₂, CH₄, H₂S, SO₂, H₂). Propustljivost zemlje i stena je od presudne važnosti za transport radona.

Ako je poznata koncentracija radijuma, poroznost i emanacija za tip zemlje, može da se na e maksimalna koncentracija radona u zemljinim porama kada su potpuno ispunjene sa vodom ili vazduhom prema jed.1.7.1 [25]:

$$C_{\max} = \frac{A \cdot e \cdot d \cdot (1 - p)}{p} \quad (1.7.1)$$

gde je: C_{\max} - koncentracija aktivnosti radona (Bq/m^3) u zapremini pora sa potpuno

odsutnom ventilacijom;

A - specifi na aktivnost radijuma (Bq/kg);

e - koeficijent emanacije (deo od celokupnog broja formiranih atoma radona

ili torona koji emaniraju u prostore pora);

d - kompaktna gustina minerala (kg/m^3), (za minerale zemlje uobi ajeno je

$2\,700\text{ kg}/\text{m}^3$); i

p - poroznost, odnos zapremine pora prema celokupnoj zapremini.

C_{\max} se pove ava ako se smanjuje p.

Ova formila nije univerzalna. Kada je koncentracija atoma radona u jedinici pora jednaka onoj u okolnim mineralnim zrnima, prestaje difuzija atoma radona u pore ako oni ne mogu da se dalje transportuju. Drugim re ima, koncentracija radona gasa u jedinici zapremine pora ne može da bude ve a od koncentracije u mineralnim zrnima. Onda je

$$p < e$$

U zemlji iznad vodene površine, radon može da se transportuje iz/ili u pore difuzijom, ili zemljinim vazduhom, ili podzemnom pokretnom vodom. U zemlji ispod vodene površine ova mogu nost je ograni ena samo na difuziju, a u vodi radon difuzijom ne može da pre e više od 5 cm. Prakti no, u horizontalnom sloju zemlje ispod vodene površine, koncentracija e se kontinualno održavati na nivou koji je jednak maksimumu, koji odgovara odre enoj koncentraciji radijuma, poroznosti i emanaciji odgovaraju e zemlje.

Na osnovu jedna ine (1.7.1) izra unata vrednost C_{\max} radona za zemlju ija je specifi na aktivnost $10\text{ Bq}/\text{kg}$ ^{226}Ra , poroznost 30%, kompaktna gustina minerala $2.700\text{ kg}/\text{m}^3$ i emanacija 25%, $C_{\max} = 16.000\text{ Bq}/\text{m}^3$.

Za suhu zemlju sa aktivnoš u Ra od $50\text{ Bq}/\text{kg}$, poroznoš u $p = 0.3$, bez ventilacije (vazdušne promene na sat su jednake nuli), C_{\max} je oko $80.000\text{ Bq}/\text{m}^3$. U zemlji sa velikim prisustvom granita bogatim uranom i sa koncentracijom Ra od $250\text{ Bq}/\text{kg}$, maksimalna koncentracija radona je $400.000\text{ Bq}/\text{m}^3$; u pesku u kojem postoje delovi od alumo glinaca sa koncentracijom Ra od $1.250\text{ Bq}/\text{kg}$, koncentracija aktivnosti radona je oko 2 miliona Bq/m^3 .

Koncentracija radona u porama ispunjenim vazduhom je manja u horizontalnim slojevima zemlje ograni enim površinama u kojima postoje uslovi bilo kakve ventilacije i difuzije.

Koeficijent emanacije zemle je od 1-99%, što zavisi od geohemijskih i meteoroloških uslova. Koeficijent emanacije minerala je konstantan i za

magmatske minerale je od 15-30%, za sedimentne od 10-25% i za minerale rudnog porekla od 30-90% [10].

Koliko e stvorenih atoma emanirati iz mineralnog zrna ili materije i u i u prostore pora zavisi i od toga gde se atomi radijuma nalaze u zrnu, sastava i veli ine zrna, sorpcije na površini zrna, sadržaja vode, temperature i veli ine pora.

Sa usitnjavanjem estica u kojima je formiran radon pove avaju se mogu nosti da ih napusti, tj. ve a je emancija sa sitno zrnih materijala ili više poroznih. U tabeli 1.7.1 date su granulometrijske veli ine za neke tipove zemlje i stena i emanacije radona u prostore pora.

Tabela 1.7.1. Emanacija atoma radona u pore vazduha, e(%), u razli itim zemljama i usitnjenim stenama sa granulometrijskim veli inama

ICG=CH=CI=CJn1

Tip zemlje	e (%)	Veli ina zrna
Fina (sitna) glina	30 - 70	< 0.06 μm
Gruba (krupna) glina		0.6 - 2 μm
šljunak	15 - 40	2 000 - 60 000 μm
Pesak	15 - 30	60 - 2 000 μm
Usitnjene stene	5 - 15	100 - 800 μm
Usitnjeni granit bogat uranom	15 - 30	1000 - 8000 μm

Kao što se vidi, estice gline su tako male da veliki deo formiranih atoma radona može da emanira u pore ispunjenih sa vazduhom i vodom. Time se i objašnjava visoki koeficijent emanacije za njih. Visoka emanacija sa suvog peska i šljunka može da se objasni na dva na ina. Jedan je, da se sitni deli i zemlje (< 150 μm) sa absorbovanim radijumom, u kojima je ve a koncentracija 3-8 puta nego u krupnim esticama, natalože na površinu zrna ili u pukotinama u njima, a drugi je da se na tim mestima direktno natalože atomi radijuma. Oba ova puta olakšavaju emanaciju [27].

Koeficijent emanacije radona sa stena ili delova stena, ili zemlje zavisi i od toga da li se uran nalazi u rešetki neuranovih minerala kao što su: feldspat, magnetit, apatit, alanit ili cirkon, ili uranivih kao što su uraninit (U_3O_8), uranotorit, ili kofenit [$\text{U}(\text{SiO}_4)_{1-x}(\text{OH})_{4x}$]. Ve i je koeficijent kada se uran nalazi u rešetki svojih minerala, jer se oni nalaze esto izme u velikih zrna od kvarca i feldspata, ili izme u slojeva u biotitu, što olakšava emanaciju. Koncentracija urana od 4-10 ppm (50-125 Bq/kg ^{226}Ra), je uobi ajena za ve inu granita u kojima je uran uklju en u rešetke neuranovih minerala, dok je ona znatno ve a kada se uran nalazi u pojedinim uranovim mineralima.

Šanse za emanaciju radona su veće ako je veća poroznost materijala u kojem se povećava difuzija. Emanacija u odnosu na koncentraciju radijuma je mala sa krupnih, površinski nepromenjenih stena aluminata i glinaca, koje su zbijene, a pore su im punjene kerozinom ili nekad naftom. Emanacija u odnosu na koncentraciju radijuma biće veća sa zrnastih, neravnih površina granita.

Emanacija radona veća je sa vlažne zemlje nego sa suve. Prosečno se emanacija povećava 2-3 puta sa zemlje ako se sadržaj vode povećava od 0% na 5% [27]. Koncentracija radona u vazduhu zemljinih pora povećava se sa povećanjem sadržaja vode u porama. Kada je broj atoma radona u vazduhu pore u zemlji konstantan, ako je emanacija u zemlji konstantna i atomi radona ne dopunjavaju ili napuštaju zapreminu pore, povećanje količine vode u sredini zapremine pore povećava se koncentracija radona u preostalom vazduhu. To se objašnjava time da izbačeni atom radona pri dezintegraciji radijuma usporava voda u porama i sprečava njegovo prodiranje u rešetke okolnih mineralnih zrna [24]. Ako su pore punjene 75% sa vodom, 25% sa vazduhom, koncentracija radona u vazduhu pora biće dva puta veća, nego kada su bile potpuno punjene vazduhom [30, 31].

Odnos između koncentracija radona u vazduhu i vodi zavisi od temperature tako da se sa povećanjem temperature povećava koncentracija u vazduhu pora. Na osnovu merenja koje uključuje temperaturne efekte, koncentracija radona u porama vazduha sa različitim sadržajima vode, na dubini ispod koje je difuzioni transport radona do površine beznačajan, tj. sa 1 m, je:

$$C_{\max} = \{Aed(1-p)/p\} [F(K_T - 1) + 1] \quad (1.7.2)$$

gde je: C_{\max} - koncentracija aktivnosti radona (Bq/m^3) u zapremini pora bez ventilacije;

e - emanacija (deo od celokupnog broja formiranih atoma koji emaniraju u prostore pora);

d - kompaktna gustina (kg/m^3) (za minerale zemlje 2700 kg/m^3),

p - poroznost (odnos zapremine pora prema celokupnoj zapremini);

F - deo vode i

K_T - koeficijent odnosa jedinica za ^{222}Rn u vodi i vazduhu.

Koncentracija radona mogla bi da se promeni više puta kada postoje efekti od F i K_T . Na pr. na temperaturi od 25°C i u veoma vlažnoj zemlji ($F = 0.95$), sa koncentracijom aktivnosti radijuma $A = 30 \text{ Bq/kg}$, emanacijom $e = 0.2$ i gustinom $d = 2700 \text{ kg/m}^3$ koncentracija aktivnosti iznosi 78.3 Bq/m^3 . Na 0°C i u suvoj zemlji ($F = 0.05$) koncentracija aktivnosti je 21.2 Bq/m^3 [32].

Još jedan razlog za veću emanaciju je da prisustvo vode u porama sprečava sorpciju radona na spoljašnjim površinama estica. Pokazano je da do sorpcije radona na mineralnim zrnima dolazi samo u suvoj zemlji. Efekat sorpcije se smanjuje sa povećanjem vlažnosti i to tako da 10% vlage smanji sorpciju toliko da ne može praktično da se meri. Glinene estice imaju visoki

sorpcioni kapacitet, dok su sorpcione vrednosti nekih krupno zrnih materijala, kao kvarcni pesak, toliko male da se ne mogu meriti [23].

1.8 Koncentracija radona na razli itim dubinama zemlje

Koncentracija radona pove a se sa dubinom i može dosti i maksimum na dubini od oko 2 m u zemlji. Obi no su promenljiva pove anja koncentracije radona na dubini od 2 m, u skladu sa kompleksnim problemom transporta radona i distribucije izvora. Mereni radon može biti stvoren sa lokalnih izvora, ali i sa izvora koji su na ve oj dubini, što je povezano sa mogu im transportom ne samo sa difuzijom, ve i sa nekim usiljenim (forsiranim) transportom [32, 33, 34, 35].

Sadržaj urana u sredini uti e na koncentraciju lokalno stvorenog radona. Tabela 1.8.1 pokazuje koncentracije aktivnosti radona kao funkcije sadržaja urana u zemlji u južnom delu Švedske.

Tabela 1.8.1. Nivoi radona na dubini od 1 m u dva tipa zemlje prema intervalu sadržaja urana u zemlji | DGn

Interval urana (ppm) →		1-5	1-10	1-17	1-53	1-69
Rn(kBq m ⁻³)	Glaciofluvijalni nanos	6.6	11.9	13.2	17.2	19.4
	Pesak morena	6.5	11.0	11.9	15.2	43.3

U tabeli 1.8.2 su koncentracije radona za razli ite tipove zemlje sa relativno malim 1-25 ppm i homogenim sadržajem urana na dubini od 1 m.

Tabela 1.8.2. Izmereni nivoi radona u razli itim zemljama u oblasti na jugu Švedske. Mereno je na dubini od 1 m [37]

Zemlja	Broj merenja	(kBq/m ³)	
		Srednje vred.	Sredina
Morene	136	13 ± 7.9	12.0
Glaciofluvijalni nanos	75	13.5 ± 6.1	12.7
Pesak	77	6.2 ± 3.3	5.6
Glina	28	11.3 ± 10.6	6.8

Koncentracija radona $C(z)$ sa dubinom z u zemlji može da se opiše teorijski jedna inom (1.8.1)

$$C(z) = C_0(1 - e^{-kz}) \quad (1.8.1)$$

gde je C_0 konstanta i

$$k = \frac{v}{2Dv} - \sqrt{\frac{v^2}{4D^2v^2} + \frac{\lambda}{D}} \quad (1.8.2)$$

gde je: v - brzina strujanja (pritanja),

ε - poroznost zemljinog medijuma,

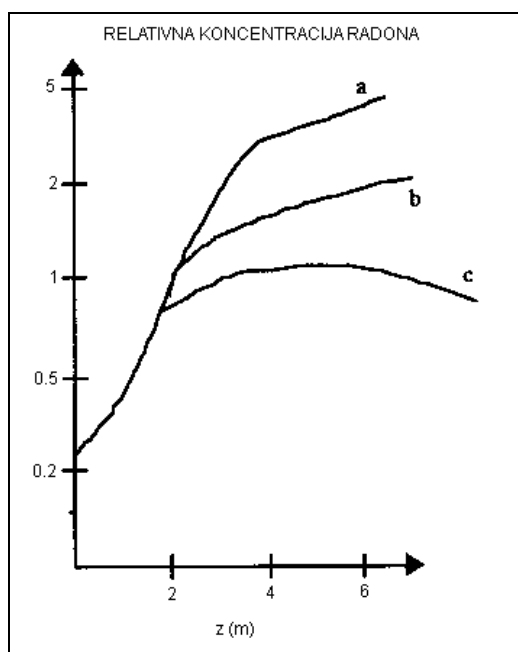
D - koeficijent difuzije

λ - konstanta radioaktivnog raspada radona ($\lambda = 7.55 \cdot 10^{-3}$ 1/h).

Kompleksnost transporta radona ilustrovana je na sl. 1.8.1 koja pokazuje koncentraciju radona prema dubini u pesku [35].

Uopšte, dubinska zavisnost koncentracije radona je razli ita u razli itim vrstama zemlje, što zavisi od nekoliko parametara. Važan parametar je poroznost, koja se razlikuje od jedne zemlje do druge, a proporcionalna je zapremini ispunjenoj sa vazduhom. Drugi važan parametar je koeficijent difuzije. Tre i važan parametar koji uti e na koncentraciju radona u zemlji je sadržaj vlage. Sa pove anjem vlage, smanjuje se koncentracija radona sa dubinom [38]

Pored parametara koji su geološkog porekla, neposredni uticaj na malim dubinama imaju meteorološki parametri na površini zemlje, kao što su pritisak iznad zemlje, temperatura, brzina vetra, sastav tla.



Sl. 1.8.1. Dubinska zavisnost u zemlji od peska gde je z dubina
a: Teorijski. Radon difunduje sa dubokog izvora
b: Kriva se podudara sa merenjima
c: Teorijski. Radon difunduje sa lokalnog izvora [35]

U pogledu radona, zgrade bi mogle da se porede sa poklopcem na zemlji koji ometa difuziju i efekat vetra. Ispod zgr00 Bq/m³ na 0.5 m, do 4 miliona Bq/m³ na 5.7 m dubine [46]

Gore izneti komentari su na osnovu merenja radona u zemnom vazduhu, za koje je karakterističan veliki raspon vrednosti koncentracija radona. Kao alternativa ovim merenjima koristi se metod izra unavanja maksimalne koncentracije aktivnosti C_{max} , prema jednačini (1.7.1), ako se meri koncentracija aktivnosti radijuma u zemlji. Zadovoljavaju i rezultati postižu se ako se koncentracija radijuma meri u bušenim ili kopanim otvorima, tj na mestu gde treba odrediti maksimalnu koncentraciju radona. Da bi se izra unala maksimalna koncentracija, treba odrediti poroznost, kompaktnu gustinu i emanaciju radona za mesto merenja.

ada, koncentracija poraste do maksimuma koji odgovara određenoj koncentraciji radijuma, emanaciji i raspadu radona, poroznosti i stepenu vlage odgovarajuće zemlje. Zato su potrebna istraživanja o radonu u zemlji, o nekim geološkim i drugim neophodnim parametrima pre konstrukcije novih kuća, da bi se sprečilo njihovo zidanje na mestima sa kojih bi radon iz zemlje mogao da prođe u anomalno velikim koncentracijama. Takva ispitivanja su potrebna i radi identifikacije kuća sa povećanim koncentracijama radona. Potrebno je uraditi merenje na dubini gde je ravnoteža u priticanju i nestajanju radona. Do optimalnih rezultata se dolazi kod merenja na dubini od 1 m. Na toj dubini, koncentracija radona u zemljinom vazduhu ima neki relativno konstantan nivo, koji je 70-80 % od ravnotežne koncentracije. Tako se moguće, bez neke velike greške, da se prihvati da rezultati merenja na 1 m dubine predstavljaju maksimalnu koncentraciju radona na ravnotežnim pozicijama. Na dubini od 0.7 - 1 m postiže se poravnanje izme u površinskih merenja sa uticajem meteoroloških uslova i merenja na ve ojoj dubini gde se detektor spušta ispod vodene površine, ili u zemlju natopljenom vodom. Za zemlje veće propustljivosti potrebno je meriti na ve ojoj dubini.

Sledeći razlog za merenje zemljinog radona na dubini od 1 m jeste da je uran nataložen u zemljinom sloju od 0.1-0.7 m dubine, pa je u tom sloju koncentracija radona veća nego u sloju ispod [38,39].

Na dubini od 0.5 m postiže se 50% od ravnoteže u koncentraciji izme u stvorenog i nestalog radona [40, 41, 42]. Na malim dubinama koncentracija trpi ogromne promene usled meteoroloških promena na zemlji. Atmosferski pritisak utiče tako da se ekshalacija radona iz zemlje smanjuje sa povećanjem pritiska i obratno. Vetar iznad površine zemlje redukuje koncentraciju radona u zemljinom vazduhu. Ta redukcija je veća ako zemlja ima veću propustljivost, kao što su pesak i šljunak u kojima uticaj vetra može da bude

do dubine od 1 m. Uticaj vetra je izražen na kosim stranama, gde se usled jakih vetrova smanjuje koncentracija radona u zemljinom vazduhu.

Promene koncentracije radona zemljinog vazduha su kratkotrajne ili dugotrajne. Dugotrajne su uslovljene parametrima sezonskog karaktera. Takvi parametri su nivoi podzemne vode i temperatura. Jedan od mogućih faktora koji utiče na sezonsku promenu koncentracije radona je podzemna voda, nivoi su veći u jesen i zimu, a drugi je temperatura [42]. Najveća koncentracija radona je u vreme topljenja snega i u zimsko vreme, kada je izlazna emanacija iz zemlje u atmosferski vazduh posebno otežana, pre svega zbog narušene prohodnosti kapilara zemlje. Uticaj podzemnih voda je neznatan na propustljive zemlje, ali je važan na glinaste. Kada je glina suva ima puno pukotina i veća koncentracija radona [43, 44, 45]. Sezonski uticaj može biti promenjen ako je pridružena seizmička aktivnost.

Dugovremene promene se modulišu sa dnevnim fluktuacijama usled dnevnih promena temperature atmosfere. Da bi se izbegli ovi uticaji treba obaviti merenja na većoj dubini.

Opsežna merenja koncentracije radona u zemljinom vazduhu izvedena su u Kanadi na dubinama do 5.7 m u usitnjenom otpadnom materijalu uranovog rudnika. Mereni materijal je bio od peska i krupne prašine, sa koncentracijom radijuma od 3.000 – 4.750 Bq/kg. Rezultati su pokazali da se koncentracija povećava sa dubinom i to od oko 600.0

Autori rada [47] predložili su i detaljno opisali metodu za spektrometrijska merenja radijuma na osnovu kojih se određuje koncentracija radona, uz istovremeno određivanje emanacije, poroznosti i propustljivosti uzoraka u laboratoriji. Oni su preporučili ovu metodu, umesto direktnog merenja radona, koje smatraju nepouzdanim.

Može se zaključiti da na nivo radona u zemlji utiču neki parametri koji su geološkog i meteorološkog porekla. Neki od tih parametara utiču u veoma mnogo na jednom mestu, ali samo nekoliko metara odatle taj uticaj može biti beznačajan [37]. Zato je teško predskazati koncentraciju radona u zemlji, posebno ako su neki parametri nepoznati.

1.9. Radon u podzemnoj vodi

Kada je voda u direktnom kontaktu sa mineralnim česticama koje sadrže radijum, nastali radon može efektom uzmaca da bude uobijen u vodu. Nivo koncentracije radona u toj vodi daleko premašuje nivo koncentracije u gasu koji je u kontaktu sa tom vodom. Tako je, na primer, nađeno da je koncentracija radona u vodi jednaka $1.9 \cdot 10^6$ Bq/m³, a u dodirnoj gasovitoj fazi 150 Bq/m³. Voda koja je prezasićena radonom, oslobađa ga naglim uzburkavanjem, kao u većini mašinama ili tuševima [22].

U normalnim okolnostima, podzemna voda ima koncentraciju radona iji maksimum zavisi od poroznosti i koeficijenta emanacije odgovaraju e zemlje. Radon koji sa zemlje emanira u pore sa vodom, difuzijom prelazi mala rastojanja pre dezintegracije. Samo se podzemnom proto nom vodom može dalje da se transportuje.

Koncentracija radona može da bude velika u vodi u pukotinama stena, i to mnogo puta ve a nego u samoj steni, što je uopšte karakteristi no za granit. Granit ima na primer koncentraciju urana od 12 ppm (148 Bq/kg radijuma). Koncentracija aktivnosti radona u stenama granita je 400.000 Bq/m^3 , a u vodi u pukotinama može da dostigne vrednost od 10 miliona Bq/m^3 . Ova razlika koncentracije u steni i u pukotinama ne može da bude zbog difuzije radona sa granita, ve se tuma i na slede i na in. Na gornjim površinama pukotina stena, putem podzemne vode došlo je do taloženja urana i njegovih potomaka. Do toga je došlo ili zbog hemijske reakcije sa mineralima na površini pukotina, ili zbog slabe rastvorljivosti nukleida potomaka. Na eno je da koncentracija urana na tim površinama može da bude 3 - 20 puta ve a nego u okolnoj steni i u vodi [42]. Zato je materijal sa površina pukotina i napuklina bogat radijumom, sa kojeg radon može direktno da emanira u vodu u pukotinama. Drugi razlog bi mogao da bude mnogo puta ve a koncentracija radona u zasebnim zrnima uranovih minerala sa kojih radon difunduje u vodu. Kako je poroznost stene veoma mala, koncentracija radona u postoje im okolnostima može da bude 10 - 100 puta ve a u vodi, nego u steni.

Koncentracija radona u podzemnoj vodi u površinskom sloju zemlje je obi no od 10 - 200 Bq/l. Velika koncentracija, preko 1.000 Bq/l je u podzemnoj vodi u pukotinama stena od granita bogatih uranom. Uopšte uzevši, koncentracija u vodi u pukotinama stena koje su sa visokim sadržajem urana trebalo bi da bude visoka. To, me utim, nije uvek tako. Na primer, uprkos visokim sadržajima urana u alumoglincima, velika koncentracija radona u vodi u prostoru alumoglinaca je redak slu aj. Ipak, se može re i da je koncentracija radona u podzemnim vodama, naj eš e, mala u prostorima gde je mala koncentracija urana u steni (dioritu, dabrou, u osnovnim vulkanskim stenama, u kre njaku, peš aru i glincu), sa izvesnim izuzecima. U tabeli 1.9.1 dati su intervali koncentracija radona i radijuma u podzemnoj vodi u razli itim okolinama.

Tabela 1.9.1. Koncentracija aktivnosti radona i radijuma u podzemnoj vodi u Švedskoj. Uobičajeni interval i maksimalne koncentracije [4].

Vrste izvora	²²² Rn (Bq/l)	²²⁶ Ra (Bq/l)
Jezerska i morska voda	< 2	0.0005 - 0.007
Kopani bunari:		
uobičajeno	10 - 300	0.001 - 0.09
granit bogat uranom	40 - 400	
Bušeni bunari:		
sedimentna stena	10 - 50	
kristalna stena	70 - 500	0.01 - 0.25
granit bogat uranom	500 - 4 000 (max 57	
Pegmatit bogat uranom	000)	max (0.35 - 2.5)
Nanosirine rude:	max (15 000 - 28 000)	
Kiruna, rudnik ruda gvožđa		0.1 - 6
Uranove rude	50 - 300 (max 600)	
	2 000 - > 100 000	

Obavljena su opsežna istraživanja o tome, kada radon iz podzemne vode može da prouzrokuje povećanu koncentraciju radona u zgradi [43, 44, 45]. Ima takvih primera kada se voda sa povećanom koncentracijom radona koristi u domaćinstvu, pa se prilikom pranja ili tuširanja radon oslobađa i na taj način se povećava njegova koncentracija u datim prostorijama. Ali nije ustanovljeno da je radon oslobođen iz podzemne vode u zemljin vazduh bio uzrok povećanoj koncentraciji radona u zgradama. Razlog tome je, prvo, visoka koncentracija radona u zemljinom vazduhu, viša nego u vodi ispod, a drugo što su zemljine pore u sloju neposredno iznad vodene površine pune vodom, pa zbog ograničenog života radona i malog koeficijenta difuzije takve zemlje, radon prelazi malo rastojanje. Može, međutim, da bude visoka koncentracija radona u zgradi iznad, ili blizu podzemne protočne vode sa visokim nivoima koncentracije radona. Radon bi u tom slučaju mogao da se oslobodi strujanjem vode i da se potom transportuje do zgrade, ali samo ako je koncentracija radona u podzemnoj vodi mnogo veća nego u zemlji i ako voda struji prema površini.

1.10. Transport radona

Podzemni transport radona mogao bi da se opiše sledećom jednačinom

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_{eff} \Delta C - \nabla \cdot (\vec{v}C) - \lambda C + w$$

(1.10.1)

gde su: C - koncentracija radona ($1/m^3$) u prostoru pore,
 D_{eff} - efektivni koeficijent difuzije radona ($1/m^2 s$),
 \bar{v} - brzina (m/s) supstance koja transportuje radon,
 λ - konstanta radioaktivnog raspada radona (1/s) i
 w - karakteristika izvora ($1/m^3 s$).

U jedna ini, prvi deo opisuje difuziju, drugi konvekciju, tre i deo raspad i etvrti deo izvore radona. Da bi se rešila ova jedna ina, najpre treba znati brzinu (tj. Navier-Stokes-ovu jedna inu koja je sama komplikovan problem), onda uzeti u obzir izvor, i po etni i grani n uslovi za C mogu biti rešeni. Ova jedna ina može da se reši samo numeri ki [48]

Napuštaju i minerale, radonovi atomi u vazdušnoj sredini ostaju kao slobodni atomi. Dalje mogu da se transportuju na dva osnovna na ina, difuzijom i strujom vazduha i okolnih gasova (CO_2 , CH_4), ili sa vodom koja proti e kroz horizontalne zemljine slojeve. Obzirom da je radon inertan element, ne stupa u hemijsku vezu sa drugim elementima, tako da može da migrira na zna ajnom rastojanju od materinske supstance. Difuzija je neizbežna, a transport njome je ograni enog dometa. U razli itim sredinama može difuzijom da pre e razli ita rastojanja, me u kojima postoji ogromna razlika. Kao što se vidi iz tabele 1.10.1, u kojoj su date grani ne vrednosti koeficijenata difuzije za radon u razli itim sredinama, difuziona konstanta vode je manja 10.000 puta od difuzione konstante vazduha.

Tabela 1.10.1. Koeficijenti difuzije, D , za ^{222}Rn [49]

Sredina	D (cm^2/s)
Vazduh	10^{-5}
Obluci - krupan šljunak	$10^{-5} - 5 \cdot 10^{-6}$
Suvi pesak	10^{-5}
Vlažan pesak	$2.5 \cdot 10^{-6}$
Obradiva zemlja	$5 \cdot 10^{-7} - 2.5 \cdot 10^{-7}$
Glinasta zemlja	$8 \cdot 10^{-9}$
Voda	10^{-9}

Srednja rastojanja usled difuzionog kretanja ra unaju se preko $\sqrt{D\tau}$, gde je D koeficijent difuzije, a τ srednje vreme života izotopa. Prose no se radon pomeri 1.6 m u suvoj zemlji ($D = 5 \cdot 10^{-2} cm^2/s$ za poroznu zemlju), a samo 1.6

cm u vlažnoj zemlji ($D = 5 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$). Ova srednja difuziona rastojanja su važna u odreivanju limita efektivnog pomeranja ^{222}Rn i ^{220}Rn u odsustvu drugih transportnih mogućnosti, jer na taj način radon dolazi do temelja kuća sa lokalnog izvora ako je na dubini od 1 do 2 m u zemlji. Za grupu od 32 različitih uzorka zemljinog materijala, vrednosti difuzione konstante D su od 0.005 - 0.062 cm^2/s , sa srednjom vrednošću od 0.03 cm^2/s [50]. Zbog te prilike raznolikosti, kada su potrebne precizne vrednosti srednjeg rastojanja, treba uraditi merenja za mnoštvo uzoraka zemlje koja nas interesuje.

Difuziono kretanje u zemlji zavisno je od prisustva šupljina me usobno povezanih poroznom zemljom i stenama. Uopšte, veća poroznost omogućava opsežniji difuzioni transport. Poroznost zemlje uglavnom je povezana sa propustljivošću, koja zavisi od veličine distributivnih zrna, stepena kompaktnosti i sadržaja vode u zemlji. Iz tabele 1.10.1 se zapaža da je difuzija kroz krupni šljunak kao u vazduhu, dok je veoma mala kroz vodom natopljenom glinu. Ako su zemljine pore potpuno ispunjene vodom, zemlja ima isti difuzioni koeficijent kao voda.

Kako radon ima ograničeni život, veliki deo se raspadne posle izvestnog pređenog rastojanja. Od radona koji je emanirao sa izvora koji se nalazi duboko u zemlji, i transportuje difuzijom, 90% se raspadne posle rastojanja od 5 cm u vodi, oko 2 m u peskovitoj zemlji sa uobičajenim sadržajem vlage i 5 m u vazduhu [50]. Rastojanje koje pređe toron difuzijom je beznačajno, zato što mu je srednje vreme života 56 s.

Rastojanja do kojih može radon da migrira su od velikog interesa gde se koristi tehnika merenja koncentracije radona za istraživanje urana. U tom pogledu, važno je da se ispita uticaj strujanja radona na njegove koncentracije u zemlji. Promene u koncentraciji radona izazivane strujanjem naviše i naniže su iste, samo što se koncentracije povećavaju sa strujanjem naviše brzinom $7\sqrt{D/t}$, a smanjuju strujanjem naniže istom brzinom. Tako radon dospeva do/sa većih dubina zemlje nego kada nema strujanja. Ti uticaji su veliki na dubinama od 0.5 do 1 m gde se uobičajeno meri koncentracija radona. Na dubinama >10 m promene su beznačajne, tako da se ne mogu eksperimentalno prepoznati. Koeficijent 7 kod brzine strujanja procenjen je uporedivanjem sa podacima skupljenim [51].

Blizu površine zemlje koncentracija radona se snižava skoro do nule. On nestaje do atmosfere u toku srednjeg vremena života τ za koje, ako se kreće difuzijom, naviše pređe put $\sqrt{D\tau}$, brzinom $\sqrt{D/\tau}$. Ako je srednja vrednost difuzione konstante zemlje $D = 0.03 \text{ cm}^2/\text{s}$, onda je brzina kretanja radona $2.5 \cdot 10^{-4} \text{ cm/s}$, a srednje difuziono rastojanje u zemlji

$\sqrt{Dt} = 1.2$ m. Drugim reima, ako se kreće samo difuzijom, radon će za 5.5 dana dospeti u atmosferski vazduh iz zemlje sa 1.2 m dubine.

Forsirano strujanje zavisi od gradijenta pritiska koji može da postoji u datoj situaciji. Predložene su brojne hipoteze o poreklu takvih gradijenata, ali se samo ponekad pouzdano zna koji je mehanizam odgovoran. Zna se da gradijent pritiska može da prouzrokuje strujanje gasa ili tečnosti u meuprostoru u zemlji, a mogu da ga prouzrokuju različiti geofizički i geohemijski fenomeni, kao zemljotresi, vulkanske erupcije, podzemna eksploatacija nafte i urana. Te pojave mogu da stvore mnoštvo efekata, a glavni su emisija gasa, pritisak, i konvekcija fluida. Gasovi se uglavnom oslobađaju sa skladišta nafte, ali mogu biti stvoreni i presirani sa toplih regiona kao što su vulkani [52]. U vulkanima, mnogi gasovi kao CO_2 , H_2S , SO_2 , H_2 podesni su za transport radona, koji mogu dopreći do površine na mnogo načina. Veliki temperaturni gradijent i velika degazacija su uopšte uobičajeni fenomeni unutar vulkanskog grotla. Stoga se radon i prenosi konvekcijom i transportuje.

Kada dospe u podzemnu vodu koja je bila u vezi sa vulkanom, zbog toplote i H^+ transfera, radon se oslobađa. Radon se pridružuje molekulima vode preko Van der

Waals-ovih sila, koje su slabe zbog male pH vrednosti, što dovodi do njegovog oslobađanja u gasovitu fazu. Drugim reima njegova rastvorljivost u vodi se smanjuje sa povećanjem temperature.

Pritisak se može stvoriti i zbog prenapregnutosti koja prethodi zemljotresima, kao i vulkanskim erupcijama, što podstiče strujanje fluida u zemlji. Konvekcija fluida nastaje ako je značajna promena geotermalnog gradijenta i dovoljno velika propustljivost zemlje, koja zavisi od nekih lokalnih parametara [53,54]. Takve struje sa radonom mogu da donesu informacije o nalazištima urana sa dosta velikih dubina (i do 200 m). Vertikalnim strujanjem gasova ka gornjim delovima zemlje, radon se transportuje do površine gde se meri njegova koncentracija. Mesta sa povećanom koncentracijom radona na površini Zemlje su potencijalna nalazišta urana. Stoga se jedna od metoda za prospekciju urana zasniva na određivanju lokacija sa anomalno povećanom koncentracijom radona. Ova metoda istraživanja je u prednosti nad uobičajenim geološkim metodama istraživanja, kada treba bušiti nekoliko stotina metara do rudnog tela urana.

U tumačenju rezultata merenja važnu ulogu ima poznavanje geologije prostora kroz koji se transportuje radon. Faktori koji utiču na prolaženje radona uključuju karakteristiku stena, kompaktnost, poroznost [55]. Veoma kompaktne kristalne stene predstavljaju sredinu sa malom penetracijom za gas, što nije slučaj sa pešacima i stenama sa pukotinama i frakturama. Debeli sloj glinaca ne samo što loše propušta gas, već može da mu promeni pravac

kretanja. Zbog toga što i sam radijum migrira, i što se radon prenosi, naslage urana ne moraju uvek da leže vertikalno ispod lokacije detektovane anomalije radona.

Podzemne vode mogu, periodi nim podizanjem nivoa da premeste rude urana, tako da na novoj lokaciji bude više ruda nego na mestu porekla nalazišta. Prethodno mesto mineralizacije i novo stvaraju dve oblasti izvora radona sa istog rudnog tela. Sa potpuno alkalnim vodama, kao što je u aktivnim karstnim prostorima, radijum ^{226}Ra , isto kao kalcijum, barijum i stroncijum, može lako da se transportuje. U takvim okolnostima, tehnika merenja radona ne daje prave informacije o nalazištima urana. I neke lokalne strukture, kao razliiti slojevi, pukotine ili razlomi mogu biti uzrok pogrešne detekcije nalazišta rude urana na osnovu merenja radona.

Pogrešne informacije o rudnom telu urana mogu biti i zbog lokalnih izvora alfa zračenja (uran ili torijum) prisutnih blizu dozimetara, koji mogu abnormalno da povećaju koncentraciju radona. Radi predostrožnosti, pre postavljanja dozimetara sa detektorom, treba detektovati γ aktivnost u cilju ukazivanja na lokalno prisustvo urana.

U svim slučajevima transporta radona zemljinim gasom, radon je krajnje mala komponenta gasa ($37.4 \text{ Bq/m}^3 = 0.7 \cdot 10^{-8}$ litara Rn/litar). Znači, radon putuje kao minorna komponenta zemljinog gasa, u porećenju sa kiseonikom, azotom, ugljen dioksidom, itd. Procenjeno je da brzina transporta radona ne može da bude veća od $(4-6) \cdot 10^{-3} \text{ cm/s}$. Sa tom brzinom može da pređe 3 - 5 m dnevno [55,56,57]. Ako je koncentracija urana u zemlji 1 ppm, a leži preko rudnog tela, tada je koncentracija urana od 2.000 ppm i koje je na dubini od 120 m, anomalija radona je trostruka kada je brzina radona $4 \cdot 10^{-3} \text{ cm/s}$, a petostruka kada je brzina radona $6 \cdot 10^{-3} \text{ cm/s}$, u odnosu na koncentraciju radona koju je stvorilo rudno telo.

Povećane koncentracije radona često se nalaze iznad zona fraktura stena, gde se joni urana ili radijuma rastvoreni u podzemnoj vodi nataložili na površinu pukotina, odakle raspadom radijuma emanira radon. Na tim mestima su povećani nivoi CO_2 i često helijuma. Ovim gasovima bi mogao radon da se transportuje do površine zemlje [58]. Potpuno je jasno da se radon transportuje sa vazduhom iz pukotina i pukotina u karstnim prostorima. Vazduh se transportuje van površine zbog promene pritiska i temperature. U nekim zemljama, u švarcajskoj, Irskoj, Velikoj Britaniji, Pensilvaniji u SAD, zgrade na karstu imaju problema sa radonom [59,60]. Iako je koncentracija radona u vazduhu mala, velika količina vazduha može da prođe u zgradu u direktnom kontaktu sa površinom ispod, što dovodi do velike koncentracije radona. Zemljin vazduh može da se transportuje u zgradu duž odvodnih kanala, različitih otvora i pukotina, često i zbog toga, što je manji pritisak u zgradi u odnosu na atmosferski i u zemlji.

U zemlji, blizu površine, strujanje vazduha može biti izazvano fluktuacijama atmosferskog pritiska i zbog vremenskih prilika, kao što su vetar, prokapanje vode, topljenje snega.

2 RADON I NJEGOVI PRODUKTI RASPADA U ATMOSFERSKOM VAZDUHU

Napuštaju i zemlju, gas radon se razređuje sa atmosferskim vazduhom do beznačajnih vrednosti već na visini od pola metra nad zemljom. Obično se navode nivoi 8 - 14 Bq/m³. Srednja sadržina u vazduhu blizu površine zemlje približno je 1 atom u cm³ vazduha. Ima izuzetaka potvrđenih merenjem. Meteorološki uslovi mogu doprineti da se sa mesta na kojem je radon napustio zemlju raznosi samo difuzijom njegovih atoma. U uslovima intenzivnog premeštanja vazduha, struje raznose radon gas sa mesta napuštanja zemlje, dovode i na nekim mestima do koncentracije od preko 100 Bq/m³. Uopšte, koncentracija u prizemnom sloju vazduha veoma je promenljiva i može da se razlikuje za nekoliko redova veličine od $4 \cdot 10^{-4}$ do 74 Bq/m³. Tako velike amplitude oscilovanja stepena radioaktivnosti svojstvene su samo za vazдушnu sredinu. Uslovi koji dovode do smanjivanja koncentracije radona, ne moraju isto da utiču i na njegove potomke u istoj sredini.

Stupaju i u vazдушnu sredinu, radon se raznosi horizontalnim i vertikalnim strujama u raznim pravcima. Ispitivanjem mehanizama rasprostiranja radona u atmosferi, bilo je zapaženo da promena koncentracije radona i njegovih potomaka u većem stepenu zavisi od vertikalnih strujanja nego od horizontalnih.

Produkti raspada radona imaju visoka adsorpciona svojstva. Na finim disperzivnim supstancama koje se nalaze u vazduhu oni se brzo "vezuju", obrazuju i radioaktivne aerosole. Ustanovljeno je da se više od 50% produkata raspada adsorbuje na aerosolima vazduha. Adsorbovani na esticama prašine, postepeno padaju na površinu zemlje, zbog čega se ne uspostavlja radioaktivna ravnoteža između potomaka i radona.

Pored radona, u prizemnim slojevima vazduha nalaze se toron i aktinon. Sadržaj torona u atmosferskom vazduhu je znatno niži od radona. Prema jednom istraživanju, nalaze se da je u vazduhu koncentracija atoma radona od 1.9 atoma/cm³, u isto vreme kada je koncentracija atoma torona manja za četiri poretka i iznosi $1.83 \cdot 10^{-4}$ atoma/cm³. I u drugim istraživanjima,

dobijena je vrednost koncentracije torona od $1.4 \cdot 10^{-4}$ atoma/cm³, što je po aktivnosti 0.74 Bq/m³. Još manji udeo u radioaktivnosti vazduha ima aktinon, usled veoma kratkog vremena poluraspada i manje rasprostranjenosti rodireljskog elementa. Prakti no, radon je osnovni izvor prirodne radioaktivnosti nižih slojeva atmosfere [10].

2.1 Promenljivost koncentracije radioaktivnih gasova u atmosferskom vazduhu

Brzina stvaranja radona, torona i aktinona u mineralima je konstantna veli ina i zavisi samo od koncentracije materinskih elemenata u tim mineralima. Me utim, proces emisije radioaktivnih gasova u atmosferu predstavlja veoma nestabilnu pojavu koja zavisi od niza uslova. Zato, bez obzira što je sadržina urana, torijuma i aktinourana u svakoj konkretnoj oblasti prakti no konstantna, i prema tome, koli ina njihovih gasovitih potomaka stvorenih u tim mineralima tako e je nepromenljiva veli ina, sadržaj u atmosferskom vazduhu varira u veoma širokim granicama vrednosti. Velika oscilovanja radioaktivnosti vazduha u jednom istom geografskom mestu, uslovljena su klimatskim faktorima, meteorološkim uslovima i nizom drugih uslova povezanih sa temperaturom, pritiskom, vlažnoš u, brzinom premeštanja vazduha, morfološkim stanjem tla itd.

Do zna ajnog smanjenja nivoa radioaktivnosti vazduha dolazi za vreme jakog dugotrajnog vetra. Naglo snižavanje nivoa koncentracije radona nastaje pri stvaranju ledenog pokriva a na površini zemlje, padanju snega ili obilnih kiša, koji ograni avaju emisiju gasova iz zemlje, a pove avaju akumulaciju radona u zemljinom vazduhu. Prema tim uslovima, mala koncentracija radona u vazduhu je u zimskom periodu i u periodu jesenjih i prole nih zale ivanja površine zemlje.

Dnevna promena koncentracije radioaktivnosti u atmosferi je složena funkcija niza uticaja, ali je suštinska promena u prizemnom sloju povezana sa nekim dominantnim procesom u datom momentu.

Kao po pravilu, maksimalne vrednosti radioaktivnosti vazduha su u no nim i jutarnjim asovima, a minimalne u popodnevnim. Takva zakonitost se dobro ispoljava u slu ajevima kada proces ekshalacije radona proti e bez bilo kakvih meteoroloških komplikacija, a raspodela radioaktivnosti vazduha je uslovljena samo turbolentnim kretanjem. Vazduh se najintezivnije premešta u popodnevnim asovima, što je posledica izjedna avanja koncentracije radona po visini, odnosno njegovo umanjenje u prizemnom sloju. Na taj na in, koncentracija radona u prizemnom sloju vazduha je u obratnoj zavisnosti od temperature.

Promena koncentracije potomaka radona u atmosferskom vazduhu ne protivi se u skladu sa promenama njegove koncentracije. Pri jakom vetru usklađeno je njihovo smanjenje koncentracija. Pri povišenoj temperaturi vazduha, kada se koncentracija radona brzo smanjuje usled pojačanih turbulencija vazduha, koncentracija radioaktivnih aerosola u prizemnom sloju unekoliko se povećava. Pri niskim temperaturama, od -20°C do 0°C , takođe se zapaža relativno povećanje radioaktivnosti aerosola atmosferskog vazduha na smanjenje fona koncentracije radona i torona. To se objašnjava kristalizacijom vodene pare na niskim temperaturama. Najveća koncentracija radioaktivnih aerosola je pri relativno velikoj vlažnosti, što stvara povoljne uslove za pojačanu kondenzaciju vodene pare i sorpciju.

Na osnovu godišnjeg ispitivanja koncentracije aerosola (produkata raspada radona i torona) u atmosferskom vazduhu pokazan je veoma nezakonomeran karakter raspodele, i samo u letnjem periodu je njihovo primetno smanjenje u vazduhu.

Suštinska razlika u radioaktivnosti vazduha je nad okeanom i kontinentom; nad okeanom je za tri poretka veličine manja od one nad kontinentima, a nekad i još manja. Nad Tihim Okeanom koncentracija radona je od $3.7 \cdot 10^{-2} \text{ Bq/m}^3$. Mala radioaktivnost vazduha je takođe u Arktičkim i Antarktičkim oblastima ($3.7 \cdot 10^{-2} \text{ Bq/m}^3$), zbog sprečavanja ekshalacije radona gustim snežnim pokrivačem.

U ovom slučaju, koncentracija radioaktivnih gasova se smanjuje zbog njihovog raspada, pre stizanja u atmosferski vazduh.

Nizom ispitivanja utvrđeno je da se sa visinom smanjuje radioaktivnost vazduha, pre svega zato što se zbog kratkog vremena života radioaktivni atomi raspadnu pre nego dostignu neku visinu.

Suštinski uticaj na koncentraciju radioaktivnih gasova u prizemnom sloju vazduha imaju temperatura i barometarski pritisak. Povišena temperatura vazduha i sniženi barometarski pritisak stvaraju povoljne uslove za emisiju radona iz zemljinog pokrivača. Povećanje koncentracije radona i torona u prizemnom vazduhu sa porastom temperature spoljašnje sredine objašnjava se njihovom lakšom emisijom iz zemlje zbog oslobađanja njenih kapilara od vlage [10].

3 Radon u zgradama

3.1 Lognormalna raspodela radona u zgradama

U otvoreni prostor radon dolazi iz zemlje sa gustinom fluksa koji zavisi od njenog geološkog sastava, nadmorske visine zemlje, disperzije u atmosferi, što je sve povezano sa meteorološkim uslovima. Na koncentraciju radona u zgradama utiče niz faktora, kao što je sadržaj radijuma u zemlji ispod zgrade, propustljivost zemlje, konstrukcioni građevinski materijali. U suterenu zgrade radon obilato ulazi sa zemljinim vazduhom kroz pukotine i otvore u strukturi kuće, posebno podova. Radon se tako lako oslobađa sa konstrukcionih materijala zgrade. Između u zgradi postoji razlika u tim faktorima koji uslovljavaju različite koncentracije radona u njima. Uspostavljena distribucija radona u zgradama je uobičajeno lognormalna. Da koncentracija radona podleže ovoj raspodeli zaključeno je na osnovu statističkih razmatranja.

Kada neki parametar zavisi od velikog broja nezavisnih faktora, može se pokazati da izmerene vrednosti tog parametra podležu "normalnoj" distribuciji. U slučaju radona u zgradama, mnogi, međusobno nezavisni faktori utiču na njegovu koncentraciju što se može predstaviti jednačinom (3.1.1):

$$Rn_{in} = Rn_{out} + A \cdot B \cdot C \dots \quad (3.1.1)$$

gde je Rn_{in} koncentracija radona u zgradi, Rn_{out} koncentracija radona van zgrade, a A , B , C , ... su faktori kao koncentracija radijuma u zemlji, propustljivost zemlje, broj i veličina ulaznih puteva radona, manji pritisak u zgradi i ventilacija zgrade. Ovi faktori određuju koliko radona ulazi u zgradu i koliko dugo ostaje. Model pretpostavlja da su ovi faktori potpuno nezavisni i multiplikativni. Jednačinu može da se preuredi u obliku

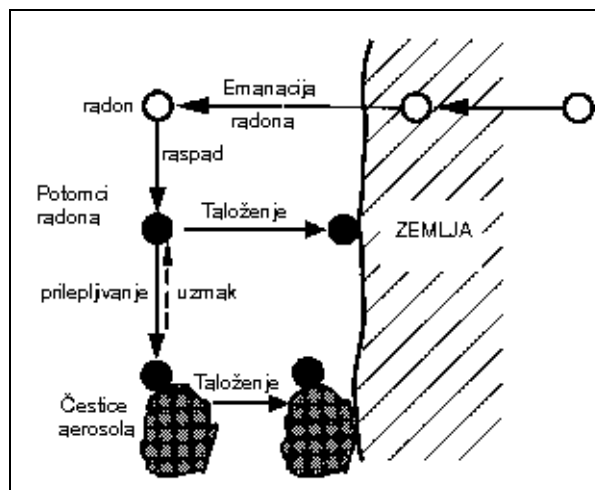
$$\ln(Rn_{in} - Rn_{out}) = \ln(A) + \ln(B) + \ln(C) + \dots \quad (3.1.2)$$

Ova jednačina usklauje uslov za normalnu distribuciju od zbira nezavisnih faktora: ako je mnogo nezavisnih delova, svaki nasumično distribuiran, onda bi $\ln(Rn_{in} - Rn_{out})$ trebalo da bude normalno distribuiran. Ekvivalentno, moglo bi se reći da je $(Rn_{in} - Rn_{out})$ lognormalno distribuiran. Ovim putem se jednostavno procenjuje razmera raspodele pomoću geometriske srednje vrednosti i standardne geometriske devijacije za svaki prostor (sa oduzimanjem prosečne koncentracije radona u spoljašnjem prostoru) preko prirodnih logaritama i računanjem srednje i standardne devijacije.

Ova distribucija je naširoko razmatrana u istraživanjima nivoa koncentracije radona u zgradama. Načeno je da su rezultati merenja u skladu sa lognormalnom distribucijom bez obzira na veličinu razmatrane oblasti [61, 62, 63].

D?C1Nivoi koncentracije aktivnosti radona i potomaka

U dezintegracionoj seriji ^{238}U , radon ^{222}Rn transformiše se u ^{218}Po , a zatim slede ^{214}Pb , ^{214}Bi , ^{214}Po , ^{210}Tl , koji imaju kra e vreme poluraspada od radona. Ravnotežna koncentracija radona i potomaka postiže se kada su vazdušne promene jednake nuli. Normalno, u prostorijama postoji neka ventilacija, kada pojedini atomi u dezintegracionoj seriji sa vazdušnim promenama napuštaju tu sredinu. Drugi osnovni procesi koji uti u na ravnotežnu koncentraciju radona i njegovih potomaka ilustrovani su na slici 3.2.1. Mehanizmi šematski pokazani na slici su pojednostavljeni i uklju uju vezivanje potomaka sa aerosolima i površinama i suprotan proces, uzmak radona i potomaka sa aerosola i površina, i raspad. Ovde su zanemareni jonizacija, elektrostati ke sile, gravitacija, strujanje vazduha i drugi važni procesi uklju uju i transport radona i njegovih produkata raspada.



Sl. 3.2.1: Osnovni procesi koji uti u na ravnotežnu aktivnost radona i njegovih potomaka [64]

Porast koncentracije aktivnosti pojedinih kratkove nih produkata raspada, A_i , od konstantnog izvora radona koncentracije aktivnosti A_0 , pokazana je na sl. 3.2.2. Sa slike je evidentno da ^{218}Po , zato što ima kratko vreme poluraspada ($\tau_{1/2} = 3$ min), relativno brzo (≈ 20 min) dostiže ravnotežu sa aktivnoš u ^{222}Rn . Koncentracije aktivnosti ^{214}Pb i ^{214}Bi (^{214}Po) približno su u ravnoteži sa ^{222}Rn posle 3h [65].

Kada bi kretanje bilo samo konstantno kretanje difuzijom, sa jednakim difuzionim koeficijentom $D = 0.06 \text{ cm}^2/\text{s}$ u vazduhu za ^{222}Rn , ^{218}Po i ^{214}Po , dobije se smanjena koncentracija aktivnosti produkata raspada radona u vazduhu blizu površine sa koje su prethodno krenuli. Njihova koncentracija aktivnosti zna ajno se smanji na rastojanju manjem od 10 cm od površine.

Neposredni potomci radona imaju ve u koncentraciju aktivnosti, nego dalji u seriji raspada, zato što se obi no ne dostigne ravnoteža izme u radona i potomaka [66].

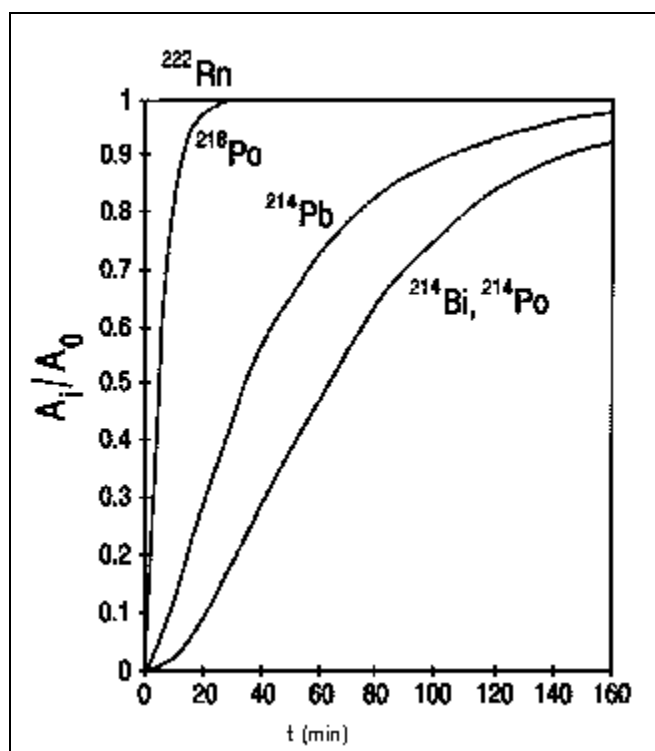
Mogu e je izra unati koncentracije potomaka radona koji su u ekvivalentnoj ravnoteži (EER - Equilibrium Equivalent Radon) sa koncentracijim radona, ako je poznat ekvivalentni faktor F. Vrednost EER u Bq/m^3 data je formulom (3.2.1): $EER = 0.104A_1 + 0.514A_2 + 0.382A_3$

$$(3.2.1)$$

gde su A_1, A_2 i A_3 koncentracije aktivnosti u Bq/m^3 pojedinih potomaka radona ^{218}Po , ^{214}Pb i ^{214}Bi respektivno. Doprinos ^{214}Po ($5.254 \cdot 10^{-8} A_4$) je zanemaren. Faktor F se definiše kao

$$F = EER / A_{Rn} \quad (3.2.2)$$

gde je A_{Rn} koncentracija aktivnosti ^{222}Rn u Bq/m^3 [67]. Faktor F zavisi od nivoa vazdušnih promena, koncentracije aerosola u vazduhu i stepena njihovog napuštanja vrstih površina u prostoriji. Ravnotežni faktori F odre eni u nekim zemljama dati su u tabeli 3.2.1 [68].



Sl. 3.2.2: Porast aktivnosti pojedinih kratkove nih produkata raspada radona,

A_i , sa izvora konstantne aktivnosti radona, A_0 . Vreme je ozna eno sa t .

Odgovaraju a vremena poluraspada ($\tau_{1/2}$):

^{222}R (3.82 dana), ^{218}Po (3.11 min), ^{214}Pb (26.8 min), ^{214}Bi (19.9 min) i ^{214}Po (164 ~s) [65].

Ako je koncentracija aktivnosti potomaka 200 Bq/m^3 onda je koncentracija aktivnosti radona $A_{\text{Rn}} = 400 \text{ Bq/m}^3$ kada je $F = 0.5$, a $A_{\text{Rn}} = 500 \text{ Bq/m}^3$ kada je $F = 0.4$.

Merenjem samo koncentracije radona ne može precizno da se odredi ekvivalentna doza (Sv) za pluća. Sam radon malo doprinosi dozi zato što je hemijski inertan gas i ne taloži se na površinu pluća. Iako se najvećim brojem metoda merenja određuje samo koncentracija radona, za procenu rizika kancera pluća i drugih kancera potrebno je znati i o produktima raspada u telu [69, 70].

Tabela 3.2.1: Ravnotežni faktori F izmereni u nekim zemljama

Zemlja	F	
	Prosečna vrednost	Interval
Kanada	0.5	0.2-0.7
Finska	0.5	0.3-0.6
Švedska	0,4	0.1-0.8
Norveška	0.5	0.3-0.8
SAD	0.5	0.3-0.8
Nemačka	0.3	0.2-0,7
Indija	0.5	0.1-1.0

3.3 Građevinski materijali radona u zgradama kao izvori radona

Svi materijali sadrže ^{238}U i potencijalni su izvori radona. To se odnosi i na prirodne i veštačke. Materijali koji sadrže visoku koncentraciju ^{238}U i ^{226}Ra su neki graniti, alumoglinici, otpadni materijali iz rudnika i pepeo. Moguće je uvek da se na različiti tipovi lokalnih stena i zemlje (glina) sa bogatim sadržajem urana koji se koriste kao građevinski materijali. Različiti glinci, alumoglinici, ili uranom bogati otpadni materijali iz rudnika su sastavni materijali betona. Prilicno doprinos nivoima koncentracije kućnog radona daju i usitnjeni materijali od stena bogatih uranom, koji se koriste kao izolacija u podovima i zidovima. Ekshalacija radona iz zrna može da se predstavi jednačinom:

$$E = cD^{-x} \quad (3.3.5)$$

gde je: E - nivo ekshalacije,

c - konstanta i

D - pre nik zrna;

vrednost x je izme u 0.5 i 1 zavisno od gustine zrna. U teorijskom ra unu za D se podrazumeva statisti ka distribucija veli ine zrna [71].

U tabelama 3.3.1 i 3.3.2 date su specifi ne aktivnosti radijuma (^{226}Ra) i torijuma (^{232}Th) u nekim gra evinskim materijalima.

Tabela 3.3.1: Sadržaj ^{226}Ra i ^{232}Th u nekim gra evinskim materijalima u Švedskoj. Ovi izotopi uti u na mogu u emisiju radona i torona iz materijala [72]

Materijal	^{226}Ra (Bq/m ³)	^{232}Th (Bq/m ³)
Opeka	40 - 164	71 - 180
Kre njak	7 - 15	2 - 10
Beton	31 - 63	46 - 127
Laki - teški beton, osnova pesak	3 - 132	2 - 157
Laki - teški beton, osnova alumoglinac	788 - 2 627	19 - 96
Gips, prirodni	2 - 9	0 - 12
Klinker od gline	89	161 - 184

Tabela 3.3.2: Sadržaj ^{226}Ra i ^{232}Th u nekim gra evinskim materijalima i pepelu u Nema koj [73]?

Materijal	^{226}Ra (Bq/kg)	^{232}Th (Bq/kg)
Granit	30-500	17-311
Opeka	10-200	12-200
Kre njak	4-41	2-20
Gips	2-70	2-100
Beton	7-92	4-71
Laki - teški beton	6-80	1-60
[ljaka od bakra	861-2000	18-78
[ljaka od kalaja	1000-1200	230-340
Pepeo od mrkog uglja	4-200	6-150

Na osnovu ispitivanja uticaja gra evinskih materijala na koncentraciju radona u zgradama u nekim zemljama (Švedska, Nema ka, Slova ka) zaklju eno je da oni ne mogu da prouzrokuju visoke nivoe radona. Isti tip gra evinskog materijala, zbog lokalnih karakteristika, ne predstavlja isti izvor radona u razli itim oblastima. U ovim zemljama ispitivanja su bila usredsre ena i na

važnost različitih građevinskih materijala (opeka, kreč, beton, drvena građa, prirodne stene) [72, 73].

U nekim posebnim situacijama, radon može biti oslobođen iz kamenih podloga koje su sastavni delovi kamina ili solarnog sistema za grejanje.

3.4 Radon iz vode za doma instva

Kako se radon rastvara u vodi, može u toj sredini da se transportuje u kuću od izvora gde se stvara iz okolnih stena i zemlje. Kako je ^{222}Rn potomak radijuma ^{226}Ra , koji se i sam rastvara u vodi, sadržaj radijuma u stenovitom tlu i zemlji igra važnu ulogu. Ako je voda iz bušenog bunara u tlu koje sadrži ^{238}U i ^{226}Ra , kao tlo sa granitom, pegmatitom, sijenitom i porfirom, očekuje se da sadrži radon.

Sadržaj radona u prirodnim vodama je različit i varira u širokim granicama. U običnim pijaćim i rečnim vodama je oko 3.7 Bq/l, u morskoj 1.1 Bq/l. Koncentracija od 0.37 Bq/l karakteristična je za jezera i reke, od 3.7-370 Bq/l za podzemne vode. Veoma visoka koncentracija radona je u nekim mineralnim banjama. Niža granica koncentracije radona u radonovim vodama je od 185- 370 Bq/l, a u veoma visokoradonovim iznad 4.450 Bq/l [10]. Voda iz arteških bunara sadrži daleko više radona, nego iz kopanih. Kopani bunari su, uglavnom, izvori vode koja se koristi u domaćinstvu i na manjim dubinama u zemlji od arteških. U tabeli 3.4.1 dat je primer u kojem se vidi razlika u koncentracijama radona i radijuma u vodama iz kopanih i arteških bunara.

Tabela 3.4.1: Koncentracije ^{222}Rn i ^{226}Ra u vodi za piće u Finskoj [45]

Snabdevanje vodom	Broj	^{222}Rn (Bq/l)	^{226}Ra (Bq/l)
Kopani bunari	690	4 - 1 600	0.004 - 0.3
Arteški bunari	570	4 - 44 000	0.004 - 7.5

Voda za opštu potrošnju ima malo radona, zato što se prethodnim odgovorajućim tretmanima u otvorenom prostoru oslobađa radon, a i zato što su izvori veliki vodeni baseni, kao što su jezera koja sadrže malo radona. Koncentracija od 37 Bq/l esto je u vodi iz arteških bunara. Ako neko dnevno pije 0.3 l vode koja sadrži 37 Bq/l ^{222}Rn , apsorpciona doza za želudac je ravna 0.02 mGy/god, a doza zračenja celog tela je 100 puta manja [10].

Tretmanom vode u prostorijama javnog vodovodnog sistema, oslobađa se radon u vazduh. U tom vazduhu, u [vedskoj, na čijoj je koncentracija radona od 20.000 Bq/m³, koji se oslobađa iz vode sa visokom koncentracijom radona. Ako je koncentracija radona u vodi 1.000 Bq/l, radon može prilikom

upotrebe da se oslobodi u vazduhu prostorije i poveća koncentraciju za 100 Bq/m³ [74].

3.5 Zemlja i stenovito tlo ispod zgrade kao glavni izvori radona

Zemlja i stene ispod zgrada su glavni izvori radona. Da bi oni bili značajni izvori, trebalo bi da je koncentracija urana u njima preko 50 ppm, posebno, ako su stene duboko dole u zemlji (dublje od 100 m). Zemlja kao produkt erozije okolnih stena, ako su bile bogate uranom, može i sama da bude izvor radona [75].

Ako je zemlja propustljiva, poput pešćara, gas radon stvoren u stenama koje leže ispod, lako se transportuje naviše kroz zemlju. Prisustvo podzemne vode, vlažna glina ili druga nepropustljiva zemlja su sredine koje manje, ili više sprečavaju transport radona naviše. Poseban doprinos izvoru radona daju zone pukotina i fraktura slojeva, preko kojih se gas efektivno transportuje naviše. Može da se desi, da preko zona fraktura problem sa radonom ima samo po neka kuća, koja leži direktno na frakturi. Uslovi, koji pored ostalih moraju biti ispunjeni, da bi kuća imala povećani nivo koncentracije radona su da nema efikasnu zaštitu od prodora gasa iz zemlje kroz različite otvore i mikropukotine. Radon se sa zemljinim vazduhom uvlači u kuću usled razlike u temperaturi, pritiska u i van stanova. Merenjem koncentracije radona u 100 kuća u SAD, ustanovljeno je da je koncentracija određena uglavnom brzinom pritanja radona. Na osnovu istraživanja evidentno je da je veća koncentracija radona u prizemnim kućama, nego u višespratnim stambenim zgradama [76]. Razlog je direktan kontakt kuća sa zemljom. Iz tabele 3.5.1 zapaža se da je preko 37% kuća sa koncentracijom aktivnosti koja premašuje 200 Bq/m³ u poređenju sa stambenim, gde je samo 11%. Kuće su bile selektirane prema građevinskom materijalu.

Tabela 3.5.1: Upoređenje nivoa koncentracije radona izmereno u stanovima (1.006 detektora) i kućama (3.268 detektora). Istraživanje je izvedeno u Švedskoj [76, 79]?

Koncentracija radona(Bq/m ³)	0 - 100	100 - 200	200 - 300	300 - 400	> 400
Kuća (%)	27.5	35.8	20.1	9.2	7.3
Stanovi (%)	48.7	38.0	10.6	0.02	0.01

3.6 Distribucija radona unutar kuće

Obično je izvor radona pojava u jednoj sobi, ili u jednom delu kuće, odakle se strujanjem vazduha prenosi u druge delove kuće. Dovoljno je da jedna vrata budu stalno otvorena, ili zatvorena, da bi se uticalo na transport radona unutar kuće. Dospevanjem u prostor u kome nema ventilacije, ili je veoma mala, tu i ostaje. Konvekcijom, vazduh struji od nižih prema višim delovima kuće. Konvekcija je značajna ako je temperatura u kući jednaka, ili viša od one spolja.

Između različitih prostorija u kući, podrum ima najveću koncentraciju radona, zato što se najmanje provetrava i što je u direktnom kontaktu sa zemljom, koja je najsnažniji izvor [77]. Na osnovu istraživanja u [vedskoj, koje obuhvata 488 kuća, odnos srednjih vrednosti distribucije radona na spratu i u prizemlju je 0.8, koje potvrđuje činjenicu da je veća koncentracija radona u nižim delovima kuće [76]. To se može zaključiti i iz istraživanja u Nemačkoj, gde su rezultati dati u tabeli 3.6.1. Ako je zemlja ispod kuće izvor radona, na spratu će biti povećana koncentracija u slučaju da tamo nema nikakvih provetravanja.

Tabela 3.6. 1: Srednji nivoi radona na različitim spratovima u kućama u Nemačkoj iz nacionalnog istraživanja [78]

Sprat →	Podrum	Prizemlje	Prvi sprat	Drugi sprat	Spolja
Srednji nivoi radona (Bq/m ³)	52	43	38	33	14

3.7 Kratkovremene promene nivoa radona u kući

Kako je radon gas, ventilacija u kući je važan faktor koji utiče na njegove nivoe. Vremenske prilike spolja utiču da efekti ventilacije budu različiti. Ako je spolja mala brzina vetra, nema vazдушnih promena u kući i to uslovljava povećanje koncentracije radona [79].

Nivoi radona u kući zavisiće od navika njenih stanovnika, od toga koliko drže otvorene prozore i vrata, uključuju ventilator u kuhinji itd. Sagorevanjem petroleuma ili nafte u otvorenom sistemu, troši se svež vazduh, što podrazumeva smanjenje pritiska u kući. Zbog nižeg pritiska dolazi do intenzivnijeg prodora zemljinog vazduha u kuću, a sa njim i radona. Kada je

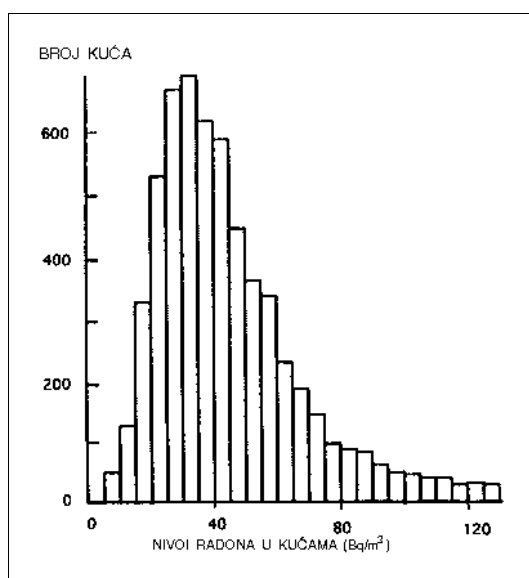
provetravanje povremeno sa kratkotrajnim otvaranjem prozora, posle zatvaranja prozora, koncentracija radona naglo poraste u sobi. Konvekciona kretanja vazduha su glavni razlog takvih ekstremnih promena nivoa radona u zimskom periodu [79].

3.8 Opšta istraživanja u svetu o radonu u zgradama

Distribucija radona u svim tipovima kuća je poput one na sl. 3.8.1. Retko je koncentracija radona jednaka nuli, a od srednje vrednosti prema manjim i većim, distribucija ide koso. Na osnovu srednje vrednosti ne može se zaključiti o intervalu izmerenih vrednosti u regionu, ali se može proceniti rizik kancera pluća za stanovništvo.

U mnogim zemljama su urađena regionalna, ili nacionalna merenja koncentracije radona u zgradama. Širi pregled tih merenja izvedenih u velikom broju zemalja, sa godinom merenja, tipom istraživanja, vremenom eksponiranja, srednjim koncentracijama radona i maksimalnim vrednostima dat je u tabeli 3.8.1 [81].

Merenjima izvedenim u SAD u kojima je obuhvaćeno 55.000 slučajno odabranih kuća u 38 država unutar 225 oblasti, u dvadeset i četiri oblasti je nađeno da je najveća koncentracija radona: sa 78.4 % kuća iznad 74 Bq/m^3 ; 57.3 % iznad 148 Bq/m^3 ; 31.7% iznad 296 Bq/m^3 ; i 8.6 % iznad 740 Bq/m^3 . Krajnje visoka vrednost, preko 410 kBq/m^3 , izmerena je u suterenu kuće u državi Arizona, koja je imala nepokriveni izvor vode u suterenu, u kojoj je koncentracija radona bila 3.5 MBq/m^3 [82, 83].



Sl. 3.8.1: Tipična distribucija radona u 5970 domova u Nemačkoj.

Sredina vrednosti je 40 Bq m⁻³ i aritmetička vrednost je 50 Bq m⁻³ [80]

U Saksoniji i susednoj oblasti Turingiji u Nemačkoj, ima 40 podzemnih i površinskih rudnika koji su tokom godine u eksploataciji. Više od 200.000 rudara je bilo izloženo zračenju koje je ekvivalentna efektivna doza od 0.3-30 Sv/god. Kasnije, preduzimanjem odgovarajućih mera zaštite smanjeni su ovi nivoi na 10-40 mSv/god. Otpadni materijali iz rudnika, koji pokrivaju prostor od 10 000 km², zrače radon u otvoreni prostor od 1-3 kBq/m³. Kuće koje su napravljene od otpadnog materijala i stena iz rudnika imaju koncentraciju radona od 30-150 kBq/m³ [84].

Istraživanjima izvedenim u Švedskoj nađeno je da oko 1% kuća ima koncentraciju iznad 800 Bq/m³, a najviša izmerena vrednost je 40.000 Bq/m³. Istraživanja o uticaju nivoa radona u zemljinom gasu na koncentraciju radona u zgradama, pokazala su da koncentracija u zgradama varira od 20-20.000 Bq/m³ ako su nivoi radona u zemljinom gasu od 5.000 Bq/m³ u pesku, do 700.000 Bq/m³ u zemlji bogatoj alumoglinima [85]. Takođe, istraživanja o radonu u drugim zemljama, pokazala su da u nekim domovima nivoi koncentracije radona imaju visoke vrednosti, što može da se vidi iz tabele 3.8.1.

Tabela 3.8.1: Koncentracije radona u domovima [81]

Zemlja Provincija/region	Godina Istraživanja	Tip Istraživanja	Vreme Zračenja	Br. Dom.	Konc.		Bq/m ³ MV	GSD
					AS	GS		
Alžir	1987	Istraž.	60 dana	50	32		137	-
Argentina	1990	Prelim.		180	32	31	127	2.0
Australija	1990	Nacion.	1 god.	3 413	12	8.7	423	2.1
Austrija,Salz.	1980	Lokal.	Krat. vr.	729	-	15	190	-
Belgija	1991	Nac.	6 mes.	450	48	-	4000	-
Kanada	1997-80	Nac.	Krat. vr.	13413	34	14	1724	3.6
Kan.N.Škotska	1990	Reg.	3 mes.	719	108	-	5920	3.6
Kina, 7 ob.	1989	Reg.		3945	24	20	378	2.2
Kina, Sevan	1990	Reg.		1967	19	17	170	1.7
Kina, Šenžen	1986	Reg.		69	16	14	54	2.0
Čehoslovačka	1982	Nac.	Krat. vr.	1200	140	-	20000	-
Danska	1985	Nac.	6 mes.	496	47	29	560	2.2
Egipat	1991	Nac.		329	90		24	-
Finska	1982	Nac.	1 mes.	8150	90	64	-	3.1
Francuska	1988	Nac.	60 dana	3006	62	41	4687	2.7
Nemačka (SR)	1984	Reg.	3 mes.	5970	49	40	-	1.8
Nem., Kotbus	1989	Reg.	3 mes.	67	35	23	153	2.5
Nem., Saksonija i Turingija	1990	Istraž.	3 dana	5000	270	190	11500	2.4
Nemačka (SR)	1991	Reg.	3 dana	1040	57	34	3100	2.9
Gana, Legon	1990	Istraž.	9 mes.	25			340	-
Grčka	1988	Istraž.	6 mes.	73	52		492	-
Hongkong	1991	Reg.		140	41		140	-
Indija	1991	Istraž.	3 mes.	1028	57	42	214	2.2
Indonezija	1991	Istraž.		165	12		120	-
Iran, 4 grada	1988	Istraž.	90 dana	121	82	-	3070	-

Irska	1987	Nac.	6 mes.	736	-	37	1700	-
Italija	1991	Nac.	1 god.	2250	80	62		1.9
Kuvajt	1988	Istraž.	1 god.	69	41		103	-
Japan	1990	Nac.	1 god.	6000	29	23		1.6
Luksemburg	1991	Nac.	1 god.	2500		65		-
Holandija	1982-84	Nac.	1 god.	1000	29	24	118	1.6
Novi Zeland	1988	Nac.	1 god..	717	20	18	94	-
Norveška	1991	Nac.	6 mes	7500	60	30		-
Pakistan	1991	Istraž.	2.5 mes..	50	30		83	-
Poljska	1991	Prel.	1 god..	345	38		568	-
Portugalija	1991	Nac.	4 mes.	4200	81	37	2795	-
Švedska	1980-82	Nac.	2 ned.	512	108	62	3310	-
Švedska	1990-91	Nac.	3 mes.	1360	108	56	3900	-
Španija	1991	Nac.	.	1700	86	43	15400	3.7
Švajcarska	1991	Nac.	2.5 mes'.	1600	70	-	3000	-
Sirija, 2 oblasti	1990	Istraž.	6 mes.	77	20		72	-
Velika Brit.	1991		3 mes.	96000	20	-	10000	-
SAD	1991	Nac.	1 god.	5967	46	25		3.1
SAD, Njujork	1988	Reg.	1 god.	2043	42	26	1420	2.7
Srednja vredn.					42	30		2.2

U tabeli skraćene oznake imaju sledeće značenja: AS-Aritmetička Sredina, GS - Geometriška Sredina, MV-Maksimalna Vrednost, GSD-Geometriška Standardna Devijacija.

U mnogim zemljama su na osnovu geo-meteoroloških i građevinskih uslova usvojene maksimalno dozvoljene vrednosti koncentracije radona i njegovih potomaka (interventni nivoi) u domovima. U tabeli 3.8.2 navedene su te vrednosti, kao i preporuke od različitih međunarodnih organizacija.

Tabela 3.8.2: Neke nacionalne i međunarodne preporuke interventnih nivoa radona [86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95]

Zemlja	Interventni nivoi	
	Stare zgrade (Bq/m ³)	Novе zgrade (Bq/m ³)
Australija	200	200
Austrija	400	400
Kanada	800	-
Danska	200	200
Nemačka	250	250
Irska	200	200
Švedska	200	70
Velika Britanija	200	200
Sjedinjene Države	150	150
ICRP-65	200-600	200-600
IAEA-BSS	200-600	200-600

CEC	400	200
WHO	200-300	200-300

ICRP - International Commission on Radiological Protection

IAEA-BSS - International Atomic Energy Agency– Basic Safety Standard

CEC - Commission of European Communities

WHO - World Health Organization

Od prirodno radioaktivnih izvora vodi poreklo prose na godišnja efektivna ekvivalentna doza od 2,4 mSv, od čega, doza od 1.2 mSv potiče od radona i njegovih produkata raspada u otvorenom i zatvorenom prostoru. Ostatak je od kosmičkog zračenja, kosmogenih radionuklida, zemnog gama zračenja i radionuklida u telu.

Saglasno UNSCEAR-u 1993 g. (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation) [81], prose na koncentracija radona je 40 Bq/m^3 u zatvorenom prostoru, tzv. indoors radon, i 10 Bq/m^3 u otvorenom prostoru (outdoors). Korišćenjem ekvivalentnih faktora od 0.4 za indoors i 0.8 za outdoors, izlazi da je prose na efektivna ekvivalentna koncentracija (EEC) 16 Bq/m^3 u domovima i 8 Bq/m^3 u spoljašnjoj sredini. Na osnovu faktora konverzije, saglasno UNSCEAR-u, efektivna ekvivalentna doza je (E) $9 \cdot 10^{-6} \text{ mSv/h}$ od 1 Bq/m^3 efektivne ekvivalentne koncentracije (EEC) radona u spoljašnjem i unutrašnjem prostoru, i $1.05 \cdot 10^{-3} \text{ mSv/god.}$ za udahnuti radon od 1 Bq/m^3 rastvorenog u tkivima. Doza od 1.2 mSv/god. izražavata je na sledeći način:

a. Za produkte raspada radona u spoljašnjoj sredini:

$$E_{\text{out}} = 8 \text{ Bq/m}^3 \cdot 9 \cdot 10^{-6} \text{ mSv h}^{-1}/\text{Bq m}^{-3} \cdot 0.2 \cdot 8760 \text{ h/god} = 0.13 \text{ mSv/god.}$$

b. Za produkte raspada u zgradi:

$$E_{\text{in}} = 16 \text{ Bq/m}^3 \cdot 9 \cdot 10^{-6} \text{ mSv h}^{-1}/\text{Bq m}^{-3} \cdot 0.8 \cdot 8760 \text{ h/god.} = 1.0 \text{ mSv/god.}$$

c. Za radon udahnut u unutrašnjoj i spoljašnjoj sredini:

$$E_{\text{in;\&out}} = [(10 \text{ Bq/m}^3 \cdot 0.2) + (40 \text{ Bq/m}^3 \cdot 0.8)] \cdot 1.5 \cdot 10^{-3} \text{ mSv god.}^{-1}/\text{Bq m}^{-3} = 0.051 \text{ mSv/god}$$

Efektivna ekvivalentna doza E je:

$$E = E_{\text{out}} + E_{\text{in}} + E_{\text{in\&out}} = (0.13 + 1.0 + 0.051) \text{ mSv/god.} = 1.18 \text{ mSv/god.}$$

U radnom i stambenom prostoru ovek prose no provodi 80% svoga vremena, a 20% van; otuda u prethodnom radu 0.8 · 8760 h/god. i 0.2 · 8760 h/god.

Kombinacijom lokalnog geološkog sklopa, konstrukcionih materijala, tipa kuća i ventilacije, u nekim kućama prosečna doza može biti prevaziđena deset i nekoliko stotina puta.

4. Metode merenja koncentracije radona

4.1 Tehnike merenja radona

Detekcija i merenje koncentracije radona može da se obavi neposredno, merenjem samog radona, ili indirektno, preko njegovih potomaka. Radon i neki njegovi potomci (^{218}Po , ^{214}Po , ^{210}Po) raspadaju se putem emisije alfa čestica. Potomci ^{214}Pb , ^{214}Bi , ^{210}Pb i ^{210}Bi su beta emiteri sa pratećim gama zračenjem. Shodno tome, detekcija i merenje koncentracije radona mogu da se urade detekcijom i merenjem α , β i γ zračenja pri njihovoj interakciji sa različitim materijalima, koji se koriste u odgovarajućim tehnikama merenja.

Postoje različite tehnike merenja, prema tome da li se meri samo radon, njegovi potomci, ili zajedno. U svim tim slučajevima alfa, gama ili beta zračenja su detektibilni fenomeni. Jedna od sledećih tehnika može biti iskorišćena za detekciju:

- nuklearna emulzija
- adsorpcija
- scintilacija vrste faze
- scintilacija tečnosti
- gama spektrometrija
- beta monitoring
- vrste detektori nuklearnih tragova
- elektrometar ili elektrooskop
- jonizaciona komora
- površinska barijera detektora
- termoluminescencija fosfora
- electret.

Sve ove tehnike mogu da se koriste u otvorenom i zatvorenom prostoru, posebno, ili njihovom kombinacijom. Više od 300 mogu ih kombinacija koriste naučnici i inženjeri. Glavna njihova karakteristika je adaptacija prema gasnoj prirodi radona.

Brojanje scintilacija u gasnoj fazi bilo je odavno poznato i opširno korišćeno u ove svrhe. Može da se postigne osetljivost od nekoliko Bq/m³ [94]. Procena o nivou radona može da se obavi i brojanjem scintilacija u tenoj fazi [95, 96].

Spektroskopija može uopšte da se koristi za indirektno merenje koncentracije radona preko njegovih potomaka, preko njihove alfa emisije (alfa spektroskopija) i gama emisije (gama spektroskopija).

Jonizacione komore i proporcionalni brojači su najšire korišćene tehnike merenja zračenja, kojima se određuje koncentracija radona iz uzoraka uzetih iz atmosfere.

Merenja koncentracije radona treba obaviti na mestu koje nas interesuje, posle prethodnog testiranja, tako što se detektor ostavi dovoljno dugo, da bi se izbegle moguće fluktuacije radona zavisne od raznih faktora. Merenje može biti kontinualno, ili diskretno sa uzimanjem uzoraka sa mesta merenja. Može biti pasivno, kada se meri koncentracija radona pod prirodnim uslovima, tj. radon ulazi u detekcionu zapreminu difuzionim kretanjem; ili aktivno kada se pumpanjem vazduh uvodi u, ili kroz detektorski sistem.

Kako su istraživanja u ovoj disertaciji obavljena metodom vrstih detektora tragova, kojom se pomoću pasivnih dozimetara sa plastičnim detektorom tipa CR-39 meri gustina tragova α čestica iz raspada ²²²Rn, bitno je detaljnije opisana pasivna tehnika.

4.2 Pasivna tehnika

Postigne cirkulacijom vazduha kroz krivudave kanale na putu prema detektoru [Š98]. Ovakva geometrija obezbeđuje da su tragovi u detektoru pod nekim konstantnim uglom. Zatim, mogu da se koriste membrane od različitih materijala. Korišćenjem takvih membrana obezbeđuje se da ne prodre vlaga u dozimetar, jer su i same nepromorne. Drugi put za diskriminaciju torona je različita osetljivost samih detektora [99, 100, 101, 102, 103].

Među različitim detektorima koji mogu da se koriste za merenje koncentracije radona bitni su vrste detektora nuklearnih tragova, electret detektori, termoluminescentni fosfori, elektronski detektori vrstog stanja (fotodiode, siloksanke barijere) i neki elektrometri i komore jona.

4.3 vrsti detektori tragova nuklearnih estica

Po etkom šestdesetih godina 20 veka po inju da se koriste vrsti dielektri ni detektori za detekciju naelektrisanih estica. Ve duže vreme se koriste i za merenje koncentracije radona. Detekcija naelektrisanih estica pomo u ovih detektora izvodi se preko tragova estica koji nastaju njihovim prodorom kroz detektor. To su zapravo ošte enja koja estice izazivaju u strukturi detektora duž pravca kretanja. Teške naelektrisane estice (od protona naviše) ostavljaju tragove u dielektri nom medijumu, što nije slu aj sa β esticama i γ zracima. Ti latentni tragovi su dugove ni na normalnoj temperaturi i nižoj od 0°C , a mogu da preživei na visokim temperaturama zavisno od medijuma i intenziteta jonizacije (tj. linearne gustine od razmeštenih elektrona).

Razli iti dielektrici imaju razli iti prag registracije. Samo one estice koje na datom delu putanje imaju linearni gubitak energije (dE/dx), ili nivo primarne jonizacije, ili prag iznad kriti ne vrednosti, bi e registrovane u datom dielektri nom medijumu. Polimeri (plastika) imaju daleko manji prag registracije nego staklo i kristali minerala. Mogu da zabeleže tragove jona sa malim atomskim brojem z kao što su α estice. Me u njima se najviše koristi polimer CR-39 (polyallyl diglycal carbonate), koji može da zabeleži i tragove protona. Kristalni detektori (minerali) mogu da zabeleže tragove jona sa visokim atomskim brojem z ($z > 10$) [104].

Tragovi naelektrisanih estica u detektoru (dijametra nm i manji) mogu da se vide elektronskim mikroskopom. Posmatranje tragova estica pomo u elektronskog mikroskopa vezano je sa nekim problemima; mala površina promatranja, dugotrajno promatranje, iš ezavanje tragova zbog zagrevanja detektora elektronskim snopom. Zato se koristi opti ki mikroskop, ali se prethodno detektori obra uju hemijski, potapanjem u odre eni hemijski reagens (NaOH, KOH, HF, HNO₃). Eksponirani detektor drži se u rastvor odre eno vreme na odre enoj temperaturi. Tom prilikom hemijski reagens prodire u ošte ene strukture izazvane prodorom estice, pri emu dolazi do nagrivanja duž ošte enja. Na taj na in se izazivaju tragovi sve dotle dok ne postanu vidljivi u opti kom mikroskopu (reda μm , ili više).

Plasti ni polimeri se koriste daleko najviše kao detektori nuklearnih tragova u svim poljima, od geologije, ili u okolini sa visokom temperaturom (u nuklearnim reaktorima), u nuklearnoj fizici, u merenju radona, akceleratoru za osnovna istraživanja. Njihova jednostavnost, mala veli ina, mogu nost integralnog merenja u dužem periodu, su najve i razlozi njihove popularnosti. Nije im potreban dodatni izvor energije, a za

njihove detekcione osobine bitan je kvalitet materijala od koga su izra eni.

Organski materijali koji se koriste za detekciju radona i njegovih potomaka su nitrat celuloze (LR 115, CN 85), bisphenol-A polikarbonat (Leksan, Makrofol) i polialil diglikol karbonat (CR-39, Columbia Resin-1939). Diglikol karbonat-PADC poznat kao CR-39 je daleko najosetljiviji materijal koji je sklon da zabeleži alfa estice u širokom energetskom intervalu[105].

Za merenje koncentracije radona mogu da se koriste razne elektri ne metode i ure aji. Pomo u ovih brzih instrumentalnih metoda ne može se pouzdano locirati mesto sa pove anom koncentracijom, zbog dnevne varijacije koncentracije radona u zavisnosti od meteoroloških fluktuacija (promene barometarskog pritiska, temperature, koli ine padavina, ja ine vetra, vlažnosti itd.) i drugih fluktuacija (geotermalni efekti, plima i oseka, seizmi ko podrhtavanje tla, podzemne vode). Takve varijacije su mogu e u toku od nekoliko asova do nekoliko dana. Metoda vrstih detektora tragova prevazilazi ove teško e jer meri integralno koncentraciju aktivnosi radona u periodu mnogo dužem od vremena meteoroloških i drugih fluktuacija.

4.4 Odziv dozimetra na radon (Detekciona mo dozimetara za radon)

Za dozimetriske svrhe je važno da se meri prose na koncentracija radona i njegovih potomaka u vremenu koje bi trebalo da bude duže od fluktuacija radona prouzrokovanih uslovima okoline. Pomo u vrstih detektora tragova dobija se integralna gustina tragova (trag/cm^2). Ako je gustina tragova uniformna preko površine detektora, gustina tragova ρ se definiše sa [106]:

$$\dots = \frac{K}{\tau_r} \int_0^{t_e} C(t) dt \quad (4.4.1)$$

gde je: τ_r - srednje vreme života radona (5.5 dana),

$C(t)$ - koncentracija radona u vazduhu oko detektora (atom/m^3) u vremenu,

τ , i τ_c - vreme eksponiranja detektora.

Oznaka K je za odziv dozimetra (kalibracioni koeficijent) i definiše se sa: [109]

$$K = \frac{\int_r d...}{C(t) dt} = \frac{1}{A_0(t)} \frac{d...}{dt} \quad (4.4.2)$$

gde je $A_0(t)$ koncentracija aktivnosti radona (Bq/m^3) u vremenu t , i $d.../dt$ nivo gustine stvorenih tragova ($\text{trag/cm}^2\text{h}$). Jedinica za K je $\text{trag cm}^{-2}/\text{kBq m}^{-3}\text{h}$. Dimenziono ova jedinica je jednaka dužini [cm]. Može se reći da je 1 cm deo tragova prema raspadu od geometrijski određenog odziva K jednak vrednosti od $3.6 \text{ trag cm}^{-2}/\text{kBq m}^{-3}\text{h}$.

Za dozimetar sa dugim vremenom eksponiranja ($t \gg 3\text{h}$), odziv bi mogao da se aproksimira sa:

$$K = \frac{...}{A_0 t_e} \quad (4.4.3)$$

gde je $\overline{A_0}$ prosečna koncentracija aktivnosti radona.

Uopšte, totalna gustina tragova $...(\vec{r})$ na mestu posmatranja u detektoru definisanom sa \vec{r} je rezultat integriranih svih emisija koje mogu da stvore vidljive tragove [107, 108, 111]:

$$...(\vec{r}) = \sum_i ..._i^v(\vec{r}) + \sum_i ..._i^p(\vec{r}) \quad (4.4.4)$$

gde je $..._i^v(\vec{r})$ gustina raspoređenih tragova od izotopa radona i polonijuma (Rn i Po) prisutnih u vazduhu, a $..._i^p(\vec{r})$ je gustina tragova stvorenih od produkata raspada radona zalepljenih na samom detektoru i na unutrašnjim zidovima dozimetra. Za svaku α emisiju nukleida prisutnih u vazduhu može da se napiše izraz koji se često upotrebljava u praksi [107, 109, 110, 111]: [97, 111, 112, 113]

$$..._i^v = \frac{1}{4} A_i t_e R_i \cos^2 \theta_{c,i} \quad (4.4.5)$$

gde je: A_i - homogena distribucija koncentracije aktivnosti u vazduhu nezavisne od vremena,

t_e - vreme eksponiranja detektora,

R_i - domet α čestica i -tog nukleida u vazduhu,

$\theta_{c,i}$ - je kritični ugao za nagrizanje detektora.

Uzimanjem u računa da je ugao θ manji od 20° u CR-39 detektoru pod normalnim uslovima nagrizanja, dobije se za 10% manja detekciona moć. Za detektor LR 115, $\theta \approx 40^\circ$, detekciona moć se smanji za 40%. Pored toga, detektor LR 115 je osetljiv na α estice samo sa energijom od 2-4 MeV. Uzimanjem u obzir ovih podataka, a na osnovu jednačina (4.4.3) i (4.4.5) dobijaju se teorijski limiti za odziv za nepokrivene detektore, K_0 , za radon ^{222}Rn :

$$\begin{aligned}
 K_0 &= \frac{1}{4} R_0 \cos^2 20^\circ = 0.88 \text{ cm} = 3.2 \text{ tr.cm}^{-2} / \text{kBq m}^{-3}\text{h}; \text{ za CR-39} \\
 K_0 &= \frac{1}{4} \cos^2 40^\circ [R(4 \text{ MeV}) - R(2 \text{ MeV})] = 0.28 \text{ cm} = 1 \text{ tr. cm}^{-2} / \text{kBq} \\
 &\text{m}^{-3}\text{h}; \\
 &\text{za LR 115}
 \end{aligned}
 \tag{4.4.6}$$

5. Rezultati istraživanja

U disertaciji je obuhvaćen veliki broj merenja koncentracije aktivnosti radona u individualnim zgradama, stanovima i u rudnicima Trepče. Područja istraživanja bila su sledeća: Brezovica, Priština i njena okolina (Gračanica, Kosovo Polje, Dobrotin, Gušterica, Obilić), obronci Skopske Crne Gore (Gornja Stubla), i Kosovsko Pomoravlje. Na sl. 5.1 na karti Kosova i Metohije obeležena su mesta merenja. Na osnovu ovih merenja određene su prosečne koncentracije radona kojima je izloženo stanovništvo, a takođe su identifikovane pojedine kuće i mesta sa povećanom koncentracijom, kao i njihovi uzroci.



Sl. 5.1 Karta Kosova i Metohije na kojoj su upisana mesta merenja

Očena, data u izveštaju UNSCEAR [49] da udisanje kratkožive ih produkata raspada gasa radona čini oko 50% efektivne ekvivalentne doze koju čovek prima od svih prirodnih izvora zračenja, a da te doze pod određenim uslovima mogu biti drastično prevaziđene i opasne po zdravlje ljudi, izazivaju veliku pažnju naučnika i stručnjaka u svetu. Udisanje kratkožive ih produkata raspada gasa radona dovodi do ozračivanja organa za disanje i može prouzrokovati rak pluća. U tom pogledu su posebno opasni kratkožive i produkti raspada radona ^{222}Rn , koji se vezuju za aerosole i tako

dospevaju u pluća, gde emisijom α čestica razaraju ćelije tkiva [50], [112]. Zato se poslednjih godina posećuje posebna pažnja ispitivanju koncentracije radona u vazduhu stambenih i radnih prostora, gde se uvek prosečno provodi 80% svoga vremena.

Ekshaliraju i sa zemljine površine u slobodnu atmosferu, radon se rasejava u njoj pod uticajem vertikalne konvekcije i turbulentnog mešanja, radi čega mu se koncentracija smanjuje. Međutim, kada dospe u zatvoreni prostor, mogu da se ostvare njegove velike koncentracije. Istraživanja pokazuju da su osnovni izvori radona u zgradama tlo ispod zgrada i građevinski materijali. Zbog specifičnosti stambene gradnje i geološke podloge, u SAD se tlo ispod zgrade smatra osnovnim uzrokom povećanih koncentracija radona u zgradama, a u Evropi se znatna pažnja poklanja i građevinskom materijalu.

U mnogim zemljama (Americi, Japanu, Švedskoj, Finskoj, Nemačkoj, Italiji i dr.) formirani su nacionalni projekti koji obuhvataju merenja radona i njegovih potomaka u zatvorenom prostoru: stambenim jedinicama, radnim prostorijama, dečjim ustanovama, odnosno u prostorijama gde ljudi najduže borave. Na osnovu tih merenja računaju se godišnje doze zračenja koje prima stanovništvo.

Na teritoriji Kosova i Metohije merenja koncentracije radona u zatvorenim prostorima nikada nisu rađena, a i na teritoriji Srbije nisu rađena sistematska merenja.

Preliminarna merenja su bila u slučajno odabranim zgradama, a nakon identifikacije zgrada sa povećanom koncentracijom u nekim mestima ponovljena su sa postavljanjem detektora na mestu merenja četiri puta godišnje, odnosno tokom cele godine.

5.1 Metoda merenja

Istraživanja su obavljena integralnom metodom primenom vrstih detektora tragova α čestica iz raspada radona $^{222}\text{Rn}_{86}$. Korišćeni su pasivni dozimetri instituta "Jožef Štefan" iz Ljubljane u kojima su postavljeni detektori tipa CR-39 čija je površina bila oko 1 cm^2 [113]. Detektor se postavlja na jednom kraju dozimetra, a suprotni kraj, ulaz, pokriven je sa poroznim papirom, koji kao filter sprečava ulaz toron i produktima raspada radona. Unutar dozimetra radon se raspada kroz niz produkata stvarajući i gustinu tragova u detektoru koja je proporcionalna zračenju gasa radona.

Koncentracija aktivnosti radona A je određivana po formuli

$$A = \frac{N - N_0}{K \cdot t} \quad (5.1.1)$$

gde je: ρ – gustina tragova α - estica iz raspada radona (broj tragova na cm^2 površine detektora),

ρ_0 - fon detektora (broj tragova na cm^2 površine detektora pre eksponiranja),

K - odziv dozimetra (kalibracioni koeficijent) i

t - vreme eksponiranja detektora.

Na mestu merenja detektori su ostajali dva do tri meseca.

Tragovi α estica u detektoru izazivani su metodom hemijskog nagrivanja u 6.25 N rastvoru NaOH pri temperaturi od 70°C u vremenu od 2-3 sata. Pri navedenom režimu nagrivanja, za dati detektor i dozimetar, koeficijent K ima vrednost od $6.19 \text{ trag cm}^{-2} / \text{kBq m}^{-3}\text{h}$.

Gustina tragova ρ u detektoru određivana je pomoću optičkog mikroskopa sa uveličanjem 16×20 . Posmatrana su 100 polja na jednom detektoru sa ukupnom površinom od 0.15 cm^2 . Pomeranjem detektora sa pokretnim postoljem, posmatran je mikroskopom pomoću mrežice oblika kvadrata. Postolje je pomerano duž x-ose i duž y-ose toliko da se ne preklapa novo polje posmatranja sa prethodnim.

Greška pri merenju koncentracije aktivnosti radona računava se prema formuli

$$\Delta A = A \sqrt{\Delta t_{\dots}^2 + \Delta t_K^2 + \Delta t_t^2} \quad (5.1.2)$$

gde su: A - koncentracija aktivnosti radona

$$\Delta t_{\dots} = \frac{1}{\sqrt{N}} + 0.004; N \text{ je broj tragova } \alpha \text{ estica u detektoru}$$

$$\Delta t_K - \text{greška kalibracionog koeficijenta (za CR-39 } \Delta t_K = 0.18)$$

$$\Delta t_t - \text{greška zbog transporta dozimetra}$$

$$\Delta t_t = \frac{\text{vreme trajanja transporta}}{\text{vreme trajanja ekspozicije}}$$

Detektori su postavljeni u dozimetar na mestu merenja, a tokom transporta štiti se eni aluminijumskim folijama.

5.2 Rezultati merenja i diskusija

Rezultati istraživanja dati su u narednim tabelama u kojima su:

t - vreme eksponiranja detektora,

ρ - gustina tragova α estica (trag/cm^2) na detektoru,

A - koncentracija aktivnosti radon (Bq/m^3)

AS - aritmetička sredina

GS - geometrijska sredina

GSD - geometrijska standardna devijacija

5.2.1 Koncentracija aktivnosti radona u rudnicima "Trep e"

Merena je najpre koncentracija radona u jami "Trep a" rudnika Stari Trg, zatim u rudnicima "Novo Brdo", "Kišnica" i "Ajvalija". Osnovni razlozi što je istraživanje započeto u rudniku Stari Trg bili su:

- pretpostavka da će tamo biti lokacija sa anomalno povećanom koncentracijom radona, jer je to veliki rudnik olovno cinkane rude sa 11 horizonata, od kojih se poslednji nalazi na dubini od oko 700 m ispod površine ulaza u jamu
- veliki broj radnika koji duže vreme boravi u jami, a koji bi životi bili ugroženi u slučaju anomalno povećane koncentracije radona.

I ostali rudnici su rudnici olovno-cinkane rude. U vremenu istraživanja bili su delimično u eksploataciji.

U tabeli 5.2.1.1 su rezultati merenja koncentracije radona na različitim horizontima u jami "Trep a" rudnika Stari Trg, u tab. 5.2.1.2 su koncentracije radona u rudniku "Novo Brdo" i u 5.2.1.3 u rudnicima "Kišnica" i "Ajvalija".

Tabela 5.2.1.1: Koncentracija radona u jami "Trep a" rudnika Stari Trg.

Hor	Det Br.	t (dan)	(tr/cm ²)	A (Bq/m^3)	Hor	Det Br.	t (dan)	(tr/cm ²)	A (Bq/m^3)
I	13	69	1770	176 ± 36	IX	68	65	320	33 ± 8
	15	69	887	88 ± 19		65	65	600	62 ± 14
III IV	4	91	7786	556 ± 111	X	61	37	138	26 ± 8
	7	78	2924	252 ± 50		70	37	242	44 ± 12
	8	78	6338	648 ± 98		74	37	152	28 ± 8
VI	87	37	4315	785 ± 160	XI	3	91	446	33 ± 8
	83	37	173	31 ± 9		60	56	200	21 ± 8
	9	73	4023	371 ± 73		56	37	434	88 ± 12

VII	5	78	2538	219 ± 44	VIII	25	91	400	29 ± 8
	10	78	4241	366 ± 72		2	91	2378	176 ± 36
	12	78	880	76 ± 16		82	37	180	32 ± 9
	74	37	7497	1360 ± 262		77	37	1238	225 ± 48
	75	37	1237	225 ± 48		79	65	5160	506 ± 98
	72	37	160	29 ± 8		85	37	4440	807 ± 158
	AS								
GS								124	
GS D								4.7	

Tabela 5.2.1.2: Koncentracija radona u rudniku "Novo Brdo"

Horizont	Det. br.	t (dan)	(tr./m ²)	A (Bq/m ³)
IV	1	22	1046	320 ± 69
	2	22	1933	581 ± 11
	3	22	3833	1172 ± 233
	4	22	1046	320 ± 69
	5	22	1046	320 ± 69
V	6	49	9213	1266 ± 243
	7	49	20493	2815 ± 532
	8	49	3520	484 ± 96
VII	9	49	7480	1028 ± 198
	10	49	7673	1054 ± 203
	11	49	7969	1094 ± 211
AS				954
GS				762
GSD				1.9

Tabela 5.2.1.3: Koncentracija radona u jamama “Kišnica”, “Badovac” i “Ajvalija”.

Jama	Horizont	Det. br.	t (dan)	ρ (tr/cm ²)	A (Bq/m ³)
Kišnica	III	17	35	477	90 ± 19
		23	35	380	73 ± 16
		20	35	340	65 ± 17
		8	35	1367	263 ± 51
		4	35	220	42 ± 10
Badovac	III	18	35	567	109 ± 23
		19	31	2100	456 ± 86
		14	31	2773	602 ± 113
Ajvalija	VIII	3	31	2406	522 ± 98
AS					

5.2.2 Distribucija radona u stambenim objektima

Brezovica i okolina

Prvi rezultati merenja odnose se na šire područje Brezovice, u privatnim kućama, vikendicama, u hotelu "Narcis" i okolnim mestima. Dozimetri sa detektorima su postavljeni obično u dnevnom boravku, u prizemlju, na vitrinama i na rastojanju 20-30 cm od najbližeg zida. U tabeli 5.2.2.1 su rezultati merenja koncentracije aktivnosti radona (A) za period od 12 marta do 12 maja (t = 61 dan), aritmetička srednja vrednost (A.S), geometrijska srednja vrednost (G.S) i geometrijska standardna devijacija (G.S.D).

Tabela 5.2.2.1: Koncentracija aktivnosti radona u kućama na Brezovici i okolini.

Mesto	Det. br	t (dan)	tr/cm ²	A (Bq/m ³)
Brezovica	1	61	207	23 ± 6
	2	61	1060	117 ± 25
	3	61	533	59 ± 13
	4	61	633	70 ± 16
	5	61	527	58 ± 13
	6	61	400	44 ± 15
	7	61	873	96 ± 18
	8	62	423	46 ± 10
	9	62	304	33 ± 8
	10	62	221	24 ± 6
	11	62	497	54 ± 12
	12	62	516	56 ± 12
	13	62	470	51 ± 11
	14	62	847	92 ± 22
Štrpce	15	61	720	100 ± 22
	16	61	733	81 ± 18
	17	61	1013	112 ± 24
	18	61	347	38 ± 9
	19	61	560	62 ± 11
	20	62	1113	110 ± 22
	21	62	709	77 ± 16
	22	62	930	101 ± 20
	23	62	378	41 ± 9
	24	62	543	59 ± 13
Berevce	25	62	249	27 ± 7
	26	61	206	23 ± 6
	27	61	87	10 ± 3
	28	62	203	22 ± 6
Popovci	29	61	547	60 ± 13
	30	62	497	68 ± 14
AS				57
GS				52
GSD				1.8

Tabela 5.2.2.2 Koncentracija aktivnosti radona u kućama na Brezovici i okolini.

Mesto	Det. br.	t (dan)	(tr/cm ²)	A (Bq/m ³)
Jažinci	1	61	407	45 ± 11
	2	62	341	37 ± 9
Vrbeštica	3	61	267	29 ± 7
	4	61	467	61 ± 14
	5	62	110	12 ± 4
	6	62	525	57 ± 12
Sevce	7	61	766	85 ± 18
	8	61	313	34 ± 8
	9	61	560	62 ± 11
	20	62	691	75 ± 15
	21	62	405	44 ± 10
	22	62	589	64 ± 13
Gotovuša	23		813	88 ± 18
	24		513	55 ± 17
	25	62	1060	115 ± 31
	26	62	333	36 ± 8
	27	62	400	43 ± 10
	28	62	367	40 ± 9
	29	62	1140	124 ± 24
	30	62	507	55 ± 12
	31	62	728	79 ± 16
	32	62	580	63 ± 13
	33	62	1022	11 ± 22
	34	62	387	42 ± 9
	35	62	1096	119 ± 23
	36	62	516	56 ± 12
	37	62	1040	113 ± 22
	38		617	67 ± 14
AS				65
GS				53
GSD				1,7

Na osnovu ovih preliminarnih merenja može se zaključiti da je koncentracija aktivnosti radona u zgradama na ovom području ispod limita ustanovljenih od strane međunarodnih organizacija (ICRP-65, IAEA-BSS, CEC, WHO), koji su navedeni u tabeli 3.8.2. Maksimalna vrednost je 124 Bq/m³, a to je manje i od maksimalno dozvoljene vrednosti preporučene u SAD od 150 Bq/m³.

Priština i okolina

U tabeli 5.2.2.3 su date koncentracije aktivnosti radona u nekim stanovima u Prištini. Merenja su obavljena u stanovima na različitim spratovima

Tabela 5.2.2.3: Koncentracija radona u stanovima Prištine.

Det. br.	t (dan)	ρ (tr./cm ²)	A (Bq/m ³)
1	63	683	73 ± 16
2	61	468	52 ± 12
3	59	412	47 ± 11
4	62	506	55 ± 13
5	62	257	28 ± 7
6	62	396	43 ± 10
7	62	423	46 ± 11
8	63	318	34 ± 8
9	67	617	62 ± 13
10	57	647	76 ± 17
11	62	870	93 ± 20
12	67	694	70 ± 16
13	60	267	30 ± 8
14	60	233	25 ± 7
15	61	213	24 ± 6
16	60	1060	119 ± 26
17	128	1590	84 ± 17
18	65	653	68 ± 15
19	65	336	35 ± 9
20	67	147	15 ± 4
21	61	306	33 ± 8
22	61	172	19 ± 5
23	61	109	12 ± 4
24	61	426	47 ± 10
25	61	1033	114 ± 23
26	61	435	48 ± 11
27	61	408	45 ± 10
28	61	353	39 ± 9
29	61	208	23 ± 6
30	61	263	29 ± 7
31	61	362	40 ± 16

32	61	144	49 ± 11
33	61	480	53 ± 11
34	61	607	67 ± 14
35	61	643	71 ± 15
36	61	843	93 ± 19
37	61	553	61 ± 14
38	61	498	55 ± 13
39	61	725	80 ± 17
40	61	625	69 ± 15
41	61	743	82 ± 17
AS			54
GS			48
GSD			1.6

Kao što se vidi iz tabele, maksimalna vrednost koncentracije je 119 Bq/m³. Srednja vrednost merenih koncentracija je 54 Bq/m³ što je manje i od srednje vrednosti merenja na Brezovici. To potvrđuje istraživanja drugih autora, koja su navedena u jednom od prethodnih poglavlja, da su veće koncentracije radona u kućama koje su u direktnom kontaktu sa zemljom, nego u stanovima u višespratnim zgradama. U tabeli 5.2.2.4 su rezultati merenja u nekim kućama u Gračanici.

Tabela 5.2.2.4: Koncentracija aktivnosti radona u nekim kućama u Gračanici.

Det. br.	t (dan)	ρ (tr./cm ²)	A (Bq/m ³)
1	82	1300	107 ± 23
2	81	1000	83 ± 18
3	81	987	82 ± 18
4	67	667	67 ± 15
5	67	1293	130 ± 28
6	79	1886	174 ± 36
7	67	1073	108 ± 23
8	30	681	73 ± 15
9	63	2508	268 ± 54
10	30	1096	264 ± 52
11	79	2453	209 ± 42
12	63	4193	448 ± 88
13	30	1506	338 ± 70
14	79	3145	268 ± 53
15	63	4417	472 ± 52
16	63	3921	419 ± 83
17	63	1469	472 ± 52

18	63	1769	189 ± 39
19	63	1432	153 ± 32
AS			211
GS			176
GSD.			1.8

Povećana je koncentracija u kućama koje su u jednoj ulici, pod rednim brojevima 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15 i 16. Zato su ponovljena merenja u kućama te ulice pod rednim brojevima 9, 12, 15 i 16 i u kući pod rednim brojem 19 koja je u drugoj ulici. Rezultati tih merenja su u tabeli 5.2.2.5. Detektori su na mestu merenja ostajali po tri meseca, četiri puta, tj tokom cele godine. Na osnovu tih rezultata evidentno je da je koncentracija u kući pod rednim brojem 15 iznad prirodnog fona. Prosečna vrednost koncentracija je veća u jesenjem i zimskom periodu (III i IV zamena) u odnosu na proleće i leto (I i II zamena).

Tabela 5.2.2.5: Koncentracija radona u kućama u Gračanici merena tokom cele godine.

Broj kuće	I zamena (Bq/m ³)	II zamena (Bq/m ³)	III zamena (Bq/m ³)	IV zamena (Bq/m ³)	\bar{A} (Bq/m ³)
9	118	195	172	199	171
12	14	84	398	241	184
15	422	233	420	400	369
16	101	110	87	156	114
19	170	79	145	98	123
AS (Bq/m ³)	165	140	244	219	192

U tabeli 5.2.2.6 su navedene vrednosti koncentracije aktivnosti radona u nekim kućama u Kišnici i Badovcu. Detektori su ostajali na mestu merenja u vremenu od 8 juna do 28 avgusta.

Tabela 5.2.2.6: Koncentracija aktivnosti radona u Kišnici i Badovcu.

Red. Br. det.	t (dan)	ρ (tr./cm ²)	A (Bq/m ³)
1	81	573	48 ± 11
2	81	580	48 ± 11
3	81	220	18 ± 5
4	81	293	24 ± 6
5	81	220	18 ± 5
6	81	493	40 ± 9
7	81	1613	134 ± 27
8	81	633	53 ± 12
9	81	686	57 ± 12

10	81	517	43 ± 9
11	81	421	35 ± 8
12	81	325	27 ± 6
13	81	939	78 ± 16
14	81	265	22 ± 5
15	81	349	29 ± 7
16	81	481	40 ± 9
AS			45
GS			39
GSD.			1.5

Zgrada u kojoj je postavljen detektor pod red. br. 1 je blizu ulaza za jamu "Ajvalija", pod brojevima 2, 4, 7 i 8 su zgrade bliže jami "Kišnica", a pod brojevima 3, 5 i 6 su privatne kuće u Badovcu, a ostala merenja se odnose na poslovni prostor ovih rudnika. Dozimetar sa detektorom pod brojem 6 bio je u podrumu montažne kuće od betonskih blokova. Pored toga što su ove kuće na pogodnoj geološkoj lokaciji, jedan od razloga ovako malih vrednosti je i letnji period merenja, kada su provetravanja intenzivna.

U nekim naseljima u okolini Prištine preliminarni rezultati merenja su iznad prirodnog fona, što se vidi iz tabela 5.2.2.7 i 5.2.2.9

Tabela 5.2.2.7: Koncentracija radona u Kosovom Polju.

Det. br.	t (dan)	ρ (tr./cm ²)	A (Bq/m ³)
1	62	1307	142 ± 30
2	63	1486	159 ± 33
3	64	4212	443 ± 87
4	64	1930	203 ± 41
5	71	4626	438 ± 86
6	64	1462	154 ± 32
7	71	3186	303 ± 60
8	71	5286	501 ± 97
9	71	1297	123 ± 24
10	71	2088	198 ± 38
11	71	2204	209 ± 39
12	71	1709	162 ± 31
13	71	4514	428 ± 79
14	71	5833	553 ± 102
15	71	3903	370 ± 77
16	71	3217	305 ± 57
A. S			293
G. S			261

G. S. D			1.6
---------	--	--	-----

Susedne kuće sa detektorima pod brojevima 4 i 5 su od različitog građevinskog materijala; Kuća pod brojem 4 zidana je od cigala, a pod brojem 5 od betonskih blokova, pa je to glavni razlog različitih koncentracija radona u njima. Kako je koncentracija radona i u drugim kućama iznad prirodnog fona koje nisu u neposrednoj međusobnoj blizini, ponovljena su merenja tokom cele godine u kućama pod brojevima 2, 3, 4, 5 i 6. Rezultati tih merenja prikazani su u tabeli 5.2.2.8. Detektori su zamenjivani četiri puta, a svaka zamena se odnosi na godišnje doba, po evodproleće.

Tabela 5.2.2.8: Koncentracija radona u Kosovom Polju merena tokom godine.

Broj kuće	I zamena (Bq/m ³)	II zamena (Bq/m ³)	III zamena (Bq/m ³)	IV zamena (Bq/m ³)	\bar{A} (Bq/m ³)
2	80	32	145	134	98
3	513	346	645	471	491
4	113	63	132	247	139
5	170	315	691	680	464
6	212	275	601	583	418
AS(Bq/m ³)	218	206	443	423	322

Na osnovu povećane koncentracije i u letnjem periodu može se zaključiti da je razlog atmosferski vazduh u kome je dim iz elektrane u Obiliću. Pravac vetrova je najčešće takav da usmerava prašinu i dim iz elektrane prema ovom naselju. U takvim uslovima provetravanje je bez efekta. Kako su takvi rezultati merenja i u drugim sezonama, izvor radona je i tlo, odnosno da su ispod naslage lignita, što je verovatno razlog povećanoj koncentraciji radona u kućama i još u nekim naseljima blizu Prištine, što se vidi iz tabele 5.2.2.9.

Tabela 5.2.2.9: Koncentracija aktivnosti u kućama u Gušterici i Dobrotinu

Mesto	Det. br.	t (dan)	ρ (tr/cm ²)	A (Bq/m ²)
Gušterica	1	73	1960	180 ± 37
	2	73	820	85 ± 18
	3	73	1833	169 ± 34
	4	73	1233	114 ± 24
	5	73	998	92 ± 18
	6	73	1334	123 ± 39
	7	73	2006	185 ± 57
	8	73	1703	157 ± 49

Dobrotin	9	73	4100	378 ± 74
	10	73	4720	435 ± 85
	11	73	3484	321 ± 63
	12	73	10180	652 ± 126
	13	73	4099	378 ± 70
	14	73	5303	489 ± 90
	15	73	3384	312 ± 58
	16	73	6583	607 ± 111
A.S				292
G.S				239
G.S.D				1.7

Uzroke povećanja koncentracije u ovim kućama treba dalje istraživati, uključivanjem većeg broja kuća i godišnjim praćenjem promene koncentracije radona. Ova merenja se odnose na zimski period.

U Obiliću su urađena merenja u nekoliko kuća, a ti rezultati su navedeni u tabeli 5.2.2.10.

Tabela 5.2.2.10. Koncentracija radona u kućama u Obiliću.

Det. br.	t (dan)	ρ (tr./cm ²)	A (Bq/m ³)
1	72	1346	126 ± 24
2	60	4689	526 ± 95
3	64	506	39 ± 9
4	72	666	62 ± 21
5	72	1073	100 ± 20
6	72	1048	98 ± 19
7	72	3385	223 ± 42
8	72	717	67 ± 15
9	72	1016	95 ± 19
10	72	1669	156 ± 31
11	72	4845	453 ± 85
12	72	2128	199 ± 39
13	72	749	70 ± 15
14	72	631	59 ± 13
15	72	1818	170 ± 33
A.S			171
G.S			123
G.S.D			1.9

Iako je Obili u neposrednoj blizini termoelektrane, koncentracija radona u ovim kućama je manja, nego u Kosovom Polju, Dobrotinu i Gušterici. Najveća vrednost od 526 Bq/m^3 je u kući i od betonskih blokova, a u susednoj kući i od cigala koncentracija je od 126 Bq/m^3 .

Gornja Stubla

Preliminarna merenja koncentracije radona u kućama u mestu Gornja Stubla pokazala su da su povećane koncentracije u kućama zidanih od kamena sa lokalnog brda Stublova e.

Gornja Stubla se nalazi u severnom regionu Skopske Crne Gore, u podnožju Stublova e. Selo leži preko paleogenih stena, donjeg kredastog fliša i granita. Teren Stublova e je na injen od slojeva magmatskih vulkanskih stena dijabaza (Jura), donjeg kredastog fliša, paleogenih naslaga trahita i trahitnog tufa. Slojevi dijabaza su prisutni sa magmatskim i sedimentnim stenama, odnosno, bogati su glinom, peskom, laporom i kredom. U delovima dijabaza trahiti prodiru duboko. Pojas fliša je sastavljen od peska sa umetnutom glinom i laporom. U pesku prevlađuje materijal koji je od razorenih slojeva dijabaza. Jugo-zapadni deo, prema Gornjoj Stubli, teren Stublova e je od paleogenih nanosa na injenih od konglomerata sivog lapora i gline. Površina sa svih strana Stublova e je od naslaga masivnih stena breče, koje proizvode sekundarni mineral urana autinit. [to se tiče hidrografije, postoji veliki broj potoka koji struje radijalno od Stublova e prema Bina koj Moravi.

U stenama sa ovog terena određivana je koncentracija urana metodom fisionih fragmenata, gde je u nekim uzorcima određena koncentracija urana bila reda 10^{-5} g/g , maksimalna vrednost od 38.8 ppm. Na osnovu rezultata radiografije urana osnovano je pretpostavljeno da su to područja sa povećanom koncentracijom urana. Kasnije je rađena regionalna i detaljna prospekcija urana na Stublova i na osnovu koncentracije radona ^{222}Rn dobivene preko njegove α aktivnosti u zemljinom gasu. Blizu seoskih kuća, u stenama Stublova e koncentracija urana je reda 10^{-5} g/g [3].

U Gornjoj Stubli najveći broj kuća je zidan od kamena sa tog područja. Prva merenja koncentracije radona izvršena su u kućama koje su građene samo od tog kamena, u kućama od kamena, cigala i betona i u kućama od cigala i betona. Rezultati merenja su dati u tabeli 5.2.2.11.

Tabela 5.2.2.11: Prvi rezultati merenja koncentracije radona u kućama od različitog građevinskog materijala u Gornjoj Stubli.

Gradska kuća . materijal	Det. br.	t (dan)	ρ (tr./m ³)	A (Bq/m ³)
--------------------------	----------	---------	------------------------------	------------------------

Ku e od kamena	1	62	9266	1006 ± 183
	2	62	5560	603 ± 111
Ku e od kamena, cigala i betona	3	62	2146	233 ± 45
	4	62	2460	235 ± 44
Ku a od cigala i betona	5	62	1400	151 ± 29
A.S				445
G.S				347
G.S.D				1.9

O igledno je da su najve e koncentracije u ku ama od kamena, manje u onim od kamena, betona i cigala i najmanja u ku i od cigala i betona. Ova merenja se odnose na period od. 8 decembra do 8 februara.

Slede a merenja obavljena su u vremenu od 24 aprila do 27 maja. i rezultati merenja su u tabeli 5.2.12. Dozimetri sa detektorima postavljeni su u ku ama od razli itog gra evinskog materijala, a u jednoj ku i na razli itim spratovima i u podrumu.

Detektori od 1 do 7 bili su u jednoj ku i. Detektori 1 i 2 su eksponirani u 2 podruma, samo što podrum sa detektorom 1 ima direktan izlaz napolju, a iz podruma 2, prolazi se prvo kroz podrum 1. Na razliku u koncentraciji radona verovatno uti e efekat provetravanja. Detektori od 3 - 5 su bili postavljeni u prizemlju, samo što je broj 3 u prostoriji iznad podruma 2, 4 iznad podruma 1. Detektor pod brojem 5 je bio u hodniku. Dozimetri sa detektorima 6 i 7 postavljeni su u toj ku i, u sobama na spratu.

Na primeru ove ku e se vidi da su izvori radona i tlo ispod zgrade i gra evinski materijal; najve e su koncentracije u podrumu, a ne postoji neka bitna razlika u prizemlju i na spratu. Detektori pod brojem 1 iz tabele 5.2.2.11 i 3 iz tabele 5.2.2.12 postavljeni su na istom mestu, samo što je iz tabele 5.2.2.11 u zimskom periodu, a iz tabele 5.2.2.12 u prole e, kada je manja koncentracija radona zbog provetravanja.

Tabela 5.2.2.12: Koncentracija radona u ku ama od razli itog gra evinskog materijala, na razli itim spratovima u Gornjoj Stubli.

Gra . materijal ku e	Det. br.	t (dan)	ρ (tr/cm ²)	A (Bq/m ³)
Ku a od kamena: podrum	1	33	3667	748 ± 148
	2	33	10 193	2079 ± 398
prizemlje	3	33	1913	390 ± 80
	4	33	1846	377 ± 78
	5	33	960	196 ± 43
sprat	6	33	1747	356 ± 74

	7	33	1613	329 ± 68
Prizemlje u drugoj ku i od kamena	8	33	1886	385 ± 79
Ku a od kamena, cigala i betona:				
prizemlje	9	33	1280	261 ± 55
sprat	10	40	1426	240 ± 50
Ku a od cigala:				
Prizemlje	11	33	1040	212 ± 46
sprat	12	33	493	101 ± 24
	13	33	426	87 ± 21
AS				639
GS				309
GSD				1.8

U ku ama od cigala i betona manja je koncentracija radona, nego u ku ama zidanih od lokalnog materijala, što je opet potvrda uticaja primenjenog materijala koji potie sa Stublova e. U ovim ku ama je ve a koncentracija u prizemlju (det. br. 11) nego na spratu (12, 13), što ukazuje na glavni izvor iz zemlje.

U slede oj tabeli (5.2.2.13) su rezultati merenja u Gornjoj Stubli u vremenu od 21aprila do 18 jula, a u tabeli 5.2.2.13 od 30 oktobra do 9 januara, uglavnom u ku ama od kamena.

Tabela 5.2.2.13: Koncentracija radona u ku ama u Gornjoj Stubli.

Det. br.	t (dan)	ρ (tr/cm ²)	A (Bq/m ³)
1	87	3 947	305 ± 56
2	87	2 660	206 ± 39
3	87	3 373	261 ± 49
4	87	11 440	885 ± 161
5	87	5 180	401 ± 74
6	87	4 920	381 ± 70
7	87	4 033	312 ± 58
8	87	11 033	854 ± 155
9	87	5 540	429 ± 79

10	87	1 420	110 ± 21
11	87	1 287	100 ± 21
12	87	3 987	308 ± 57
AS			448
GS			312
GSD			1.9

Tabela 5.2.2.14: Koncentracija radona u kućama u Gornjoj Stubli.

Det. br.	t (dan)	ρ (tr/cm ²)	A (Bq/m ³)
1	71	9 513	902 ± 165
2	71	19 653	1 863 ± 338
3	71	24 860	2 357 ± 427
4	71	5 860	556 ± 103
5	71	10 273	974 ± 178
6	71	6 277	594 ± 109
7	71	12 820	1 215 ± 221
8	71	22 580	2 141 ± 388
9	71	5 947	564 ± 104
10	71	29 573	2 804 ± 507
AS			1 397
GS			1 174
GSD			1.8

Prose na godišnja koncentracija radona u svim ovim kućama od kamena je preko 700 Bq/m³, što predstavlja anomalno povećanu koncentraciju. Maksimalna vrednost je od 2804 Bq/m³.

Na osnovu ovih merenja mogu se pratiti i sezonske promene koncentracija. Veće su koncentracije u jesenjem i zimskom periodu (tabele 5.2.2.14 i 5.2.2.11), a manje u letnjem. Glavni razlog ovih razlika je provetravanje, koje je intenzivno u letnjem periodu. Provetranjem se smanje koncentracije oko 3 puta. To se može zaključiti na osnovu nekih merenja urađenih na istom mestu. Detektori iz tabela 5.2.2.13 i 5.2.2.14 pod rednim brojem 1 postavljeni su na istom mestu, gde su izmerene vrednosti od 305 Bq/m³ i 902 Bq/m³; ili vrednosti od 885 Bq/m³ iz tabele 5.2.2.13 i 2357 Bq/m³ iz tabele 5.2.2.14. Obe prostorije su u prizemlju. Isto može da se zaključiti na osnovu odnosa srednjih vrednosti iz tabela 5.2.2.14 i 5.2.2.13. Međutim, u podrumu su vrednosti praktično nepromenjene; 2079 Bq/m³ (tabela 5.2.2.12) i 1863 Bq/m³ (tabela 5.2.14) su koncentracije radona u istom podrumu. To ukazuje na male fluktuacije u difuziji iz zemlje, a nešto veća vrednost u toplijem periodu je što su povoljniji uslovi za ekshalaciju radona iz zemlje. Odnos vrednosti koncentracija u podrumu i prizemlju je preko 5 u toplom

periodu (2079 : 390, tabela 5.2.12) i oko 2 u zimskom vremenu (1863 : 902, tabela 5.2.14).

Na osnovu svih ovih merenja u kućama u Gornjoj Stubli može se zaključiti da je koncentracija radona u kućama od primenjenog lokalnog materijala anomalno povećana. Izvori radona su i tlo ispod kuća i građevinski materijal. Veći je uticaj građevinskog materijala, jer u kućama od cigala koje nisu sa lokalnog terena, u prizemlju su manje koncentracije radona, nego u kućama od lokalnog materijala. To se može zaključiti i na osnovu 3 puta manjih vrednosti koncentracija radona u toplijem periodu, jer se provetranjem značajno utiče na smanjenje koncentracije kada je glavni izvor građevinski materijal.

Kosovsko Pomoravlje

U tabeli 5.2.2.15 su navedeni rezultati merenja u nekim kućama u mestima Budriga, @egra, Parteš i Gnjilane u Kosovskom Pomoravlju.

Tabela 5.2.2.15: Koncentracija radona u kućama nekih mesta u Kosovskom Pomoravlju.

Det. br.	t (dan)	ρ (tr/cm ²)	A (Bq/m ³)
1	62	1073	117 ± 23
2	62	2433	264 ± 50
3	62	947	103 ± 21
4	62	120	13 ± 3
5	62	220	24 ± 6
6	62	1806	196 ± 37
7	62	487	53 ± 11
8	62	1160	126 ± 25
9	62	580	63 ± 13
10	62	413	45 ± 10
11	62	171	124 ± 24
12	62	267	193 ± 37
13	62	231	167 ± 32
14	62	30	22 ± 6
15	62	75	54 ± 12
16	62	217	157 ± 30
17	62	87	63 ± 13
18	62	160	116 ± 23
19	62	65	47 ± 10
20	62	84	61 ± 13
A.S			100.4

G.S			77
G.S.D			2.4

Na mestu merenja detektori su bili u vremenu od 4 jula do 4 septembra. Kuće u kojima je koncentracija radona preko 100 Bq/m^3 pravljeni su od materijala koji

poti se sa tih lokacija. To su uglavnom starije kuće od onih u kojima su koncentracije radona manje od 100 Bq/m^3 . S obzirom da su merenja obavljena u letnjem periodu, za kuće pod brojevima 2, 6 i 12 može se reći da imaju koncentraciju radona iznad prirodnog fona. U blizini ovih sela su brda Kosmajka i Visoča za koje se stene zna da su sa povećanom koncentracijom urana [113]. Treba nastaviti sa istraživanjem uključivanjem većeg broja kuća i na lokaciji bliže Kosmajki i Visoči.

6 Zaključak

Rezultati merenja su prezentirani u tabelama, u kojima su data pojedina merenja, njihova aritmetička i geometrijska srednja vrednost i geometrijska standardna devijacija. Srednja vrednost je značajna za identifikaciju lokacija sa povećanim zračenjem. Geometrijska srednja vrednost pomnožena i podeljena geometrijskom standardnom devijacijom daje interval od 68.3% izmerenih vrednosti. Do neslaganja ima samo u nekim tabelama (tabele 5.2.2.3, 5.2.2.4, 5.2.2.7 i 5.2.2.14) gde su naknadno unešene neke vrednosti.

Na osnovu rezultata izmerenih koncentracija radona u rudnicima Trepča može se zaključiti da je neznatna. Srednje vrednosti su: 150 Bq/m³ u jami "Trepča a", 953 Bq/m³ u rudniku "Novo Brdo", i 246 Bq/m³ u jamama "Ajvalija" i "Kišnica".

U jami "Trepča a" obavljena su merenja skoro na svim horizontima na različitim dubinama, i do 700 m ispod površine zemlje. U drugim rudnicima, koji su bili delimično u eksploataciji u vreme merenja, takođe su postavljeni dozimetri sa detektorima na različitim horizontima. Ni u jednom rudniku nije primećena zavisnost koncentracije od dubine, što upućuje na zaključak da radon ne dolazi iz dubine Zemlje. Zapaža se zavisnost koncentracije od sastava stena koje se nalaze u okruženju postavljenog dozimetra. Vrednosti koncentracije radona tamo gde se u okruženju nalaze škriljci, koji obično imaju veći i sadržaj urana.

Na osnovu dobijenih rezultata može se uočiti da je rudnik Novo Brdo sa nešto većom koncentracijom radona, gde je maksimalna vrednost od 2815 Bq/m³.

U stambenim objektima su urađena plinimernina merenja, a na osnovu njih ponovljena su u kućama sa povećanom koncentracijom. Kod plinimernih, dozimetri sa detektorima su na mestu merenja ostajali od 60-80 dana, a u kućama iznad prirodnog fona ponovljena su merenja tokom cele godine. Detektori su zamenjivani četiri puta, a svaka zamena se odnosi na jedno godišnje doba.

U kućama na širem području Brezovice i okolnih mesta, koncentracija aktivnosti radona je ispod limita ustanovljenih od međunarodnih organizacija. Prosečna vrednost je oko 50 Bq/m^3 , a maksimalna od 124 Bq/m^3 manja je i od maksimalno dozvoljene vrednosti preporučene u SAD od 150 Bq/m^3 . Slični su rezultati u stanovima Prištine, i u privatnim kućama nekih mesta u okolini (Badovac i Kišnica). Kako su privatne kuće u direktnom kontaktu sa zemljom, a stanovi u Prištini na različitim spratovima, može se zaključiti da su kuće na veoma povoljnoj geološkoj lokaciji.

Rezultati prvih merenja u Gradnici su sa srednjom vrednošću od 211 Bq/m^3 . Doprinos koncentraciji iznad 200 Bq/m^3 daju kuće u jednoj ulici, gde je maksimalna vrednost 472 Bq/m^3 . I godišnja prosečna koncentracija u kućama u ovoj ulici je iznad 200 Bq/m^3 . Najveća je u jesenjem periodu, nešto manja u zimskom, a najmanja u letnjem sa malom razlikom u odnosu na proleće. Između ovih vrednosti nije tako drastična razlika što znači da je glavni izvor radona u tlu ispod zgrada. Naime, provetranjem se mnogo više utiče na iznos radona u kući ako je izvor i građevinski materijal.

Iznad prirodnog fona je koncentracija radona u kućama u nekim naseljima u okolini Prištine, u Kosovom Polju, Gušterici i Dobrotinu. Preliminarna merenja su pokazala rezultate sa skoro identičnim vrednostima od 292 Bq/m^3 i 293 Bq/m^3 .

I prosečna koncentracija tokom cele godine u nekim kućama u Kosovom Polju je blizu ovih (322 Bq/m^3). Duplo veće vrednosti su u jesenjem i zimskom periodu u odnosu na proleće i leto.

Uzrok većoj koncentraciji u ovim naseljima bi mogao biti kosovski lignit, jer su to naselja Kosovskog basena koja uglavnom leže na lignitu. Sem toga, Kosovske elektrane koriste ovaj lignit i preko čašica i pepela zagađuju životnu sredinu. Time se može objasniti i koncentracija radona u kućama iznad 200 Bq/m^3 u toku leta.

U privatnim kućama u Obiliću koncentracija je ispod očekivanih vrednosti, jer se nalazi u neposrednoj blizini Kosovskih elektrana. Maksimalna vrednost od 526 Bq/m^3 je u jednoj kući koja je sagrađena od blokova napravljenih od otpadne šljake iz elektrane. U najvećem broju kuća koncentracije aktivnosti radona su ispod 150 Bq/m^3 .

Na osnovu više puta merenih koncentracija radona u privatnim kućama u Gornjoj Stubli očiigledno je da su vrednosti anomalno povećane u kućama zidanih od kamena sa Stublova e. U njima je i u toplom periodu prosečna koncentracija preko 400 Bq/m^3 , a u jesen kada je i najveća, oko 1400 Bq/m^3 . Tada je izmerena maksimalna vrednost od 2800 Bq/m^3 . Manja je koncentracija u kućama od lokalnog materijala i cigala, a najmanja u kućama u kojima nije ugrađen materijal sa lokalnog terena.

Na osnovu vrednosti koncentracija u jednoj istoj kući i u različitim delovima, u podrumu, prizemlju i na spratu (tab. 5.2.2.12), može da se zaključiti da su izvori radona i tlo ispod zgrada i građevinski materijali. Najveća je koncentracija u podrumu, a ne postoji razlika u prizemlju i na spratu. Tako je u kućama od lokalnog materijala i kombinovanog, dok u kućama od cigala dva puta je manja koncentracija na spratu od one u prizemlju.

Efekat provetravanja je veći u kućama kod kojih je izvor radona i građevinski materijal, nego u kućama samo sa izvorom iz zemlje. U takvim kućama se smanji koncentracija radona 3 puta, a u kućama sa izvorom iz zemlje 2 puta tokom leta.

Na širem području Kosovskog Pomoravlja (Gnjilane, @egra, Parteš, Budriga) srednja vrednost koncentracije aktivnosti radona je 100 Bq/m^3 . U starijim kućama koncentracije su iznad 100 Bq/m^3 , u nekim i oko 200 Bq/m^3 . Te kuće su sagrađene od materijala iz lokalne sredine. Kosmajka i Visoča su u blizini ovih naselja, a za njih se stene zna da su sa povećanom koncentracijom urana.

Epidemiološke službe u svetu daju različite preporuke i definicije o visokim nivoima prirodne radioaktivnosti u okolini. Te se preporuke odnose na prirodno zračenje zemlje u prostor, radioaktivne elemente u hrani i vodi, koncentraciju ^{222}Rn u vodi za piće, ^{222}Rn i ^{220}Rn u vazduhu. Jedan od kriterijuma je i gde se ne uzimaju limiti zračenja različitih izvora, već efektivna ekvivalentna doza zračenja stanovništva od svih prirodnih izvora. Na osnovu rezultata UNSCEAR-a 1993.g. efektivna ekvivalentna doza od radona prosečne koncentracije 40 Bq/m^3 u zgradama, i 10 Bq/m^3 u otvorenom prostoru i njegovih potomaka je 1.2 mSv/god , i 1 mSv/god od ostalih prirodno radioaktivnih izvora. To je prosečna globalna godišnja efektivna ekvivalentna doza od prirodnih izvora. Sve dok je doza manja od 5 mSv/god , na osnovu jednog kriterijuma [113], može se reći da su to niski (normalni) nivoi prirodne radioaktivnosti prostora. Srednji nivoi prirodne radioaktivnosti su od 5 mSv/god do 20 mSv/god ; visoki od 20 do 50 mSv/god , i veoma visoki iznad 50 mSv/god .

Shodno iznetom kriterijumu, Brezovica sa okolinom, Priština i neka mesta u okolini (Kišnica, Badovac, Gračanica izuzev jedne ulice, Obilić), Kosovsko Pomoravlje, imaju normalne nivoe prirodne radioaktivnosti. Srednji nivoi prirodne radioaktivnosti su u Kosovom Polju, Dobrotinu, Gušterici, u jednoj ulici u Gračanici, u jamama "Trepča" i "Ajvalija". U Gornjoj Stubli, gde je godišnja prosečna koncentracija u kućama preko 700 Bq/m^3 i u rudniku "Novo Brdo" sa 953 Bq/m^3 , su visoki nivoi prirodne radioaktivnosti. Do ovakvog zaključka se dolazi korišćenjem faktora konverzije za efektivnu ekvivalentnu dozu od 1 Bq/m^3 preporučenog od UNSCEAR (1993), i ekvivalentnog faktora od 0.8 za vazduh zatvorenog prostora.

Na osnovu svih istraživanja je evidentno da svaka kuća ima svoj specifični "život" radona. Zato, nije dovoljno da se meri koncentracija radona u jednoj zgradi, generalnije i veruje da je ista i u susednim.

LITERATURA

1. Behounek F. (1927) *On the proportion of radioactivity in the uranium mining district of St. Joachimsthal in Bohemia, Radioactivity of spring, ground and mine air, and the atmosphere.* Z.Phys. 28, 333 - 342.
2. Kirikov A. P., Tverskoy P. N and Grammakov A. G. (1932) *On the question of the emanation method of searching for radioactive deposits* Vses. Geol. Razved Ob"edineniye Izv. 51, 1269 - 1274.
3. Jakupi B., Bytyqi M., Todorovi} @. and Antanasijevi} R. (1988) *Prospection for uranium using solid state nuclear detectors.* Proc. Ist Yugoslav Symp. on Solid State Nuclear Track Detectors, Belgrade, 1988.
4. WHO (1996a) World Health Organisation Report EUR/ICP/CEH 108 (A) *Indoor Air Quality: A Risk Based Approach to Health Criteria for Radon Indoors.* (Rapporteur: J.P.Mc Laughlin)
5. Gunning C. and Scott A.G. (1982) *Radon and thoron daughters in housing,* Health Phys. 42, 527.
6. ECA, European Collaborative Action *Indoor Air Quality and its Impact on Man,* (1995). Radon in Indoor Air. Report No 15, EUR 16123 EN
7. ICRP, International Commission on Radiological Protection, (1994) *Protection against Radon-222 at home and at work, ICRP Publication 65, Annals of the ICRP 23 (2).* Pergamon Press, Oxford.
8. IARC, International Agency for Research on Cancer (1988) *Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. Man-made mineral fibres and radon,* Volume 43, IARC, Lyon.
9. Arcimovi~, prevod sa engleskog - L. A
, , 1963.

10. L.A. Percov, ,
1964.
11. Eisenbud M. (1987) *Environmental Radioactivity*. Third edition, Academic Press, San Diego.
12. Levinson A. A. and Coetzee G. L. (1978) *Implications of disequilibrium in exploration for uranium ores in the surficial environment using radiometric techniques-a review*. Minerals Sci. Eng. 10, 19-27.
13. Faul H. (1954) *Nuclear Geology*. Johan Wiley and Sons, New York.
14. Cook G. A. (1961) *Argon, Helium, and the Rare Gases*. Interscience, New York.
15. Junge C. E. (1963) *Air Chemistry and Radioactivity*. Academic Press, New York.
16. Lindhard J., Scharff M., and Schiott H. E. (1963) *Range concepts and heavy ion ranges*. Mat. Fys. Medd. Dan. Vid. Selsk. 33, 14, 1-42.
17. Fleischer R.L.(1988b) *Alpha recoil damage: relation to isotopic disequilibrium and leaching of radionuclides*. Geochim. Cosmochim. Acta 52, 1459-1466.
18. Fleischer R. L., Naeser C. W., Price P. B., Walker R. M. and Marvin U. B (1965) *Fossil particle tracks and uranium distributions in minerals of the Vaca Muerta meteorite*. Science 148, 629-632.
19. Dongarra G. and Martinelli G. (1993) *Migration processes of radon towards the earth surface: implications for the prediction of seismic and volcanic events*. In Sci. Meeting on the Seismic Protection, Venice, pp. 141-147.
20. Kogan R. M., Nazarov I. M. and Fridman Sh. D. (1971) *Gamma Spectrometry of Natural Environments and Formations*. Atomizdat, Moscow (1969), Israel program for scientific translations, Jerusalem, pp. 1-337.
21. Fleischer R. L.(1980) *Isotopic disequilibrium of uranium: Alpha-recoil damage and preferential solution effects*. Science 207, 979-981.

22. Kigoshi K. (1971) *Alpha-recoil ^{234}Th . Dissolution into water and the $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ disequilibrium in nature.* *Science* 173, 47-48.
23. Tanner A.B. (1980) *Radon migration in the ground: A supplementary review.* In *The Natural Radiation Environment III.* (eds.T.F.Gesell and W.M.Lowder), National Technical Information service, Springfield, VA. CONF-780422, pp. 5-56.
24. Fleischer R. L. (1982) *Alpha-recoil damage and solution effects in minerals: Isotopic disequilibrium and radon release.* *Geochim. Cosmochim. Acta* 46, 2191-2201.
25. Andersson P., Clavensjo B. and Akerblom G. (1983) *The effect of ground on the concentration of radon and gamma radiation indoors.* Swedish Council for Building research, Report R9:1983, pp. 1-442. (In Swedish).
26. Baretto P.M.C. et al. (1975) *Physical characteristics of ^{222}Rn emanation from rocks, soils and minerals: is relation to temperature and alpha dose.* In *Natural Radiation Environment (Symposium 1972),* Houston.
27. Markkanen M. and Arvela H. (1992) *Radon emanation from soils.* *Radiat. Prot. Dosim.* 45, 1-4, 269-272.
28. Robe M.C. and Labeled V. (1995) *Explaining the variation in soil radon concentrations: a study of the influence of some intrinsic properties of a rock matrix on the radon emission factor.* In *Gas Chemistry* (ed. C. Dubois), *Science Reviews*, 535-542.
29. Hildingson O. (1983) *Radon emitted from gravel and aggregate; Testing method and consistencies for indoor environment.* Swedish National Testing Institute. Technical Report 1983:28, pp. 1-45 (In Swedish).
30. Tanner A. B. (1991) *Error in measuring radon in soil gas by means of passive detectors.* *Nucl. Geophys.* 5, 1-2, 25-30.
31. Allen J. W. (1976) *Development of a portable radon detection system.* Bendix fieldengineering corp., Grand Junction, Colorado, GBJX-50(76).
32. Washington J. W. and Rose A. W. (1990) *Regional and temporal relations of radon in soil gas to soil temperature and moisture.* *Geophys. Res. Lett.* 17, 6, 829-823

33. Mogro-Campero A., Fleischer R. L and Likes R. S. (1980) *Changes in subsurface radon concentration associated with earthquakes*. J. Geophysical Res. 85, 3053-3057.
34. Kristiansson K. and Malmqvist L. (1982) *Evidence for non-diffusive transport of ^{222}Rn in the ground and a new physical model for the transport*. Geophysics 47, 1444-1452.
35. Monnin M. and Seidel J. L. (1991) *Radon in soil, air and ground waters related to major geophysical events: recent advances*. Nucl. Instr. Meth. A314, 316-330.
36. Minell H. (1983) *Gamma radiation and contents of K, U and Th in Swedish soils*. Geological Survey of Sweden, Report IRAP 83051 (In Swedish).
37. Jonsson G., Persson M., Wikman H., Tell I., Osby community (1991) *Investigation of soil radon in the community of Osby*. Lund Institute of technology, Report LUTFD2/(TFKF-3065)/(1991) (In Swedish).
38. Minell H. (1990) *Natural radioactivity from different ground types*. In Quaternary Economic Geology in the Nordic Countries (eds. L. K. Kauranne and L. K. Konigsson), Uppsala, Vol. 29, pp. 73-78.
39. Malmqvist L. et al. (1980) *Radon measurements with alpha track film. A new technique for geological surveys, exploration and for mapping of radiation*. The Swedish Board for Technical Development, STU Report 77-3590 (In Swedish).
40. Hesselbom A. (1985) *Radon in soil gas-A study of methods and instruments for determining radon concentrations in the ground*. Geological Survey of Sweden, Serie C, No 803, pp. 1-58.
41. Rose A. W., Hutter A. R. and Washington J.W. (1990) *Sampling variability of radon in soil gases*. J. Geochem. Explorat. 38, 173-191.
42. Landstrom O. and Tullborg E. L. (1990) *The influence of fracture mineral/groundwater interaction on the mobility of U, Th, REE and other trace elements*. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company, Technical Report 90-37, pp. 1-71.

43. Hess C. T. et al. (1980) *Radon - 222 in portable water supplies in Maine*. Maine 04469.
44. Nazaroff W.W. Doyle S.M. Nero A.V. and Sexto R.G. (1987) *Portable water as a source of airborne ^{222}Rn in U.S. dwellings: A review and assessment*. Health Phys. 52, 3, 281-295.
45. Asikainen M. and Kahlos H. (1980) *Natural radioactivity of drinking water in Finland*. Health Phys. 39, 77-83.
46. Bigu J. et al. (1984) *Study of radon gas concentration, surface radon flux and other radiation variables from uranium mine tailings areas*. Uranium 1, 257-277.
47. Akerblom G., Pettersson B. and Rosen B. (1990) *Handbook on Investigation of the Radon Situation in Areas Before Building*. The Swedish Council for Building Research and the Swedish National Board for Physical Planning and Building Report R88: 1988, Revised edition 1990, pp. 1-160 (In Swedish).
48. Saeed A. Durrani and Radomir Ili} *Radon Measurements by etched track detectors (1997)* UK office: 57 Shelton Street, Covent Garden, London WC2H 9HE
49. UNSCEAR (1982) Ionizing radiation: *Sources and biological effects* Annex D. United Nations Scientific Committee on the Effect of Atomic Radiation. 1982 Report to the General Assembly with annexes. United Nations publications, Sales No.:E.82.IX.8.
50. Silker W. B. and Kalkwarf D. R. (1983) *Radon diffusion in candidate soils for covering uranium mill tailings*. US Nucl. Reg. Commission report NUREG/CR-2924, PNL-4434, 49 pages.
51. Fleischer R. L., Hart H. R. Jr. and Mogro Campero A. (1980) *Radon emanation over an ore body: Search for long distance transport of radon*. Nucl. Instr. Meth. 173, 169-181..
52. Thomas D. M. and Koyanagi R. Y. (1986) *The association between ground gas radon concentrations and seismic and volcanic activity at Kilauea volcano*. Eos trans. Am. Geophys. Un. 67, 905.

53. Dobrovolsky I. P., Zubkov S. I. and Miachkin V. I. (1979) *Estimation of the size of earthquake preparation zones. Pure Appl. Geophys.* 117, 1025-1044.
54. Fleischer R. L. (1981) *Dislocation model for radon response to distant earthquakes. Geophys. Res. Lett.* 8, 477-880..
55. Andrew J. N. and Wood D. F. (1972) *Mechanism of radon release in rock matrices and entry into ground water. Trans. Min. Metall. Sect. B* 81, 198-209.
56. Soonawala N. M. and Teleford W. M. (1975) *Diffusion of ²²²Rn and interpretation of techniques. 75th Meeting Soc. Exploration Geophysicists, Denver, Colorado.*
57. Tanner A. B. (1980) *Radon migration in the ground. A supplementary review. In Proc. Symp. Natural Radiation Environment III. (eds. F. F. Gesell and W. M. Lowder), Houston, 1978, Rep. CONF-780422, U. S. Dept. of Energy, Washington, D. C. 1, pp. 5-56.*
58. Hunyadi I., Csige I., Hakl J., Hertelendi E. and Vasarhelyi A. (1995) *Radon enriched deep earth-gas upflow in a seismically active inhabited area. Proc. 3rd International Colloquium on Rare Gas Geochemistry, Amritsar, 1995, in press.*
59. Piller G. and Surbeck H. (1989) *Radon and karst. In the Radiology of Natural and Artificial Radionuclides (ed. W. Feldt), Fackverband for Strahlenschutz, V. Publication series: Progress in Radiation Protection. FS-89-48-T.*
60. O' Connor P. J., Gallanagher V. Madden J. S. et al. (1993) *Assessment of the geological factors influencing the occurrence of radon hazard areas in a karstic region. Geological Survey of Ireland, Report Series RS93/2.*
61. Gunby J. A., Darby S. C., Miles J. C. H., Green B. M. R. and Cox D. R. (1993) *Factors affecting indoor radon concentrations in the United Kingdom. Health. Phys.* 64, 2-12.
62. Nero A. V., Leiden S. M., Nolan D. A., Price P. N., Rein K. L., Revzan H. R., Wollenberg H. R. and Gadgil A. J. (1994) *Statistically based*

methodologies for mapping of radon 'actual concentrations: the case of Minnesota. Radiat. Prot. Dosim. 56, 215-219.

63. Miles J. C. H. and Ball T. K. (1994) *Mapping the proportion of the housing stock exceeding a radon reference level.* Radiat. Prot. Dosim. 56, 207-210.

64. Porstendorfer J. (1984) *Behaviour of radon daughters products in indoor air.* Radiat. Prot. Dosim. 7, 1-4, 107-113.

65. Evans R. D. (1969) *Engineers' guide to the elementary behaviour of radon daughters.* Health Phys. 17, 229-252.

66. Brager G. S. and Revzan K. L. (1991) *Transport and deposition of indoor radon decay products – II. Influence of environmental conditions.* Atmosph. Environment 25B, 3, 359-368.

67. Swedjemark G. A. (1983) *The equilibrium factor F.* Health Phys. 45, 453-462.

68. Ramachandran T. V. and Subba Ramu M. C. (1994) *Variation of equilibrium factor F between radon and its short-lived decay products in an indoor atmosphere.* Nucl. Geophys. 8, 499-503.

69. WHO (1988) *Man-made mineral fibres and radon.* IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans 43, 173-259

70. ICRP Publication 50 (1987) *Lung cancer risk from indoor exposures to radon daughters.* Annals of the ICRP 17, 1-60.

71. Tanner A. B. (1964) *Radon mitigation in the ground, a review.* In Natural Radiation Environment (eds. J. A. S. Adams and W. M. Lowder), University of Chicago Press, pp. 161-190.

72. More H. (1985) *Radioactive Substances in Building Material.* Swedish Radiation Protection Institute, SSI-report 85-08 (In Swedish).

73. Winter M. and Wicke A., eds. (1993) *Environmental radioactivity, radiation ecology, radiation effects.* Progress in Radiation Protection, Band I., Verlag TUV, Rheinland, (In German).

74. Kulich J., More H. and Swedjemark G. A. (1988) *Radon and Radium in Household Water. Swedish Radiation Protection Institute, SSI-Report 88-11* (In Swedish).
75. Jonson G. (1991) *Solid state nuclear track detectors in radon measurements indoors and in the soil.* Nucl. Tracks Radiat. Meas. 19, 335-338.
76. Jonsson G. (1988) *Indoor ²²²Rn measurements in Sweden with the solid-state nuclear trackdetector technique.* Health Phys. 54, 271-281.
77. Jakupi B., Krsti} G., Toni} M. and Ili} R. *Radon measurements in mines and dwellings in Kosovo and Metohia,* Radiat. Meas. 1977; 28 (1-6).
78. Heller H. and Poulheim K. F., (1992) *Die Exposition durch radon und seine Zerfallsprodukte in Wohnungen in Bundesrepublik Deutschland und deren Bewertung. Veroffentlichungen der Strahlenschutzkommission, Band 19,* Gustav Fischer Verlag, Stuttgart (In German).
79. Jonson G. (1992) *About Radon_where, when and how?* Studentlitteratur Publ. Comp., Lund, 1-112 (In Swedish).
80. Reiners Chr., Steffer C. and Messersmith O. (1992) *Strahlenrisiko durch Radon.* Gustav Fischer Verlag, Stuttgart (In German).
81. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (1993) *Sources and effects of ionizing radiation.* United Nations, New York.
82. Alexander B., Rodman N. White, S. B., and Phillips J. (1994) *Areas in the United States with elevated screening levels of ²²²Rn,* Health Phys. 66, 50-54.
83. Kearafott K. J. (1989) *Preliminary experiences with ²²²Rn gas in Arizona homes.* Health Phys. 56, 169-179.
84. Becker K. (1993) *Environmental and radon dosimetry: national and international standards.* In proc. Int. Conf. on High levels of Natural Radiation (eds. M. Sohrabi et al.), Ramsar, 1990, IAEA< Vienna, pp. 281-291.
85. Akerblom G., Anderson P. and Clavens B. (1984) *soil gas radon- a source for indoor radon daughters.* Radiat. Prot. Dosim. 7, 49-54.

86. Ahmed J. U. (1993) *Radon overview in natural environment and dwellings*. In Proc. Int. conf. on High Levels of Natural Radiation (eds. M. Sohrabi et al.), Ramsar, 1990, IAEA< Vienna, pp. 267-279.
87. Commission of Europea Communities (1990) *Recommendation of 21 February 1990 on the protection of the public against indoor exposure to radon*. Official Journal of the European Communities L80, 26-28.
88. International Atomic Energy Agency (1994) *International Basic Safety Standards for Protection Against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources*. Safety Series No. 115-1,IAEA, Vienna.
89. International Commission on Radiological Protection (1991) *1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*. ICRP Publication 60, Pergamon Press, Oxford.
90. Olast M. and Sinnaeve J. (1992) *The radon exposure programme of the Commission of the European Communities*. Radiat. Prot. Dosim. 42, 185-189.
91. Snih J. O. (1992) *Swedish radon programme*. Radiat. Prot. Dosim. 42, 177-184.
92. World Health Organization (WHO) (1993) *Working group summary report*. WHO doc. ICP/CEN 108 (S).
93. Steinhausler F. (1994) *A risk-based Approach to health criteria for radon indoors-Report on a WHO initiative*. Radiat. Prot. Dosim. 56, 355-356.
94. Lucas H. F. (1990) *Aparatus to determine thoron and radon concentration inmixture*. U.S. Patent 4, 975, 574, 901,204.
95. Fukui M. (1985) *Continuous monitoring of Rn-222 concentration in unconfined water*. J. Hydrol, 82, 371-380.
96. Doi M. and Kobayashhi S. and Fujimoto K. (1992) *A passive measurement technique for characterization of high-risk houses in Japan due to enhanced levels of indoor radon and thoron concentrations*. Radiat. Prot. Dosim. 45, 1-4, 425-430.

97. Urban M. and Piesch E.A. (1982) *A passive radon dosimeter for survey programs in dwellings*. In Proc. 11th Int. Conf. on Solid State Nuclear Track detectors (eds. p.H. Fowler and V.M. Clapham), Bristol, 1981, Pergamon Press, Ozford, pp. 577-580.
98. Sedel J. L. (1982) Thermoluminescent dosimeter for monitoring subsurface radiation. U.S. Patent 941, 995, 780,913.
99. Fleischer (1980) *Radon fluks from the earth: Methodsof masurement by the nuclear track technique*. J. Geophys. Res. 85, 7553-7056.
100. Jha G. Raghavaya M. and Padmanabhan N. (1982) *Radon permeability of some membranes*. Health Phys. 42, 723-725.
101. Likes R. S., Mogro-Campero A. and Fleischer R. L. (1979) *Moisture insensitive monitoring of Radon*. Nucl. Instr. Meth. 159, 395-400.
102. Pohl-Ruling J., Steinhausler F. and Pohl E. (1980) *Investigation on the suitability of various materials as ²²²Rn diffusion barriers*. Health Phys. 39, 299-301.
103. Smith R. C. and Kanter I. E. (1978) *Locating underground depositis of uranium*. U.S. Patent 868, 779, 780,112.
104. Fleischer R., Price P. B. and Walker R. M. (1975) *Nuclear Tracks in solids: Principles and Applications*. University of California press. Berkeley.
105. Henshaw D. L., Amin S., Clapham V.M., Fowler P. H., Webster D. J., Thompson A. and O'Sullivan D. (1982) *The form of the CR-39 response curve and its effects on particle resolution and areas of applications*. in Proc. 11th int. Conf. on Solid state Nuclear track Detectors (eds. P. H. Fowler and V. H. Clapham), 1981, Pergamon Press, Oxford, pp. 115-118.
106. Fleischer R. L., Giard W.R., Mogro-Campero A., Turner L.G., Alter H.W. and Gingrich J.E. (1980) *Dosimetry of environmental radon: Methods and theory for low-dose integrated measurements*. health phys. 39, 957-967.
107. Hadler N.J.C. and Paulo S.R. (1994) *Indoor radon daughter contamination monitoring: the absolute efficiency of CR-39 taking into account the plate-out effect and environmental conditions*. Radiat. prot. Dosim. 51, 4, 283-296.

108. Skvra J. and Ilić R. (1994) *Radonography*. Nucl. Instr. Meth. B88, 430-434.

109. Fleischer R.L. and Mogro-Campero A. (1978) *Mapping of integrated radon emanation for detection of long-distance migration of gases within the earth: Techniques and principles*. J. Geophys. Res. 83, B7, 3539-3549.

110. Samogyi G., Paripas B. and Varga Zs. (1984) *Measurement of radon, radon daughters and thoron concentrations by multi-detector devices*. Nucl. tracks. Radiat. Meas. 8, 1-4, 423-427.

111. Durrani S.A. and Bull R. K. (1987) *Solid state Nuclear Track Detection: Principle, Methods and applications*. Pergamon Press, Oxford.

112. Hatch T. F. and Gross P. (1964) *Pulmonary Deposition and retention of Inhaled Aerosols*. Academic Press, New York.

113. [utej T., Ilić R. and Najđer M. (1988) *Response of track-etch dosimeters to environmental radon*. Nucl. tracks. radiat. Meas. 15, 1-4, 547-550.

114. B.Jakupi, *Primena dielektičkih detektora u istraživanju galaktičkog kosmičkog zračenja i tragova fisionih fragmenata u prirodnim mineralima*, doktorska disertacija, Priština, 1981.