

D - 390

УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ  
ПРИРОДНО-МАТЕМАТИЧКИ ФАКУЛТЕТ

ПРИМЉЕНО: 29 IX 1999	
ОРГАНИЗ.ЈЕД.	Б Р О Ј
0603	9/260

УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ  
ПРИРОДНО-МАТЕМАТИЧКИ ФАКУЛТЕТ  
ИНСТИТУТ ЗА ФИЗИКУ

## DIPLOMSKI RAD

Tema: GAMA-SPEKTROMETRIJSKO ODREĐIVANJE  
KONCENTRACIJE RADONA

Mentor:

Prof. dr Ljiljana Čonkić

Kandidat:

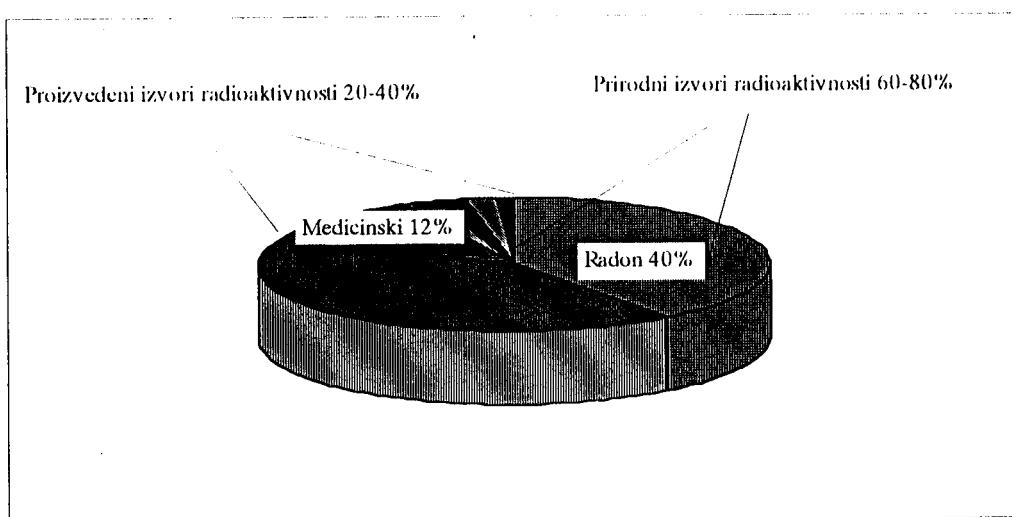
Ćurčić Sofija

# SADRŽAJ

<b>1. UVOD .....</b>	<b>1</b>
<b>2. OPŠTI DEO .....</b>	<b>2</b>
2.1. OSOBINE RADONA VAŽNE U RADIOEKOLOGIJI I DEFINICIJE NEKIH RELEVANTNIH FIZIČKIH VELIČINA.....	2
2.2. PONAŠANJE KRATKOŽIVEĆIH RADONOVIH POTOMAKA U ATMOSFERI.....	6
2.3. RADIJACIONI RIZIK PRI IZLAGANJU RADONOVIM POTOMCIMA U ZATVORENIM PROSTORIJAMA.....	9
2.3.1. DOZIMETRIJSKI MODEL RESPIRATORNOG TRAKTA .....	10
2.4. KONCENTRACIJE RADONA U ZATVORENIM PROSTORIJAMA I NA OTVORENOM PROSTORU	13
2.5. FAKTORI KOJI UTIČU NA KONCENTRACIJU RADONA U ZATVORENIM PROSTORIJAMA.....	15
2.5.1. ZEMLJIŠTE KAO IZVOR RADONA I JAČINA EKSHALACIJE .....	15
2.5.2. GRAĐEVINSKI MATERIJALI KAO IZVOR RADONA .....	17
2.5.3. VODA I GAS KAO IZVOR RADONA U ZATVORENIM PROSTORIJAMA .....	20
2.5.4. ZAVISNOST KONCENTRACIJE RADONA U ZATVORENIM PROSTORIJAMA OD JAČINE VENTILACIJE .....	20
2.6. TRANSPORT RADONA IZ TLA I GRAĐEVINSKOG MATERIJALA U ZATVORENE PROSTORIJE	22
2.7. VARIJACIJE KONCENTRACIJE RADONA U VAZDUHU.....	25
2.8. MERE ZA REDUKCIJU RADONA .....	27
2.9. METODE MERENJA RADONA I NJEGOVIH KRATKOŽIVEĆIH POTOMAKA .....	29
<b>3. EKSPERIMENTALNI DEO .....</b>	<b>34</b>
3.1. METODOLOGIJA I MERNA TEHNIKA.....	34
3.2. REZULTATI MERENJA I DISKUSIJA .....	35
<b>4. ZAKLJUČAK.....</b>	<b>40</b>
<b>LITERATURA .....</b>	<b>41</b>

## 1. UVOD

Istraživanja vršena poslednje decenije pokazuju da u normalnim uslovima preko 70% ukupne godišnje doze koju prima stanovništvo potiče od prirodnih izvora ionizujućih zračenja, pri čemu je 40% uslovljeno udisanjem prirodnog radioaktivnog gasa, radona  $^{222}\text{Rn}$ , odnosno njegovih potomaka.



Slika 1.1 Uticaj prirodnih izvora radioaktivnosti u ozračivanju stanovništva

Kao hemijski inertan gas, radon lako napušta mesto formiranja (tlo, građevinski materijal, vodu) i prelazi (emanira) u atmosferu. Na taj način je vazduh, kako na otvorenom prostoru tako i u zatvorenim prostorijama, stalno kontaminiran radonom. U današnjim uslovima mnoge ljudske aktivnosti dovode do povećanog ozračivanja čoveka radonom i njegovim kratkoživećim potomcima, kao što su: smanjenje prirodne ventilacije u cilju uštede toplotne energije, korišćenje prefabrikovanih otpadnih materijala u građevinske svrhe što dovodi do povećanja koncentracije radona u prostorijama i opšta tendencija da čovek sve veći deo svog vremena provodi u zatvorenim prostorijama.

Izloženost radonu, pri inhalaciji u zatvorenim prostorijama uzrok je oko 10% svih smrtnih slučajeva uslovljenih kancerom pluća. Promene na ćelijskom i molekularnom nivou znatno su izraženije u ranim životnim fazama.

Osnovni cilj ovog rada je  $\gamma$ -spektrometrijsko određivanje koncentracije radona u predškolskim i školskim ustanovama na teritoriji Novog Sada, iz razloga što deca provode znatan deo vremena u zatvorenim prostorijama ovih ustanova.

Upotreba  $\gamma$ -spektrometrije se zbog dobre rezolucije favorizuje i ova metoda, danas, postaje nezamenljiva u slučaju analize prirodnih uzoraka.

## 2. OPŠTI DEO

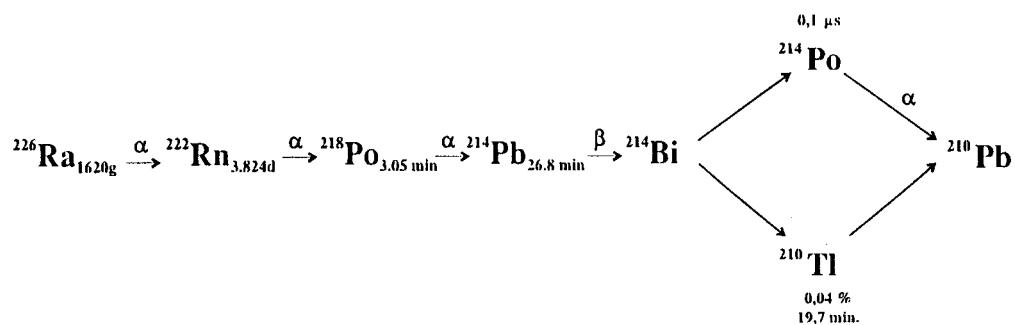
### 2.1. OSOBINE RADONA VAŽNE U RADIOEKOLOGIJI I DEFINICIJE NEKIH RELEVANTNIH FIZIČKIH VELIČINA

Radon je prirodan inertan radioaktivni gas bez ukusa i mirisa, čija je gustina sedam i po puta veća od gustine vazduha. Rastvorljiv je u vodi i može lako da difunduje sa gasovitom i vodenom fazom i na taj način obrazuje značajne koncentracije. Fizičko vreme poluraspada radona je 3.824 dana, a vreme polueliminacije iz pluća 30 minuta, odnosno iz ostalih tkiva 15 minuta. Emituje  $\alpha$  čestice energije 5.5 MeV-a [16].

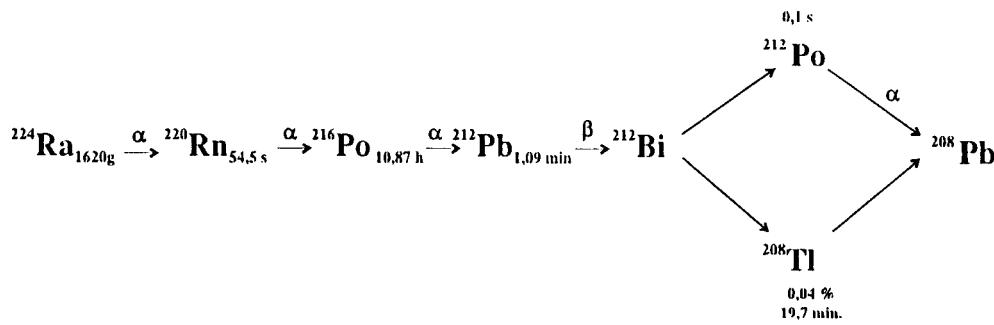
Radon nastaje raspadom radijumovih jezgara i sva tri prirodna radioaktivna niza sadrže po jedan radonov izotop. Izotopi radona su:

- $^{222}\text{Rn}$  sa periodom poluraspada od 3.824 dana. Prisutan je u nizu uranijuma  $^{238}\text{U}$  i predstavlja najznačajniji radonov izotop. U daljem izlaganju pod terminom "radon" podrazumevaćemo upravo ovaj izotop.
- $^{220}\text{Rn}$  sa periodom poluraspada od 54.5 s. Prisutan je u nizu torijuma  $^{232}\text{Th}$  i za njega se koristi specijalni naziv Toron. Smatra se da je on odgovoran za 10% doze koja se apsorbuje u ljudskim plućima. Uzima se u obzir u situacijama kada on ili njegovi potomci dostižu veće koncentracije.
- $^{219}\text{Rn}$  sa periodom poluraspada od 3.92 s. Prisutan je u nizu uranijuma  $^{235}\text{U}$  i naziva se Aktinon. On je vrlo malo zastupljen u prirodi (zbog malog sadržaja izotopa  $^{235}\text{U}$ ) i njegov doprinos u ozračenju ljudi je neznatan.

Raspade  $^{222}\text{Rn}$  i  $^{220}\text{Rn}$  na njihove kratkoživuće potomke možemo prikazati šemom [1]:

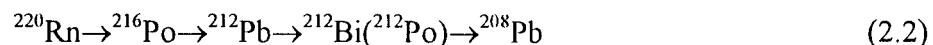
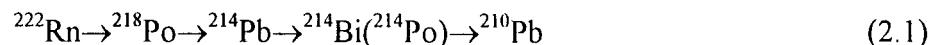


Slika 2.1. Šema raspada radona  $^{222}\text{Rn}$

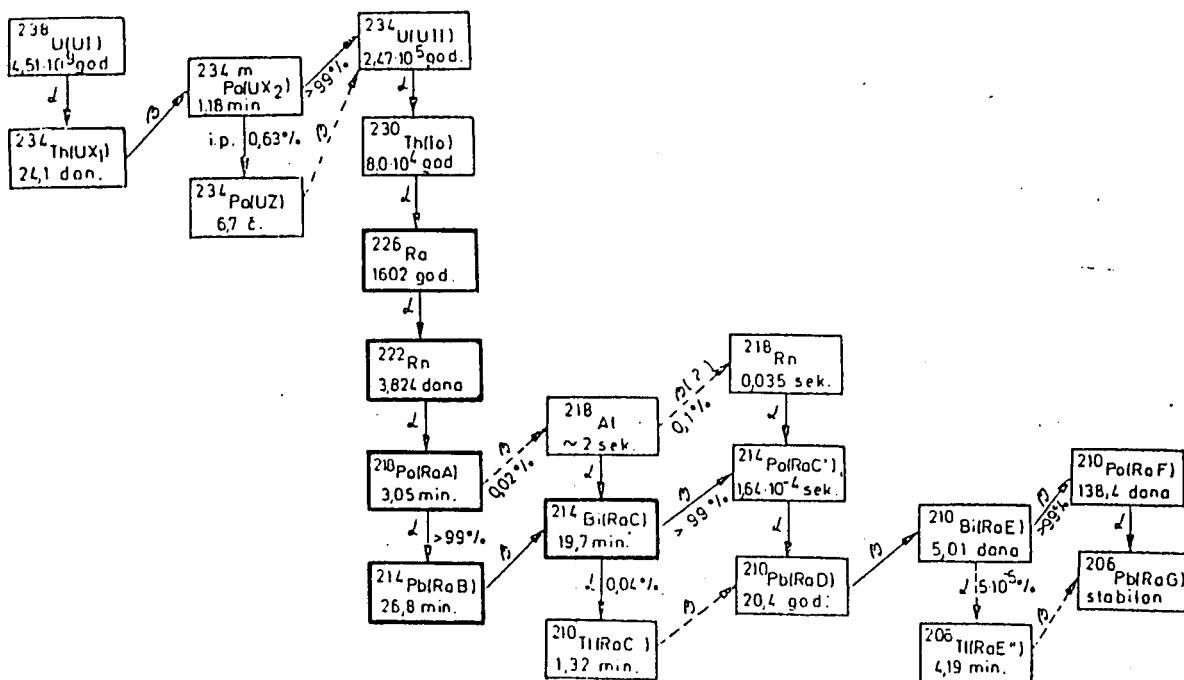


Slika 2.2. Šema raspada torona  $^{220}\text{Rn}$

Zbog male verovatnoće raspada preko  $^{210}\text{Tl}(\text{RaC''})$ , ova grana se može zanemariti.  $^{210}\text{Pb}(\text{RaD})$  ima veliko vreme poluraspada i zbog procesa taloženja ne može se nagomilati u atmosferi u značajnim količinama. Zbog kratkog vremena poluraspada  $^{214}\text{Po}$  je uvek u ravnoteži sa svojim prethodnikom  $^{214}\text{Bi}$ . Tako da je moguće uprostiti gore predstavljene šeme [1]:



$^{226}\text{Ra}$  je član radioaktivnog niza  $^{238}\text{U}$ , koji je u tragovima prisutan skoro u svim materijalima. Naime, proces nukleosinteze se odigrao pre nekoliko milijardi godina i tom prilikom je formiran osim poznatih, stabilnih i veliki broj nestabilnih izotopa. Veći deo tada nastalih radioizotopa ne postoji više na Zemlji, pošto su se zbog kratkog vremena poluživota do danas raspali. Preživela su dugoživeća jezgra, perioda poluraspada većeg od 500 miliona godina, kao npr.  $^{40}\text{K}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ . Ovi dugoživeći radioizotopi su začetnici tri prirodna radioaktivna niza: uran-aktinijumskog, uran-radijumskog (sl. 2.3.) i torijumskog niza.



Slika 2.3. Uran-radijumski niz

Tabela 2.1. Karakteristike izotopa radona i njihovih kratkoživećih potomaka [1].

Izotop	Simbol	Vreme poluraspada (s)	Konstanta radioaktivnog raspada (1/s)	Tip Zračenja	Energija E (gama) (MeV)	Energija E (gama) (MeV)
Radon	Rn-222	$3.3 \times 10^5$	$2.097 \times 10^{-6}$	$\alpha$ 5.486	---	---
RaA	Po-218	183	$3.788 \times 10^{-3}$	$\alpha$ 5.988	---	---
RaB	Pb-214	1608	$4.310 \times 10^{-4}$	$\beta$ , 0.7	0.350; 0.294	0.350; 0.294
RaC	Bi-214	1182	$5.864 \times 10^{-4}$	$\beta, \gamma$ , 1.65 (77%) 3.17	0.609; 1.764 1.120	0.609; 1.764 1.120
RaC'	Po-214	0.00016	$4.23 \times 10^{-3}$	$\alpha$ 7.68	---	---
RaD	Pb-210	$6.94 \times 10^8$	$9.98 \times 10^{-10}$	$\beta$ 0.027	---	---
RaE	Bi-210	433036	$1.608 \times 10^{-6}$	$\beta$ 1.17	---	---
RaF	Po-210	$1.19 \times 10^7$	$5.8 \times 10^{-6}$	$\alpha$ 5.298	---	---
Toron	Rn-220	54.5	$1.27 \times 10^{-2}$	$\alpha$ 6.282	---	---
ThA	Po-216	0.158	4.387	$\alpha$ 6.774	---	---
ThB	Pb-212	$3.83 \times 10^4$	$1.816 \times 10^{-5}$	$\beta$ 0.37	0.3; 0.238	0.3; 0.238
ThC	Bi-212	3816	$1.76 \times 10^{-4}$	$\alpha$ 6.05 (66.3%) $\beta$ 2.25	0.81 1.81	0.81 1.81
ThC'	Po-212	$1.0 \times 10^{-7}$	$10^6$	$\alpha$ 8.476	---	---
ThC''	Tl-208	186	$3.73 \times 10^{-3}$	$\beta$ 1.792	2.62; 0.58	2.62; 0.58
Aktinon	Rn-219	3.92	0.1767	$\alpha$ 6.41	0.622; 0.203 0.397	0.622; 0.203 0.397
AcA	Po-215	$1.78 \times 10^{-3}$	561	$\alpha$ 7.365	---	---
AcB	Pb-211	2166	$3.2 \times 10^{-4}$	$\beta$ 1.23	0.829 0.425	0.829 0.425
AcC	Bi-211	127.8	$7.825 \times 10^{-3}$	$\alpha$ 6.56	---	---
AcC''	Tl-207	287.4	$2.412 \times 10^{-3}$	$\beta$ 1.5	---	---

Raspadom  $^{226}\text{Ra}$  formira se  $^{222}\text{Rn}$  i pošto su atomi  $^{222}\text{Rn}$  hemijski inertni oni su slobodni i mogu da difunduju kroz materijal u kome su stvoreni. Jedan deo atoma  $^{222}\text{Rn}$  uspe da predje u atmosferu, dok se drugi deo raspadne pre prelaska u atmosferu. Tako u atmosferi uvek postoji određena koncentracija radona i njegovih kratkoživećih potomaka, odnosno, atmosfera je uvek "kontaminirana" radonom.

Za karakterizaciju kontaminacije atmosfere radonom i njegovim kratkoživećim potomcima koristi se nekoliko fizičkih veličina. To su:

- *ekvivalentna doza (DE)* - veličina koja je uobičajena u zaštiti od zračenja i predstavlja proizvod *apsorbovane doze (D)*, distribucionog faktora (**DF**) i faktora kvaliteta (**QF**) [24]:

$$\text{DE} = D \text{ DF QF} ; \quad (\text{Sv}) \quad (2.3)$$

Apsorbovana doza je količina energije apsorbovana u jedinici mase tkiva:

$$D = \frac{d\bar{E}}{dm} \quad (2.4)$$

Ovako definisana apsorbovana doza primenjuje se za proračune radijacionih oštećenja izazvanih svim vrstama zračenja, a SI jedinica je Grej (Gy); 1 Gy = 100 rad = 1 J/kg.

Distribucioni faktor (DF) je bezdimenziona konstanta koja u ekvivalentnu dozu uvodi zavisnost biološkog efekta ozračenja od prostornog rasporeda izvora zračenja i ozračenog sistema (npr. prostorna distribucija radionuklida unesenih u organizam nije uniformna i javljaju se regije sa visokom dozom i enormno velikim biološkim efektom).

Faktor kvaliteta (QF) je bezdimenziona konstanta koja pokazuje koliko puta dato zračenje izaziva veći efekat od  $\gamma$ -zračenja, koje se uzima kao referentno (za  $\alpha$ -čestice ima vrednost 10). Naime biološki efekat ozračenja zavisi i od tipa zračenja, odnosno, od gustine ionizacije (broj stvorenih jona po jedinici pređenog puta) koja se razlikuje za različite vrste zračenja. Jedinica za ekvivalentnu dozu je Sivert (Sv) koji je dimenziono jednak Grej-u.

- *efektivna ekvivalentna doza* - doza koja predstavlja ekvivalentnu dozu merenu osetljivošću različitih tkiva na radijaciju. Jedinica je takođe Sivert.
- *zapreminska aktivnost radona* - predstavlja aktivnost radona u jedinici zapreme i izražava se u ( $\text{Bq}/\text{m}^3$ ).
- *ukupna energija emitovanih  $\alpha$ -čestica za jedan atom u lancu raspada radona* (Potential alpha energy),  $\epsilon_p$ , je ukupna energija svih  $\alpha$ -čestica emitovanih u procesu raspada tog atoma do stabilnog  $^{210}\text{Pb}$ . U tabeli 2.2. [9] date su vrednosti ukupne energije emitovanih alfa čestica potomaka  $^{222}\text{Rn}$ , po jednom atomu i po jediničnoj aktivnosti.

Tabela 2.2. Ukupne energije alfa čestica po jednom atomu  $\epsilon_p$  i po jediničnoj aktivnosti  $\epsilon_p/\lambda_r$ .

Radionuklid	$T_{1/2}$	Ukupna energija emitovanih $\alpha$ čestica		
		(MeV)	$(10^{-12} \text{ J})$	(MeV)
Potomci radona, $^{222}\text{Rn}$				
$^{210}\text{Po}$	3.05 min	13.69	2.19	3615
$^{214}\text{Pb}$	26.8 min	7.69	1.23	17840
$^{214}\text{Bi}$	19.9 min	7.69	1.23	13250
$^{214}\text{Po}$	164 $\mu\text{s}$	7.69	1.23	$2 \times 10^{-3}$
Ukupno po Bq radona u ravnoteži				34710
				55.6

- *koncentracija potencijalne alfa energije* (potential alpha energy concentration, PAEC). PAEC predstavlja sumu potencijalnih alfa energija svih atoma u metru kubnom vazduha bilo koje smeše kratkoživećih radonovih ili toronovih potomaka [9]:

$$PAEC = \sum_{i=1}^3 C_i \frac{\epsilon_{p,i}}{\lambda_{r,i}} \quad (2.5)$$

gde je  $C_i$  broj atoma i-tog radonovog kratkoživećeg potomka po  $\text{m}^3$  vazduha.

Vansistemska jedinica za PAEC je Working Level ili WL i iznosi  $1WL = 21 \text{ mJ/m}^3$ . Jednom WL odgovara oslobođena energija alfa zračenja od  $1.3 \times 10^{14} \text{ eV/m}^3$  u vazduhu. U slučaju da je  $^{222}\text{Rn}$  u ravnoteži sa svojim kratkoživećim potomcima, koncentracija radona pri kojoj je  $PAEC = 1 \text{ WL}$ , iznosi  $3.7 \text{ kBq/m}^3$ . Kako je ovo dosta visoka vrednost, za merenja radona u zatvorenim prostorijama koristi se mWL koji je 0.001 WL.

- *izlaganje radonovim potomcima (exposure)* P - predstavlja proizvod PAEC-a i vremena provedenog u atmosferi sa tim PAEC-om. Sistemska jedinica za ovu veličinu je Js/m<sup>3</sup>, a vansistemska, tradicionalna, jedinica je Working Level Month ili skraćeno WLM. Osoba koja proveđe 173 sata u atmosferi u kojoj je PAEC=1 WL, izložena je radonovim potomcima od 1 WLM. Veza WLM i sistemске jedinice je [1]:

$$1 \text{ WLM} = 12.96 \text{ Js/m}^3 \quad (2.6)$$

- *ravnotežna ekvivalentna koncentracija radona (equilibrium equivalent concentration) EEC*, odnosi se na neravnotežnu smešu kratkoživećih radonovih potomaka u vazduhu i to je ona koncentracija radona u radioaktivnoj ravnoteži sa njegovim potomcima koji imaju isti PAEC kao i neravnotežna smeša na koju se EEC odnosi. Skraćena oznaka za EEC je C<sub>e</sub>.
- *faktor ravnoteže* (ili neravnoteže u pojedinim referencama) F - definiše se kao količnik ravnotežne ekvivalentne koncentracije radona i stvarne koncentracije radona C<sub>0</sub> u vazduhu, tj.[1]:

$$F = C_e/C_0 \quad (2.7)$$

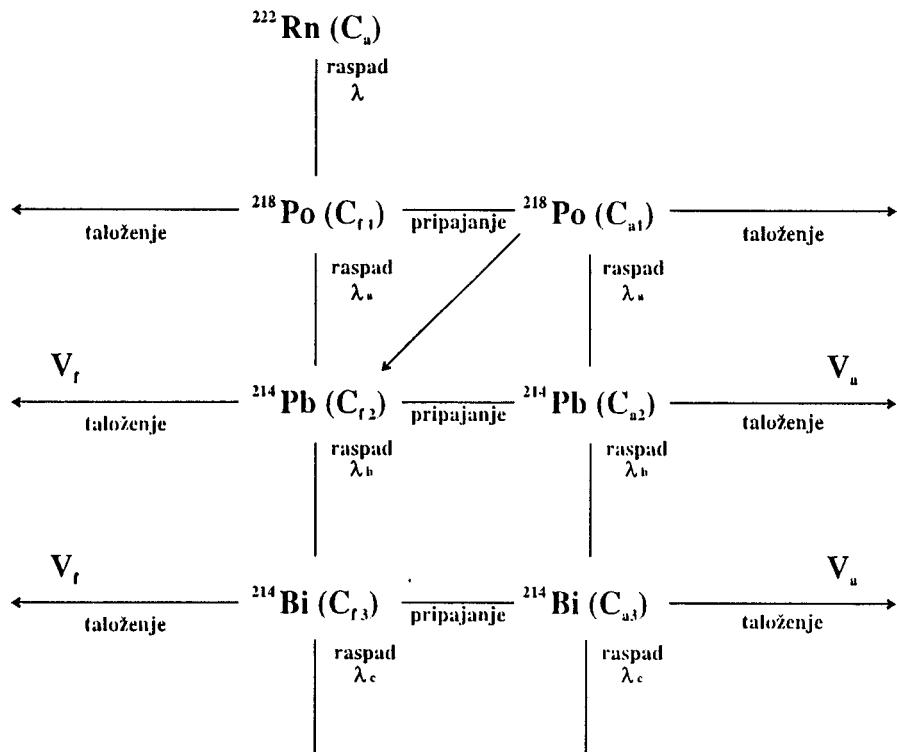
## 2.2. PONAŠANJE KRATKOŽIVEĆIH RADONOVIH POTOMAKA U ATMOSFERI

Kao što je već navedeno raspadom jezgra <sup>222</sup>Rn nastaju kratkoživeći radonovi potomci <sup>218</sup>Po, <sup>214</sup>Pb i <sup>214</sup>Bi/<sup>214</sup>Po.. Poznavanje ponašanja radonovih potomaka u atmosferi je vrlo značajno, jer je njihov doprinos radijacionom zdravstvenom riziku znatno veći nego od samog radona.

Oko 80% novoformiranih potomaka je pozitivno nanelektrisano i hemijski su veoma aktivni. Oni interaguju sa negativnim jonima prisutnim u atmosferi pripajajući se za prirodne aerosole. Prvi potomak <sup>218</sup>Po pod normalnim spoljašnjim uslovima postoji samo 20 s kao samostalan mobilan jon ili atom, a nakon toga se pripaja molekulima vodene pare, kiseonika i drugih gasova, česticama i čvrstim površinama.

Nepripojeni potomci kao slobodni klasteri od samo nekoliko molekula lebde u vazduhu i imaju najizraženiji negativan zdravstveni efekat. Stalnim međusobnim sudaranjima dolazi do njihovog spajanja i povećavanja, a takođe i do raspada i taloženja. Verovatnoća taloženja potomaka u ljudskim plućima je znatno veća za slobodne nego za pripojene. Deo radonovih potomaka koji je u prirodi u slobodnoj formi zavisi od više različitih parametara i kreće se od 0.3 do 33% [1].

Šema procesa koji se odigravaju u atmosferi, a u kojima učestvuju radonovi potomci, prikazana je na slici 2.4. [1]. Oznake na slici su: C<sub>fi</sub> - koncentracije i-tog potomka u slobodnoj formi, C<sub>ai</sub> - koncentracije i-tog potomka u pripojenoj formi, λ su konstante radioaktivnog raspada, V<sub>f</sub> i V<sub>a</sub> su brzine taloženja slobodnih i pripojenih potomaka, respektivno.



Slika 2.4. Ponašanje kratkoživećih radonovih potomaka u atmosferi.

Bitna karakteristika radioaktivnih aerosola, koja određuje njihovo ponašanje ali i njihov značaj za dozimetriju, je njihova raspodela po dijametrima. Uveden je pojam *relativna raspodela radioaktivnih aerosola*, koja daje deo radioaktivnih aerosola sa određenim dijametrom i označava se sa  $\Delta C_j(d)/C_j$  [1]:

$$\frac{\Delta C_j(d)}{C_j} = \frac{\Delta Z(d) \beta(d)}{Z} . \quad (2.8)$$

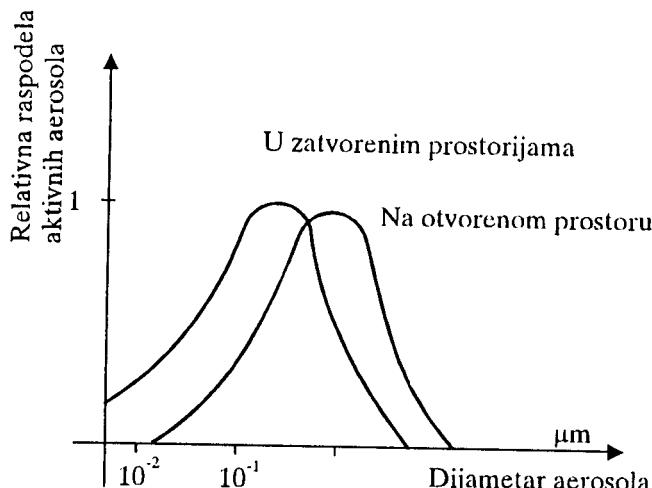
Pri čemu je:

$$C_j = \sum_{d=0}^{\infty} \Delta C(d) . \quad (2.9)$$

U gornjim jednačinama korišćene su oznake:

- $d$  - dijmetar aerosola u (m)
- $\Delta C_j(d)$  - koncentracija radioaktivnih aerosola dijametra  $d$  koji nose  $j$ -ti radonov potomak, u ( $m^{-3}$ )
- $Z$  - ukupna koncentracija aerosola, u ( $m^{-3}$ )
- $C_j$  - ukupna koncentracija radioaktivnih aerosola koji nose  $j$ -ti radonov kratkoživeći potomak ( $j=1, 2, 3$ ), u ( $m^{-3}$ )
- $\beta(d)$  - koeficijent pripajanja i funkcija je veličine aerosola. Vrednosti koje se mogu sresti u literaturi za srednji koeficijent pripajanja su od  $0.5 \times 10^{-12}$  do  $2.3 \times 10^{-12} m^3/s$ .

Relativna raspodela radioaktivnih aerosola po dijametrima je data na slici 2.5. [1].



Slika 2.5. Relativna raspodela radioaktivnih aerosola po dijametrima.

Radioaktivni aerosoli sa dijametrima u intervalu od 0.1 do 10 nm. [21] se najbolje talože u ljudskim plućima. Aerosoli većih dimenzija se zadržavaju u nosu i usnoj duplji ne dopirući do osetljivog respiratornog epitela bronhijalnog stabla.

Pored pripajanja potomaka aerosolima postoji i obrnuti proces, odvajanje. Pri raspadu  $^{218}\text{Po}$  emitiše alfa česticu pri čemu novonastalo jezgro doživljava uzmak. Ovaj uzmak je dovoljan da dođe do odvajanja atoma od aerosola. Verovatnoća da dođe do odvajanja (*faktor uzmaka*) je dosta visoka i iznosi 0.81, što je razumljivo ako se zna da energija uzmaknutog jezgra za  $^{214}\text{Pb}$  iznosi 117 keV, a energija veze atoma u aerosolu je reda eV [1]. Do odvajanja ne dolazi u slučaju kada je uzmaknuti atom usmeren prema samom aerosolu za koji je pripojen i kada je dijametar aerosola veći od dometa atom u njemu.

Pripojeni i nepripojeni radonovi potomci se talože na površinama unutar zatvorenih prostorija (zidovi, nameštaj). Takav proces taloženja (plate out) je značajan mehanizam smanjivanja koncentracije radonovih potomaka u atmosferi zatvorenih prostorija. Jačina taloženja se dobija u (Bq/s) i predstavlja nataloženu aktivnost u jedinici vremena u zatvorenoj prostoriji. Jačina taloženja se može dati izrazom:  $C_j S v$  [1]; gde je  $S$  površina na raspolaganju za taloženje u ( $\text{m}^2$ ),  $C_j$  je koncentracija j-tog radonovog potomka u ( $\text{Bq}/\text{m}^3$ ) i  $v$  je brzina taloženja u ( $\text{m}/\text{s}$ ).

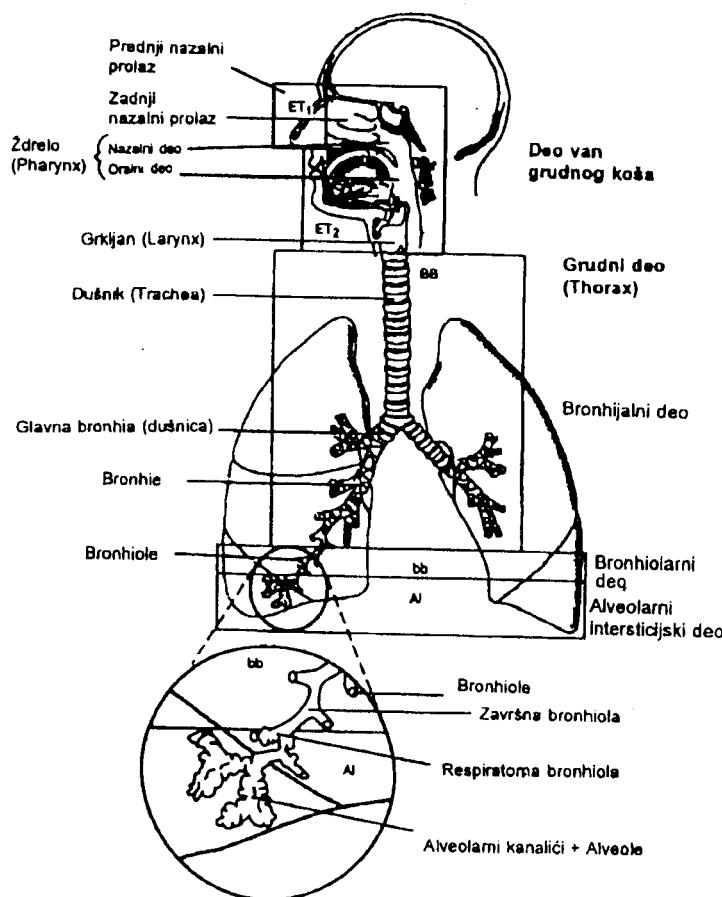
Može se proučavati zavisnost taloženja od različitih parametara, kao što su koncentracija aerosola, raspodela aerosola po veličinama, jačina ventilacije itd. U tu svrhu konstruišu se specijalne komore u kojima se ovi parametri mogu kontrolisati. Zapažena je inverzna relacija između dela nataloženih radioaktivnih aerosola  $y$  i njihove koncentracije  $C$  [1]:

$$y = A - B \log C \quad (2.10)$$

gde su  $A$  i  $B$  konstante. Na primer, za koncentracije veće od  $10^{11} \text{ l/m}^3$  nataloži se 4% aerosola, a čak 86% za koncentracije manje od  $10^9 \text{ l/m}^3$ .

## 2.3. RADIJACIONI RIZIK PRI IZLAGANJU RADONOVIM POTOMCIMA U ZATVORENIM PROSTORIJAMA

Kada se radon i njegovi kratkoživeći potomci (slobodni ili pripojeni) udahnu zadržavaju se delimično u nosu, usnoj šupljini i gornjim delovima traheje, a delom u traheo-bronhijalnom i pulmonalnom tkivu (slika 2.6.) [9]. Doza u gornjem delu disajnog trakta je relativno mala, jer se gro  $\alpha$ -čestica apsorbuje u sloju mukusa, dok je doza u traheo-bronhijalnom i pulmonalnom delu znatno veća (oko 95% aktivnosti se za 15 min prenese u krv) [16].



Slika 2.6. Anatomske oblasti respiratornog trakta

Iako imaju mali domet  $\alpha$ -čestice radonovih potomaka deponovanih u plućima su izuzetno opasne zbog velike moći jonizacije.  $\alpha$ -čestice koje prođu u bazalni i sekretorni sloj epitela bronhija tokom desetbilionitog dela sekunde izazivaju jonizaciju atoma tkiva. Jonizovan atom tokom sledećeg desetmilijarditog dela sekunde formira slobodne radikale koji za milioniti deo sekunde reaguju sa biološki značajnim molekulima i izazivaju posledice u vidu mutacija, hromozomskih aberacija, ćelijske smrti ili onkogenih transformacija [16]. Ovakve genetske promene mogu nastati i pri malim vrednostima primljenih doza, npr. ozračenje radonom od  $37 \text{ Bq}/\text{m}^3$ 's daje ćeliji bronhijalnog epitela dozu od  $0.45 \mu\text{Gy}$ , a srednja kancerogena doza iznosi  $0.08 \mu\text{Gy}$  [23]. Promene na ćelijskom i molekularnom nivou izazvane jonizujućim zračenjem znatno su izraženije u ranim životnim fazama, što ukazuje na poseban zdravstveni rizik kod dece.

**Radijacioni rizik R** predstavlja verovatnoću da jedna osoba zadobije radijacionu povredu (bolest) kao posledicu ozračenja, odnosno predstavlja odnos broja osoba sa pojavom štetnih efekata prema ukupnom broju osoba koje su ozračene jednakom dozom zračenja. U slučaju izloženosti pojedinca radonovim potomcima, ukupan rizik R u plućima je suma dva člana [1]:

$$R = a_b Q D_b + a_p Q D_p; \quad (2.11)$$

gde su:

- $a_b$  i  $a_p$  - faktori absolutnog rizika za bronhijalni i pulmatorni deo pluća,
- $D_b$  i  $D_p$  - odgovarajuće apsorbovane doze i
- $Q$  - faktor kvaliteta alfa zračenja.

Faktor absolutnog rizika predstavlja odnos broja kancera izazvanih zračenjem DF(D) i apsorbovane doze D [1]:

$$a = \frac{DF(D)}{D}. \quad (2.12)$$

U sadašnjem trenutku srednja učestalost plućnog kancera u industrijski razvijenim zemljama je od 2 do 6% u odnosu na ukupnu smrtnost. Pri tome je ta učestanost vrlo različita za pušače i nepušače; za pušače je 10%, a za nepušače 1%. Jedan deo tih plućnih kancera je izazvan radonom i njegovim potomcima: za srednju vrednost koncentracije radonovih potomaka u atmosferi zatvorenih prostorija od  $15 \text{ Bq/m}^3$  (EEC) oko 5% svih plućnih kancera je povezano sa radonovim potomcima [1]. Prema procenama Agencije EPA (Environmental Protection Agency) ukupan efekat izloženosti radonu i potomcima stanovništva SAD (225 miliona) je između 10000 i 20000 smrtnih slučajeva za jednu godinu [23].

Problemu radijacionog rizika se može pristupiti i indirektno na osnovu usvojenih modela, statističkih podataka i proračuna. Međunarodna komisija ICRP (International Commission on Radiological Protection) je razvila i publikovala filozofiju, metodologiju i referentne podatke za ovu vrstu proračuna. Relevantni medecinski parametri su standardizovani i publikovani u vidu koncepta "Referentnog čoveka" [7].

Fiziologija i metabolizam su modelovani u vidu sistema "kompartmenata", (tzv. prostora - u fiziološkom smislu) u kojima se radioaktivni elementi zadržavaju izvesno vreme, iz koga se određenom brzinom elemenišu ili u koji nekom brzinom stižu. Zbog kompleksnosti anatomije respiratornog sistema i procesa u njemu, posebno se i detaljnije razmatraju modeli za proračun doza od radona i njegovih potomaka.

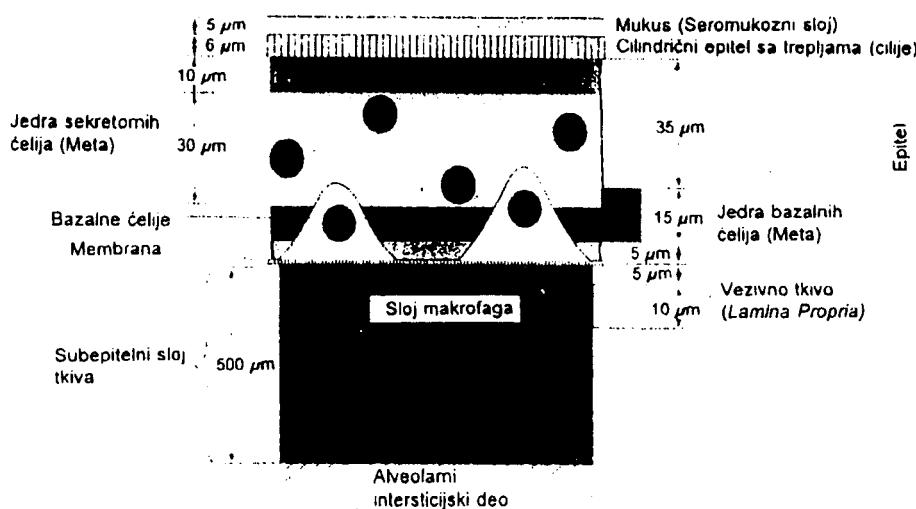
### 2.3.1. DOZIMETRIJSKI MODEL RESPIRATORNOG TRAKTA

Dozimetrijski model ljudskih pluća je kompleksan model koji se sastoji iz sledećih segmenata [7]:

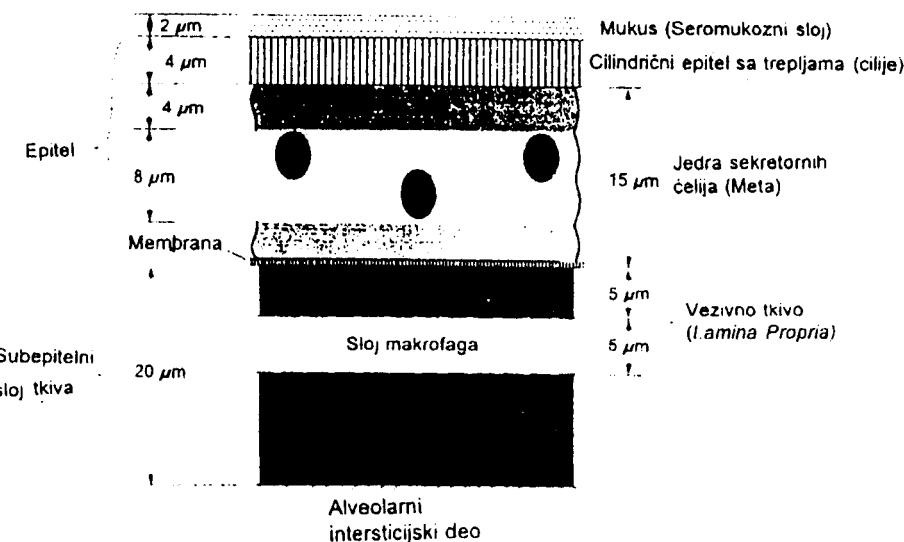
- geometrijski model traheo-bronhijalnog stabla i pulmanornog dela,
- matematički tretman depozicije aerosola na unutrašnjim zidovima vazdušnih puteva (bronhija i bronhiola),
- biološki model transporta nataloženih radonovih potomaka, čišćenjem ili prenosom u krv,

- model raspodele ćelija mete i
- proračun apsorbovane energije (doze).

Najosetljivije na zračenje su ćelije bazalnog i sekretornog sloja i potrebno je izračunati energiju predatu ovim slojevima. Položaj ovih ćelija u epitelu je od izuzetnog značaja za proračun apsorbovane doze u njima pošto je domet alfa čestica u tkivu 48  $\mu\text{m}$  (6 MeV) i 71  $\mu\text{m}$  (7.69 MeV). Zid bronhije/bronhiole sastoji se iz nekoliko slojeva: sa unutrašnje strane se nalazi sloj sluzi (mucus), ispod su cilije i nakon sloja ispunjenog fluidom i tkivom nalazi se epitel sa slojem sekretornih i bazalnih ćelija. Ispod sloja bazalnih ćelija nalazi se bazna membrana, krvni sudovi i dr. (slike 2.7. i 2.8.) [7].

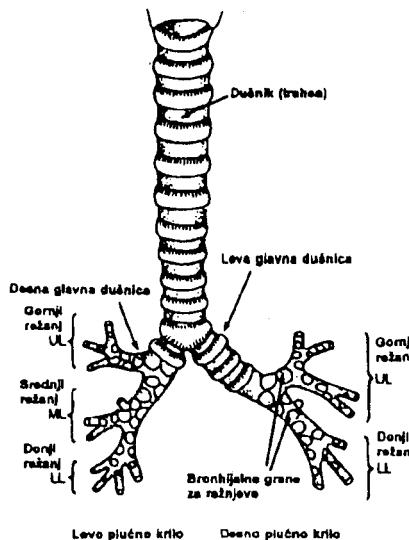


Slika 2.7. Model lokacije ćelija do 9-te generacije grananja



Slika 2.8. Model lokacije ćelija posle 9-te generacije grananja

Pored modela "lokacija" osetljivih ćelija za proračun doze potreban je i model dimenzija "vazdušnih" puteva. U upotrebi su dva modela: Weibelo-ov simetrični i Yeh-Schum-ov asimetrični model T-B stabla. Na slici 2.9. prikazano je prvih nekoliko generacija T-B stabla prema Yeh-Schum-u [7].



Slika 2.9. Približan model bronhijalnog stabla

Drugi model razmatra taloženje i čišćenje aerosola u k-toj generaciji bronhijalnog stabla. Prenos u krv je zanemaren, a čišćenje se obavlja samo transportom duž sluzokože. Bronhijalno stablo je podeljeno u više generacija sa različitim brzinama pomeranja sluzokože.

Treći model ljudskih pluća razmatra konkurenциju između čišćenja aerosola mukusom i prenosa u krv. Čišćenje je različito za slobodne i pripojene radonove potomke. Slobodni potomci se vrlo brzo prenose u krv, dok se pripojeni mogu preneti u krv, raspasti ili se preneti prema gornjim delovima disajnih puteva mehanizmom čišćenja (pokretanjem mukusa naviše).

Četvrti model pluća je najkomplikovaniji jer procenjuje i dozu od alfa emitera u epitelnom sloju na putu u krv.

Proračun doze u T-B (traheo-bronhijalnom) stablu se sastoji iz sledećih koraka:

- određivanje konverzionalih koeficijenata koji daju apsorbovanu dozu u osetljivim ćelijama po jednoj emitovanoj alfa čestici. Pri određivanju ovih koeficijenata potrebno je znati položaj alfa emitera (nije u potpunosti definisano da li su nataloženi radonovi potomci homogeno rastvoreni u sloju mukusa ili su na samoj površini mukusa ili prodiru dublje u epitel sa eksponencijalno opadajućom raspodelom) i položaj mete.
- određivanje aktivnosti nataložene u svakoj generaciji bronhija u zavisnosti od brzine unošenja radioaktivnosti.
- određivanje ravnotežne aktivnosti u svakoj bronhiji uzimajući u obzir brzinu taloženja, brzinu čišćenja, prenos u krv i raspada. To se postiže rešavanjem niza diferencijalnih jednačina oblika:

$$\frac{dN_{i,j}}{dt} = \frac{B_{i,j}}{\lambda_i} + A_{i-1,j} + \lambda_{c,j+1} N_{i,j+1} - (\lambda_i + \lambda_k + \lambda_{c,j}) N_{i,j} \quad (2.13)$$

gde su:

- $N_{i,j}$  - broj atoma i-tog radonovog potomka u bronhiji generacije j,
- $B_{i,j}$  - brzina taloženja i-tog radonovog potomka u bronhiji generacije j u (Bq/s),
- $\lambda_i$  - konstanta radioaktivnog raspada i-tog radonovog potomka,
- $A_{i,j}$  - ravnotežna aktivnost i-tog radonovog potomka u bronhiji generacije j,
- $\lambda_{c,j}$  - konstanta čišćenja mukusom u j-toj generaciji i
- $\lambda_k$  - konstanta prenosa u krv.

Rešenje jednačine (2.13) tražimo u obliku:

$$A_{i,j} = \frac{\lambda_i A_{i-1,j} + \lambda_{c,j+1} + B_{i,j}}{\lambda_i + \lambda_{c,j} + \lambda_k} \quad (2.14)$$

Prethodna jednačina (2.14) ustvari čini sistem većeg broja jednačina koje se rešavaju počev od 16-te generacije i to za prvi potomak  $i=1$  ( $^{218}\text{Po}$ ). Nakon toga sledi rešavanje za  $i=2$  i  $i=3$  (drugi i treći radonov potomak) u 16-toj generaciji, da bi se posle toga prešlo na 15-tu generaciju. Na taj način se izračunavaju ravnotežne aktivnosti u svim generacijama T-B stabla.

4. direktno dobijanje apsorbovane doze u sloju bazalnih i sekretornih ćelija množenjem izračunatih ravnotežnih aktivnosti sa ranije određenim konverzionim faktorima.

Opisana procedura kao i svođenje na sistemske jedinice i efektivne doze se programira i izvršava na računarima. Napravljeni programi onda omogućuju ispitivanje zavisnosti doze od raznih relevantnih parametara kao što su:

- dijametar aerosola;
- brzina udisanja;
- faktor ravnoteže radona i potomaka;
- slobodna frakcija itd.

Stvarna doza koju pojedinac primi od radonovih kratkoživećih potomaka se izračunava množenjem srednje vrednosti izlaganja u WLM sa faktorom 5 mSv/WLM koji predstavlja srednju vrednost efektivne doze po jedinici izlaganja radonovim potomcima predloženu od strane UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation) [7]. Na taj način dobija se efektivna ekvivalentna doza koju je određeni pojedinac primio.

## 2.4. KONCENTRACIJE RADONA U ZATVORENIM PROSTORIJAMA I NA OTVORENOM PROSTORU

Zbog visokog zdravstvenog rizika nivoi radona i njegovih kratkoživećih potomaka u vazduhu zatvorenih prostorija sistematski se ispituju u celom svetu. Prema preporukama Komisije ICRP [3] od 1994.godine dozvoljene koncentracije radona za zatvoreni prostor su:

- 200 Bq/m<sup>3</sup> za nove zgrade i
- 400 Bq/m<sup>3</sup> za stare zgrade.

Građevinski standard za izgradnju novih stanova i kuća je 100 Bq/m<sup>3</sup> radona kao prosečni godišnji nivo, 200 Bq/m<sup>3</sup> za preporuku jeftinih sanacionih mera i 600 Bq/m<sup>3</sup> za preporuku skupih sanacionih mera [3]. Naime, i u slučaju ovih preporuka i normi primenjuje se princip ALARA (As Low As Reasonably Achievable - onoliko nisko koliko se razumno može postići). Zato ukoliko apsolutna obilnost u delovima litosfere ili geohemijski procesi regionalno ili lokalno značajno koncentrišu prirodne radionuklide, tolerišu se neizbežni viši nivoi jonizujućeg zračenja.

Koncentracije radona na otvorenom prostoru su nekoliko puta niže nego u zatvorenim prostorijama i iznose u intervalu od 5 – 15 Bq/m<sup>3</sup> [25]. Koncentracije u zatvorenim prostorijama su znatno više zbog "nagomilavanja" radona usled stalnog dotoka iz zemljišta i građevinskog materijala i pre svega usled smanjenja prirodne ventilacije zatvorenih prostorija u cilju uštede toplotne energije.

U velikom broju zemalja vrši se prikupljanje podataka o koncentraciji radona i njegovih potomaka kako na otvorenom prostoru, tako i u zatvorenim prostorijama, kartografišu se tereni u odnosu na radon, pronađe se nepovoljne oblasti sa povećanom koncentracijom u zgradama, karakteriše se građevinski materijal itd. U tabeli 2.3. [1] date su srednje godišnje vrednosti koncentracije radona u zatvorenim prostorijama za nekoliko zemalja Izvršena je procena i srednje vrednosti koncentracije radona u zatvorenim prostorijama za ceo svet i ova procena iznosi 37 Bq/m<sup>3</sup> [1].

Tabela 2.3. Srednje koncentracije radona u zatvorenim prostorijama.

<b>Srednja godišnja koncentracija radona u zatvorenom</b>	
<b>Zemlja</b>	<b>(Bq/m<sup>3</sup>)</b>
Finska	64
Italija	27
Nemačka	42
Francuska	37
UK	11
Turska	50
Kipar	9
Austrija	22
Švedska	85

U tabeli 2.4. dati su nivoi radona u stanovima i kućama u Srbiji 1992.godine [3]. Ispitivanje je obavljeno u dnevnoj i spavaćoj sobi stanova u prizemlju, prvom ili drugom spratu kao i u podrumu ukoliko ga zgrade imaju. Od 130 u 19 stanova (14.60%) indikovana je preporuka za sprovođenje jestinih mera i u dva stana (1.53%) skupih sanacionih mera. Stanovi i kuće sa većim koncentracijama radona su stari objekti izgrađeni pre više decenija.

Tabela 2.4. Koncentracija radona u stambenim objektima u Srbiji 1992.

	<b>Koncentracija radona u (Bq/m<sup>3</sup>)</b>				
	<100	100-200	200-400	400-600	>600
Beograd	55	8	10	4	2
Novi Sad	23	2	0	0	0
Knjaževac	6	2	2	0	0
Niš	5	3	2	0	0
Ostala mesta	3	2	1	0	0
Ukupno	92	17	15	4	2
Procenat	70.76	13.07	11.53	3.07	1.53

Sanacione mere koje se predlažu mogu biti zasnovane na:

- optimizaciji zaštite, tj. "cost-benefit" analizi i
- dobrovoljnosti vlasnika, odnosno, korisnika stanova i kuća.

## 2.5. FAKTORI KOJI UTIČU NA KONCENTRACIJU RADONA U ZATVORENIM PROSTORIJAMA

Radon u zatvoreni prostor dospeva iz nekoliko izvora:

- difuzijom iz zemljišta na kome je sagrađen objekat,
- difuzijom iz građevinskih materijala,
- difuzijom iz vode koja se koristi u objektu i
- iz atmosfere putem ventilacionih otvora.

Na koncentraciju radona u zatvorenim prostorijama do drugog sprata dominantan uticaj ima građevinsko zemljište (hemski sastav, fizičke i vodno-mehaničke osobine, prvenstveno poroznost), a na višim spratovima je značajniji uticaj građevinskog materijala. Značajni faktori su svakako i kvalitet gradnje, tip konstrukcije, ventilacija, kao i klimatske promene.

### 2.5.1. ZEMLJIŠTE KAO IZVOR RADONA I JAČINA EKSHALACIJE

Uran i torijum se pojavljuju u: stenama, rudama, zemljištu, kao i u podzemnim i površinskim vodama. U najvećim koncentracijama su zastupljeni u rudama (u sopstvenim rudnim ležištim ili kao primese u rudama fosfata, olova i cinka i drugih sirovina), dok se u stenama značajnije koncentrišu u kiselim magmatskim stenama, škriljcima i glinama (tabela 2.5.) [2]. U sekundarnim geološkim sredinama, koje karakterišu procesi površinskog raspadanja stena i ruda, transporta i sedimentacije kao i biogeni procesi, prirodni radionuklidi mogu da obrazuju koncentracije u zemljištu, vodi, vazduhu i vegetaciji (tabela 2.6.) [2].

Tabela 2.5. Srednji sadržaj radionuklida u sedimentnim stenama i zemljištu.

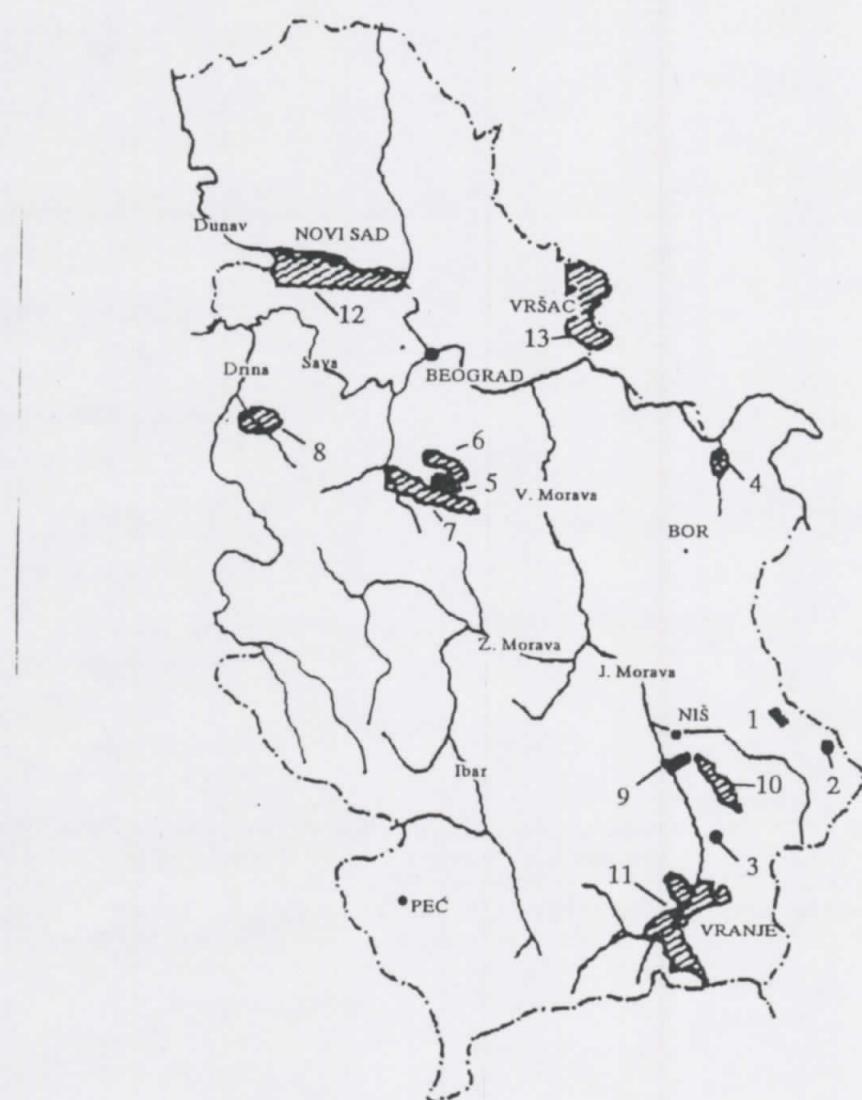
Element radionuklid	Stene			Zemljišta
	gline	peščari	karbonatne	
K (%) <sup>1</sup>	2.66	1.07	0.27	1.36
Rb (mg/kg)	140	60	3	60
La (mg/kg)	92	30	- <sup>2</sup>	-
Th (mg/kg)	12	1.7	1.7	6
U (mg/kg)	3.7	0.45	2.2	1

<sup>1</sup> Relativna obilnost K-40 je 0.018% K; Rb-87 je 27.85% Rb i La-138 je 0.089% La

<sup>2</sup> Nedostaju podaci

Tabela 2.6. Srednji sadržaj radionuklida u vodama, vegetaciji i živoj materiji.

Radionuklid	Rečna voda	Okeanska voda	Vegetacija (pepeo)	Živa materija
K (%)	0.0023	0.0387	3.0	0.3
Rb (mg/kg)	0.001	0.12	100	5
Th (mg/kg)	0.0001	0.00001	-	-
U (mg/kg)	0.04	0.003	0.5	<0.010

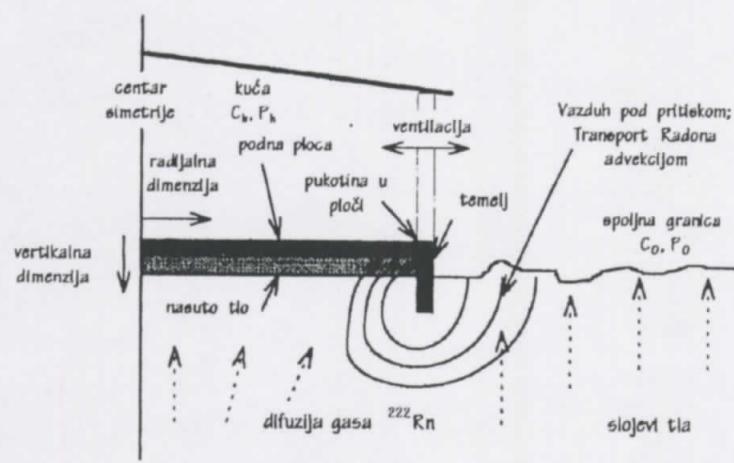


Slika 2.10. Rudna ležišta, mineralizacije i oreoli geohemiju disperzije u Srbiji

Delimično torijum, a naročito uran prelaze u hidrotermalne rastvore i mogu da obrazuju hidrotermalne rudne koncentracije u i oko granitoidnih masa. U Srbiji su na više lokaliteta otkrivena hidrotermalna rudna ležišta i mineralizacije urana (slika 2.10.) [2], između ostalih i na

Fruškoj Gori. Usled interakcije podzemnih voda sa stenama i rudama dolazi do prevođenja određenih radionuklida u mobilnu fazu i samim tim i do razdvajanja radionuklida zbog razlike u geohemijskim osobinama. Na taj način se uranovi potomci- radijum i radon razdvajaju od urana i posebno lokalno koncentrišu u mineralnim i termalnim vodama i zemljишtu. Migraciju urana u površinskim uslovima ograničava prisustvo karbonatnih i fosfatnih jona, obrazovanje nerastvornih soli, vezivanje za organsku fazu i adsorpcija na mineralima glina.

Direktni putevi ekshalacije radona iz zemljишta u zgrada su otvore i pukotine u betonskim pločama i blokovima, loše veze između zidova i ploča, odvodne cevi, podni sливници pokriveni perforiranim poklopциma i slično (slika 2.11.) [11]. Naime, razlika u pritiscima pokreće vazduh, a sa njim i radon iz okolnog zemljишta do ispod građevina, odakle radon prodire u kuće kroz gore pomenute otvore.



Slika 2.11. Mehanizmi transporta radona iz zemljишta u zatvorene prostorije

*Jačina ekshalacije  $J$ , odnosno fluks radona iz tla, je aktivnost radona koja u jedinici vremena prođe kroz jediničnu površinu zemljишta. Opseg vrednosti za fluks radona iz tla iznosi od 0.0002 do 0.053 Bq/(m<sup>2</sup>s) pri čemu je srednja vrednost 0.016 Bq/(m<sup>2</sup>s) [1]. Ekshalacija radona iz zemljишta zavisi od više faktora:*

- koncentracije radijuma  $^{226}\text{Ra}$  u zemljisu,
- permeabilnosti (propustljivosti) zemljishta,
- vlažnosti zemljishta,
- stanja vegetacionog pokrivača i
- meteoroloških prilika.

Problem difuzije radona kroz tlo je značajan i iz drugih razloga jer povećan fluks radona iz tla na nekim mestima može ukazivati na ležišta uranove rude, ili se može pratiti tok podzemnih voda (ako one nose rastvoren  $^{226}\text{Ra}$ ).

## 2.5.2. GRAĐEVINSKI MATERIJALI KAO IZVOR RADONA

Veličina koja određuje jačinu ekshalacije radona iz građevinskih materijala je efektivna specifična aktivnost radijuma  $^{226}\text{Ra}$   $A_{\text{eff}}(\text{Ra})$  i definiše se kao proizvod specifične aktivnosti radijuma  $A_s(\text{Ra})$  i koeficijenta emanacije radona  $\eta$ :

$$A_{\text{eff}}(\text{Ra}) = \eta A_s(\text{Ra}); (\text{Bq/kg}) \quad (2.15)$$

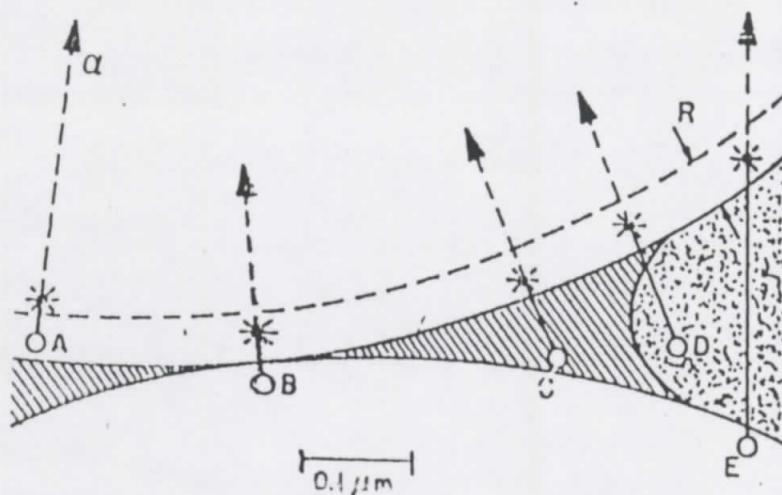
U tabeli 2.7. dati su rezultati merenja specifične aktivnosti radijuma  $A_s(\text{Ra})$  za različite građevinske materijale u nekoliko zemalja [19].

Tabela 2.7. Specifična aktivnost  $^{226}\text{Ra}$  u različitim građevinskim materijalima.

Zemlja	Građevinski materijal	Broj uzoraka	$A_s(^{226}\text{Ra})$ [Bq/kg]
građevinski kamen			
UK	Granit	7	89
Mađarska	mermer	2	18
Nemačka	škriljac	8	44
punioci betona			
Nemačka	pesak, šljunak	50	15
UK	pesak, šljunak	59	4
Rusija	cement	-	26
beton			
SAD	Beton	4	26
Švedska	laki beton sa aluminijumskim škriljcem (1930.-1975.)	-	1300
Rusija	laki beton	-	74
cigla			
UK	silikatna cigla	13	15
Norveška	cigla	18	63
Švedska	cigla	-	96
Građevinski materijal od industrijskog otpada			
SAD	otpad uranske industrije	-	4625
SAD-Florida	fosfatni gips	-	1221
Finska	šljaka	3	102
Nemačka	crveni pepeo(od boksita)	-	280

Radioaktivnost građevinskog kamena zavisi od minerala koji su korišćeni za njegovu proizvodnju (npr. granit, aluminijumski škriljac i vulkanski tuf imaju povišen sadržaj prirodnih radionuklida). Pesak i šljunak po pravilu imaju specifičnu aktivnost radijuma blisku srednjoj vrednosti za zemljište. Iz tabele 2.7. se može zapaziti da koncentracija  $^{226}\text{Ra}$  u građevinskim materijalima zavisi i od mesta proizvodnje sirovine. Karakteristično je za Švedsku i ostale skandinavske zemlje da, zbog klimatskih i geoloških uslova, imaju povećan sadržaj radijuma u odnosu na druge zemlje. Naročito visoka koncentracija  $^{226}\text{Ra}$  je ustanovljena u lakovu betonu od aluminijumskog škriljca u Švedskoj (ovaj materijal je mnogo korišćen za gradnju zgrada počev od 1930. pa sve do 1976. kada je njegova proizvodnja obustavljena i u tim zgradama danas živi 10% stanovnika Švedske). Povećan sadržaj prirodnih radionuklida može nastati i kao posledica korišćenja sekundarnih sirovina iz industrijskih postupaka, npr.: elektrofilterski pepeo - dobijen sagorevanjem uglja u termoelektranama ili sagorevanjem boksitne rude - šljaka, otpad industrije uranijuma i sl. Upotreba fosfatnog gipsa na primer, može da poveća sadržaj radona u zatvorenim prostorijama i za faktor 102 [5].

Koefficijent emanacije  $\eta$  predstavlja deo radonovih potomaka koji napuste komad materijala u kome su formirani i menja se u širokom opsegu vrednosti od 1 do 30% [1]. Samo oni atomi radona koji su nakon formiranja (raspadom jezgra  $^{226}\text{Ra}$ ) dospeli u supljine koje postoje u materijalu mogu se difuzijom oslobođiti u atmosferu (slika 2.12.) [10].



Slika 2.12. Ilustracija različitih načina dospevanja radona u međučestične šupljine materijala

U tabeli 2.8. dati su rezultati istraživanja sprovedenog u Rusiji čiji je cilj bio otkrivanje zakonitosti koje određuju ekshalaciju radona iz građevinskog materijala [19]. Iz tabele se vidi da je efektivna specifična aktivnost  $^{226}\text{Ra}$  skoro svih istraživanih materijala niža od one za zemljište.

Tabela 2.8. Koeficijent emanacije radona  $\eta$  i efektivna specifična aktivnost  $A_s(\text{Ra}) \eta$  u građevinskim materijalima i zemljištu (srednje vrednosti)

Materijal	broj uzoraka	$A_s(\text{Ra})$ [Bq/kg]	$\eta$ [%]	$A_s(\text{Ra}) \eta$ [Bq/kg]
Glina	23	48	21	7.0
Zemljište	7	21	21	4.1
Teški beton	15	27	11	3
Pesak	14	9.6	20	1.9
laki beton	5	23	9.5	1.5
Silikatna cigla	6	14	10	1.3
Crvena cigla	16	36	1.5	0.55
Cement	13	41	1.3	0.48
Građevinski gips	4	8.9	4.4	0.37
Krečnjak	4	3.7	4.6	0.18

Po vrednosti koeficijenta emanacije, svi građevinski materijali se mogu grubo podeliti na dve grupe:

- materijali koji se pri izradi podvrgavaju visokotemperaturnoj obradi (crvena cigla, pepeo, cement, šljaka) i oni imaju koeficijent emanacije od 1-2% i
- materijali koji se ne podvrgavaju visokotemperaturnoj obradi (silikatna cigla, šljunak, pesak) koji imaju oko 10 puta veći koeficijent emanacije (10-20%) [19].

Visokotemperaturna obrada materijala smanjuje jačinu ekshalacije radona iz građevinskog materijala (usled promene mikrostukture pri višim temperaturama dolazi do zbijanja mikročestica i do zatvaranja pukotina).

U Pravilniku o maksimalnim granicama radioaktivne kontaminacije čovekove sredine i o vršenju dekontaminacije definisane su maksimalne granice radioaktivne kontaminacije građevinskog materijala koji se koristi u visokoj gradnji. Navedene granice ne smeju da budu veće od vrednosti 400 Bq/kg za  $^{226}\text{Ra}$ , 300 Bq/kg za  $^{232}\text{Th}$ , 5000 Bq/kg za  $^{40}\text{K}$  i za ukupan zbir veštačkih radionuklida 4000 Bq/kg, stim da se ispunji uslov za B.F. (Building Factor) [16]:

$$B.F. = \frac{C_{Ra}}{400} + \frac{C_{Th}}{300} + \frac{C_K}{5000} + \frac{C_V}{4000} \leq 1; \quad (2.16)$$

gde su:

- $C_{Ra}$  - koncentracija  $^{226}\text{Ra}$  u (Bq/kg),
- $C_{Th}$  - koncentracija  $^{232}\text{Th}$  u (Bq/kg),
- $C_K$  - koncentracija  $^{40}\text{K}$  u (Bq/kg) i
- $C_V$  - koncentracija svih radionuklida veštačkog porekla u (Bq/kg).

### 2.5.3. VODA I GAS KAO IZVORI RADONA U ZATVORENIM PROSTORIJAMA

Doprinos koncentraciji radona u zatvorenim prostorijama od vode i gasa je od sekundarnog značaja; njihov doprinos zavisi od koncentracije radona u njima, ali i od načina i obima njihovog korišćenja. Uzima se da se oko 50% radona prisutnog u vodi osloboodi pri njenom korišćenju u kupatilima i pri kuvanju. Koncentracija radona u vodi je vrlo različita od mesta do mesta: najveća je u bunarima u reonima sa granitnom podlogom do 630 Bq/m<sup>3</sup>, a najniža u tekućim površinskim vodama do 2 Bq/m<sup>3</sup> [1]. Pri visokoj koncentraciji radona u vodi i pri većoj "uzburkanosti" i potrošnji ovaj izvor radona može postati značajan (tabela 2.9.) [13].

Tabela 2.9. Srednje koncentracije radona u prostorijama sa različitom namenom.

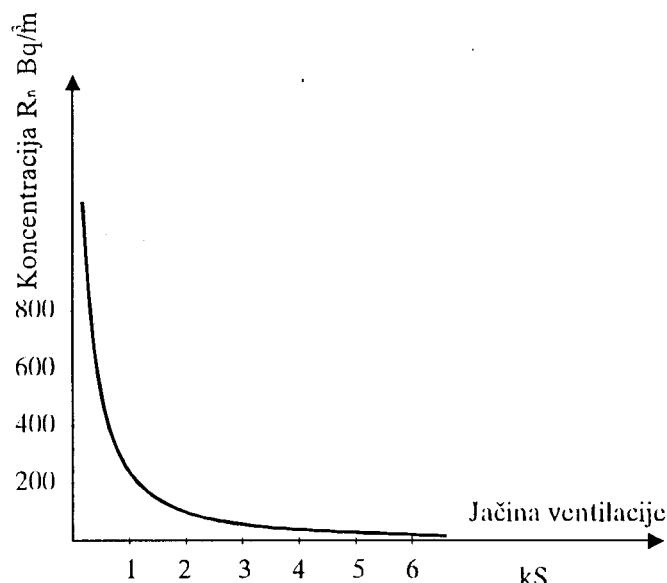
Tip prostorije	Broj uzoraka	Srednja koncentracija $^{222}\text{Rn}$	
		Bq/m <sup>3</sup>	(pCi/l)
dnevna soba	185	55	(1.49)
kuhinja	94	64	(1.73)
trpezarija	37	42	(1.14)
kupatilo	53	51	(1.38)
spavaća soba	49	50	(1.36)
hodnik	12	54	(1.46)
ostalo	8	34	(0.92)

### 2.5.4. ZAVISNOST KONCENTRACIJE RADONA U ZATVORENIM PROSTORIJAMA OD JAČINE VENTILACIJE

*Jačina ventilacije L* je faktor koji utiče na smanjenje koncentracije radona u zatvorenim prostorijama, a izražava se u broju izmena celokupnog vazduha u prostoriji u toku 3.6 ks (odnosno jednog časa 1 h). Pri tome se ventilacija sastoji iz:

- **infiltracije** - nekontrolisani protok vazduha iz zatvorenih prostorija kroz otvore i šupljine u uslovima kada su prozori i vrata zatvoreni,
- **prirodne ventilacije** - provetrvanje prostorija kroz otvorene prozore i vrata i
- **veštačke ventilacije** - koja je izazvana elektromehaničkim uređajima za ventilisanje prostorija (koja nije preporučljiva ukoliko je propustljivost okolnog zemljišta veća od  $10^{-10} \text{ m}^2$  jer snižava pritisak unutar prostorija i dovodi do "usisavanja" radona iz zemljišta) [12].

U normalnim uslovima (tj. bez veštačke ventilacije) jačina ventilacije je oko 1 izmena vazduha na 3.6 ks. Zgrade sa jačinom ventilacije ispod 0.5 izmena u toku 3.6 ks se smatraju loše ventilisanim, a iznad 1 izmene vazduha u toku 3.6 ks dobro ventilisanim. Merenja koncentracije radona u zatvorenim prostorijama su često praćena merenjem jačine ventilacije i takva merenja pokazuju zavisnost koncentracije radona od jačine ventilacije kao na slici 2.13. [1].



Slika 2.13. Zavisnost koncentracije radona u zatvorenim prostorijama od jačine ventilacije

Veza koncentracije radona unutar i van zatvorenih prostorija, ventilacije i jačine ekshalacije (fluksa radona) se može dati u analitičkoj formi u obliku [1]:

$$C_{Rn} = (L C_{Rno} + J)/(\lambda + L) \quad (2.17)$$

gde su

- $C_{Rn}$  - koncentracija radona u zatvorenoj prostoriji u ( $\text{Bq}/\text{m}^3$ ),
- $C_{Rno}$  - koncentracija radona na otvorenom prostoru u ( $\text{Bq}/\text{m}^3$ ),
- $L$  - jačina ventilacije u ( $1/\text{s}$ ),
- $J$  - jačina ekshalacije radona u ( $\text{Bq}/\text{sm}^2$ ) i
- $\lambda$  - konstanta radioaktivnog raspada radona u ( $1/\text{s}$ ).

## 2.6. TRANSPORT RADONA IZ TLA I GRAĐEVINSKOG MATERIJALA U ZATVORENE PROSTORIJE

Prepostavlja se da je građevinski materijal homogen i porozna sredina, a da se transport radona kroz materijal odvija kroz sistem pora ispunjenih vazduhom. Transport radona se tada odvija putem dva različita procesa:

- difuzija uslovljena razlikom koncentracije radona u sistemu pora. Ovaj proces se odvija po Fikovom zakonu:

$$J_d = -D_e \frac{dC}{dz}; \quad (2.18)$$

gde su:

- $J_d$  - fluks radona u  $\text{Bq}/(\text{m}^2\text{s})$ ,
- $D_e$  - koeficijent difuzije u  $(\text{m}^2/\text{s})$  i
- $(dC/dz)$  - gradijent koncentracije duž pravca z u  $(\text{Bq}/\text{m}^4)$ .
- difuzija radona uslovljena razlikom u pritiscima koja vlada između vazduha u porama i spoljašnjeg vazduha. Ovaj proces se odvija po Darsijevom zakonu [10]:

$$v = -\frac{k}{\eta} \frac{dP}{dz}; \quad (2.19)$$

gde su:

- $v$  - brzina toka radona u  $(\text{m}/\text{s})$ ,
- $k$  - propustljivost medijuma u  $(\text{m}^2)$ ,
- $\eta$  - dinamička viskoznost vazduha na  $10^\circ\text{C}$  u  $(\text{Ns}/\text{m}^2)$  i
- $(dP/dz)$  - gradijent pritiska duž sloja debljine z u  $(\text{Pa}/\text{m})$ .

Jednačina difuzije radona u poroznoj sredini ima oblik [10]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{D_e}{\varepsilon} \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - \frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial(vC)}{\partial z} - \lambda C + \phi; \quad (2.20)$$

gde su:

- $C$  – koncentracija radona  $^{222}\text{Rn}$  u sistemu pora u  $(\text{Bq}/\text{m}^3)$ ,
- $t$  - posmatrano vreme u  $(\text{s})$ ,
- $\varepsilon$  - poroznost (odnos zapremine pore prema celokupnoj zapremini),
- $\lambda$  - konstanta radioaktivnog raspada  $^{222}\text{Rn}$  u  $(\text{s}^{-1})$  i
- $\phi$  - broj atoma  $^{222}\text{Rn}$  nastalih u jedinici vremena, u jediničnoj zapremini pore materijala u  $(\text{Bq s}^{-1} \text{m}^{-3})$ .

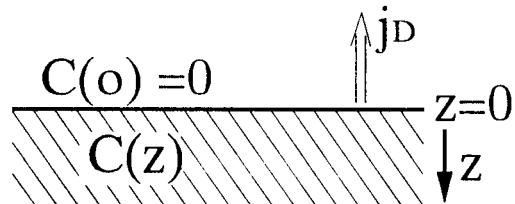
U većini slučajeva posmatramo stacionarno stanje, tako da jednačina (2.20) dobija oblik [10]:

$$\frac{D_e}{\varepsilon} \frac{d^2 C}{dz^2} - \frac{1}{\varepsilon} \frac{d(vC)}{dz} - \lambda C + \phi = 0. \quad (2.21)$$

U zavisnosti od graničnih uslova razlikujemo sledeća rešenja diferencijalne jednačine (2.21):

### 1. Ekshalacija iz zemljišta u otvoren prostor

Ovaj slučaj razmatra tlo sa ravnomernom raspodelom  $^{226}\text{Ra}$  koja je proporcionalna brzini proizvodnje radona  $\phi$ . Na graničnoj površini je koncentracija radona  $C$  jednaka nuli, pri prirodnoj cirkulaciji vazduha (slika 2.14.) [10].



Slika 2.14. Ekshalacija iz zemljišta u otvoren prostor [10]

$$C(z) = \frac{\phi}{\lambda} \left( 1 - e^{-\frac{z}{l}} \right), \quad z \leq 0 \quad (2.22)$$

gde su:

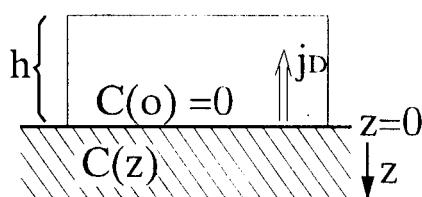
- $C(z)$ - meri se od nultog nivoa  $z=0$  do  $\phi/\lambda$  duboko u zemljištu
- $l$  - karakteristična dužina na kojoj se naglo promeni koncentracija radona:  $l=(D_e/\epsilon\lambda)^{1/2}$ .

Pri tome fluks radona iz tla iznosi:

$$J_d = -D_e \frac{\partial C}{\partial z} \Big|_{z=0} = \phi \left( \frac{D_e \epsilon}{\lambda} \right)^{\frac{1}{2}} = \phi \epsilon l. \quad (2.23)$$

### 2. Ekshalacija iz zemljišta u zatvoreni prostor

Razmatra se koncentracija radona u tlu i fluks radona iz zemljišta u zatvoreni prostor, prepostavljajući da su ostali parametri identični parametrima u slučaju 1.



Slika 2.15. Ekshalacija iz zemljišta u zatvoreni prostor [10]

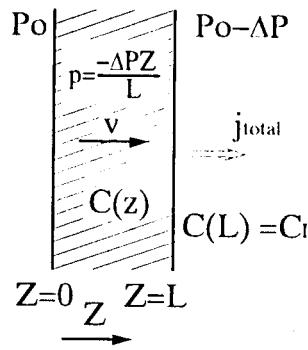
$$C(z) = \frac{\phi}{\lambda} \left( 1 - \frac{e^{-\frac{z}{l}}}{1 + \epsilon \frac{l}{h}} \right), \quad z \leq 0. \quad (2.24)$$

Pri čemu je fluks radona u ovom slučaju:

$$J_d = \epsilon \phi l \left( 1 + \epsilon l h^{-1} \right)^{-1} \quad (2.25)$$

### 3. Uticaj Darsijevog toka na ekshalaciju radona iz ploče

Slučaj razmatra koncentraciju i fluks radona kroz ploču sa uniformnom raspodelom  $^{226}\text{Ra}$ , pri čemu su koncentracije radona levo i desno od ploče konstantne i iznose  $C_s$  i 0 respektivno. Razlika pritisaka sa jedne i druge strane ploče je takođe konstantna.



Slika 2.16. Uticaj Darsijevog toka na ekshalaciju radona iz ploče [10]

$$C(z) = \frac{\phi}{\lambda} \left( 1 - \frac{e^{\frac{vz}{2D_e}} \operatorname{sh}\left(\frac{L-z}{\Lambda}\right) + e^{-\frac{v(L-z)}{2D_e}} \operatorname{sh}\left(\frac{z}{\Lambda}\right)}{\operatorname{sh}\left(\frac{L}{\Lambda}\right)} \right) + C_s e^{\frac{vz}{2D_e}} \frac{\operatorname{sh}\left(\frac{L-z}{\Lambda}\right)}{\operatorname{sh}\left(\frac{L}{\Lambda}\right)}; \quad (2.26)$$

gde su:

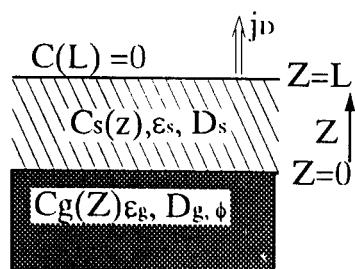
- $C_s$  - konstantna koncentracija radona sa leve strane ploče,
- $L$  - debљina ploče i
- $\Lambda$  - modifikovana dužina difuzije:  $\Lambda^{-1} = [v^2/(4De^2) + l^2]^{1/2}$ .

Tada se totalni fluks radona dobija u obliku:

$$J_{total} = \left. \left( -D_e \frac{dC}{dz} + vC \right) \right|_{z=L} = \frac{\phi}{\lambda} \left( \frac{v}{2} + \frac{D_e}{\Lambda} \frac{\operatorname{ch}\left(\frac{L}{\Lambda}\right) - e^{\frac{vL}{2D_e}}}{\operatorname{sh}\left(\frac{L}{\Lambda}\right)} \right) + C_s \frac{D_e}{\Lambda} \frac{e^{\frac{vL}{2D_e}}}{\operatorname{sh}\left(\frac{L}{\Lambda}\right)}. \quad (2.27)$$

### 4. Ekshalacija radona iz ploče oslonjene na tlo

Posmatra se kriva koncentracije i radonov fluks kroz gornju površinu ploče debljine  $L$ , koja je oslonjena na tlo sa konstantnom koncentracijom  $^{226}\text{Ra}$ . Ploča ne sadrži radijum. Koncentracija radona u vazduhu iznad ploče je jednaka nuli.



Slika 2.17. Ekshalacija radona iz ploče oslonjene na tlo [10].

$$C_s(z) = \frac{\phi}{\lambda} \left( 1 - \frac{e^{ikz}}{1 + \left( \frac{I_s}{I_g} \right) \left( \frac{D_s}{D_g} \right) \operatorname{th} \left( \frac{L}{I_s} \right)} \right). \quad (2.28)$$

$$C_s(z) = \frac{\phi}{\lambda} \left( \frac{I_s}{I_g} \right) \left( \frac{D_s}{D_g} \right) \left( \frac{-sh \left( \frac{z}{I_s} \right) + ch \left( \frac{z}{I_s} \right) th \left( \frac{L}{I_s} \right)}{1 + \left( \frac{I_s}{I_g} \right) \left( \frac{D_s}{D_g} \right) th \left( \frac{L}{I_s} \right)} \right) \quad (2.29)$$

Fluks radona kroz gornju površinu ploče iznosi:

$$J_d = -D_s \frac{dC_s}{dz} \Big|_{z=L} = \phi D_s I_s \left( ch \left( \frac{L}{I_s} \right) \left( 1 + \left( \frac{I_s}{I_g} \right) \left( \frac{D_s}{D_g} \right) th \left( \frac{L}{I_s} \right) \right) \right)^{-1}. \quad (2.30)$$

## 2.7. VARIJACIJE KONCENTRACIJE RADONA U VAZDUHU

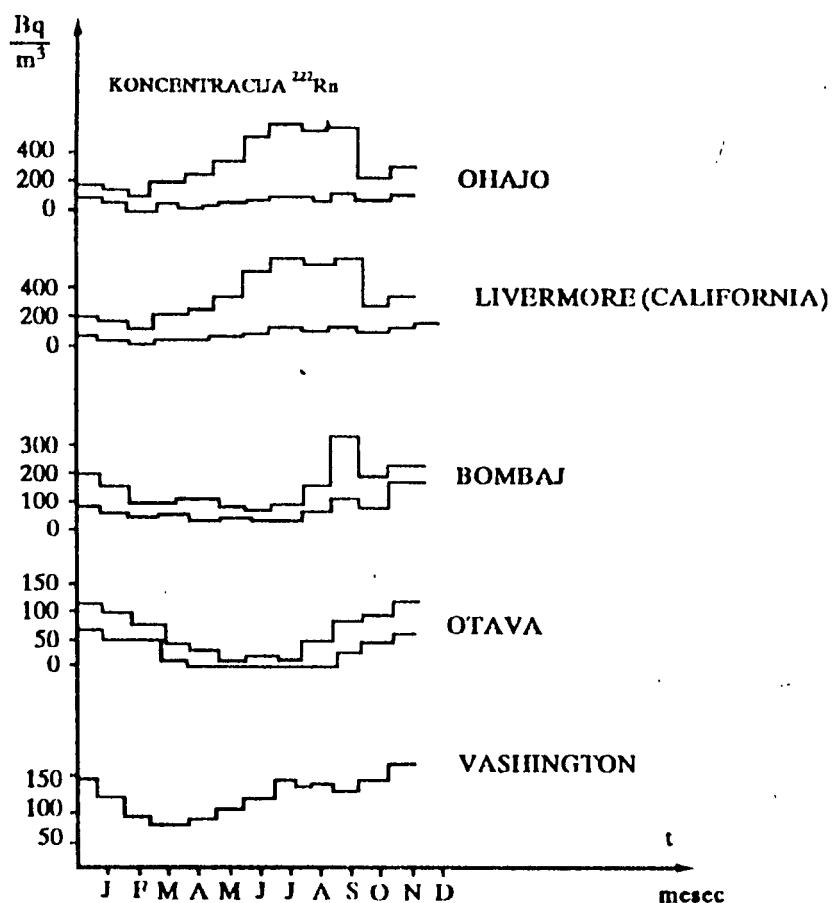
Koncentracija radona na otvorenom prostoru zavisi od:

- jačine ekshalacije radona iz zemljišta i
- meteoroloških parametara.

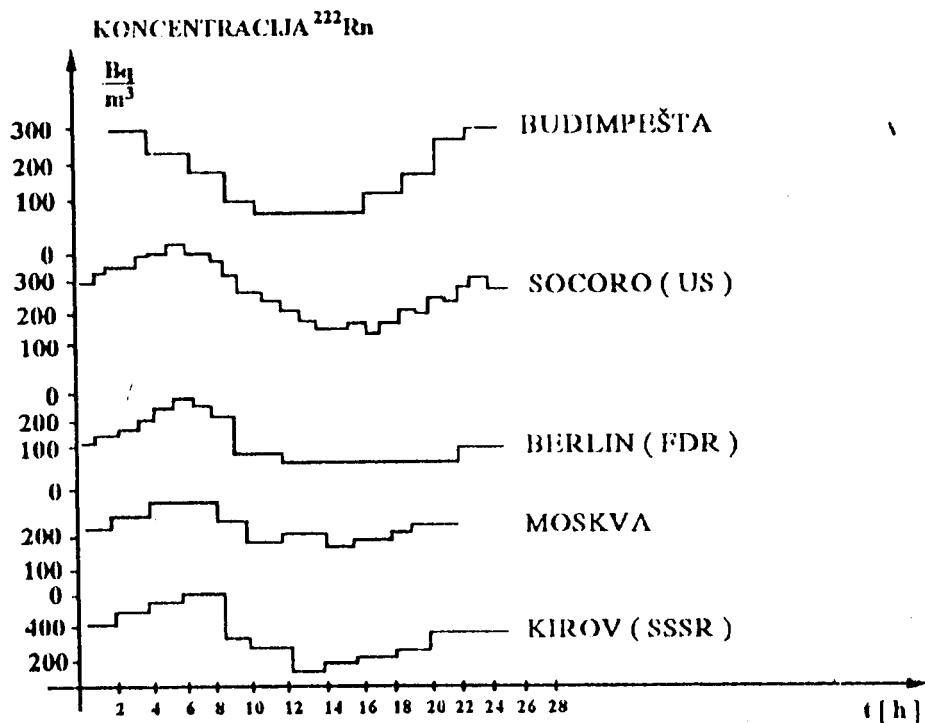
Glavni izvor radona na otvorenom prostoru je zemljište, dok su svi ostali izvori (npr. voda, prirodni gas, geotermalni fluidi, vulkanski gasovi, vazduh koji struji iz pećina i drugi) od sekundarnog značaja i mogu se zanemariti.

Pre poređenja koncentracije radona na raznim lokacijama, mora se odrediti visina na kojoj se meri i usvojeno je da to bude 1m. Koncentracije radona pokazuju dnevne i sezonske promene u toku jedne godine. Maksimum koncentracije radona treba očekivati u jesen ili na početku zime, a minimum u proleće (maksimum koncentracije odgovara maksimalnoj stabilnosti atmosfere i obrnuto). Na slici 2.18. [1] prikazane su varijacije koncentracije radona u toku godine (predstavljene su usrednjene vrednosti merenja u toku 8 godina, pri čemu su merenja obavljana 3 puta nedeljno u 8 časova ujutro).

Dnevne varijacije koncentracije radona su takođe pripisane promenama stabilnosti atmosfere. Rano ujutro imamo maksimum koncentracije radona zbog temperaturske inverzije koja sprečava vertikalno vazdušno strujanje što dovodi do ekstremno stabilne atmosfere. Posle izlaska sunca, počinje zagrevanje tla i prizemnih slojeva atmosfere, nestaje temperaturska inverzija i uspostavljuju se vertikalne vazdušne struje. Usled ovoga koncentracija radona u prizemnom sloju atmosfere opada. Kasno popodne raste stabilnost atmosfere što dovodi do porasta koncentracije radona. Na slici 2.19. [1] data je promena koncentracije radona na otvorenom prostoru u toku jednog dana na više lokacija.



Slika 2.18. Sezonske promene koncentracije radona.

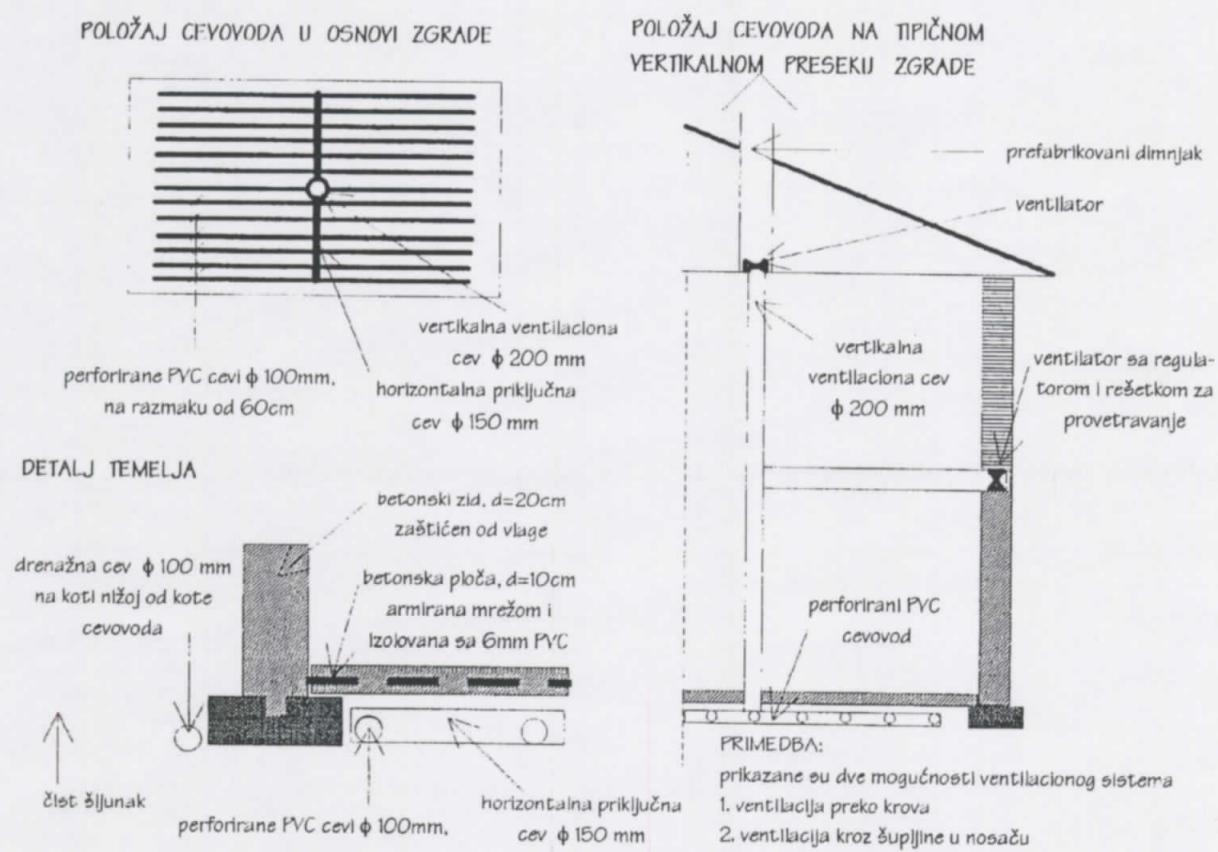


Slika 2.19. Dnevne varijacije koncentracije radona na otvorenom prostoru

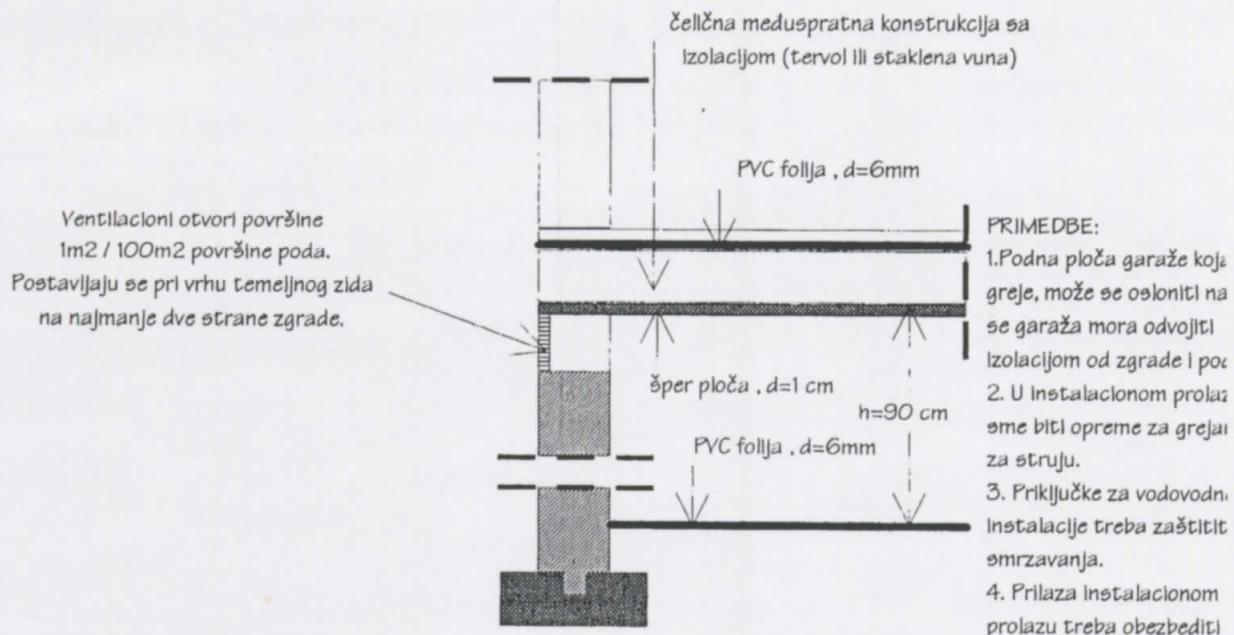
## 2.8. MERE ZA REDUKCIJU RADONA

Poznato je nekoliko opših postupaka za sprečavanje prenosa radona iz zemljišta u građevinske objekte [16]:

- uklanjanje izvora radona, odnosno materijala sa povišenim nivoom radioaktivnosti u neposrednoj blizini temelja ili ispod ploče podruma (moguće otpadne stene iz rudnika, materijal sa tehnološki povišenim nivoom prirodne radioaktivnosti - šljaka, pepeo),
- skretanje toka radona pre nego što dođe do građevinske konstrukcije, postavljanjem ventilacionog sistema ispod donje ploče podruma koji se sastoji ili iz sistema perforiranih cevi povezanih sa ventilacionim cevima i dimnjakom (aktivna ventilacija) ili se ventilacija obavlja kroz instalacione prolaze (pasivna ventilacija), čime se emanirani radon izbacuje iz prostora ispod podruma u atmosferu. Detalji oba sistema ovog postupka redukovana dati su na slikama 2.20. i 2.21. [18].



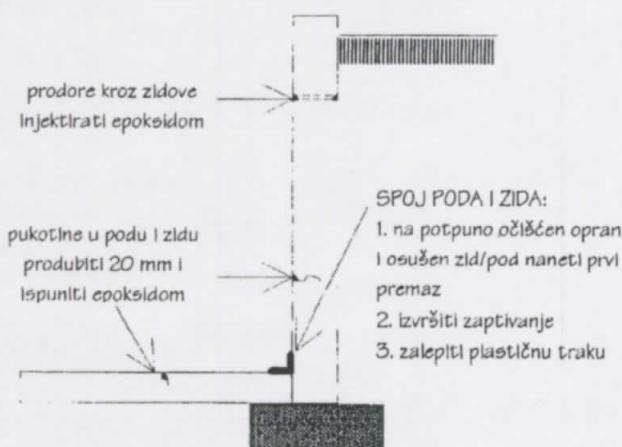
Slika 2.20. Shematski prikaz ventilacionog sistema ispod poda



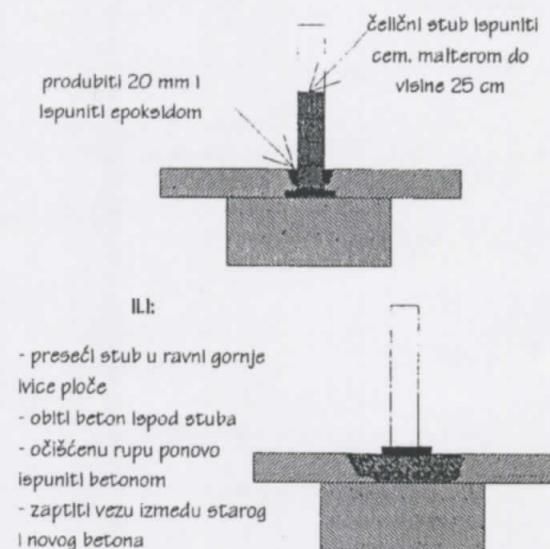
Slika 2.21. Shematski prikaz ventilacionog sistema kroz instalacioni prolaz

- postavljanje prepreka između izvora kontaminacije i životnog prostora (slike 2.22. i 2.23.) [18] zatvaranjem pukotina u betonu ploče osnove i zidova podruma, postavljanjem dodatne armature, obradom spojeva između ploča i zidova, kao i oko prodora cevi posebnim zaptivnim materijalom i zabranom upotrebe šupljih betonskih blokova zbog mogućeg izraženog efekta dimnjaka,

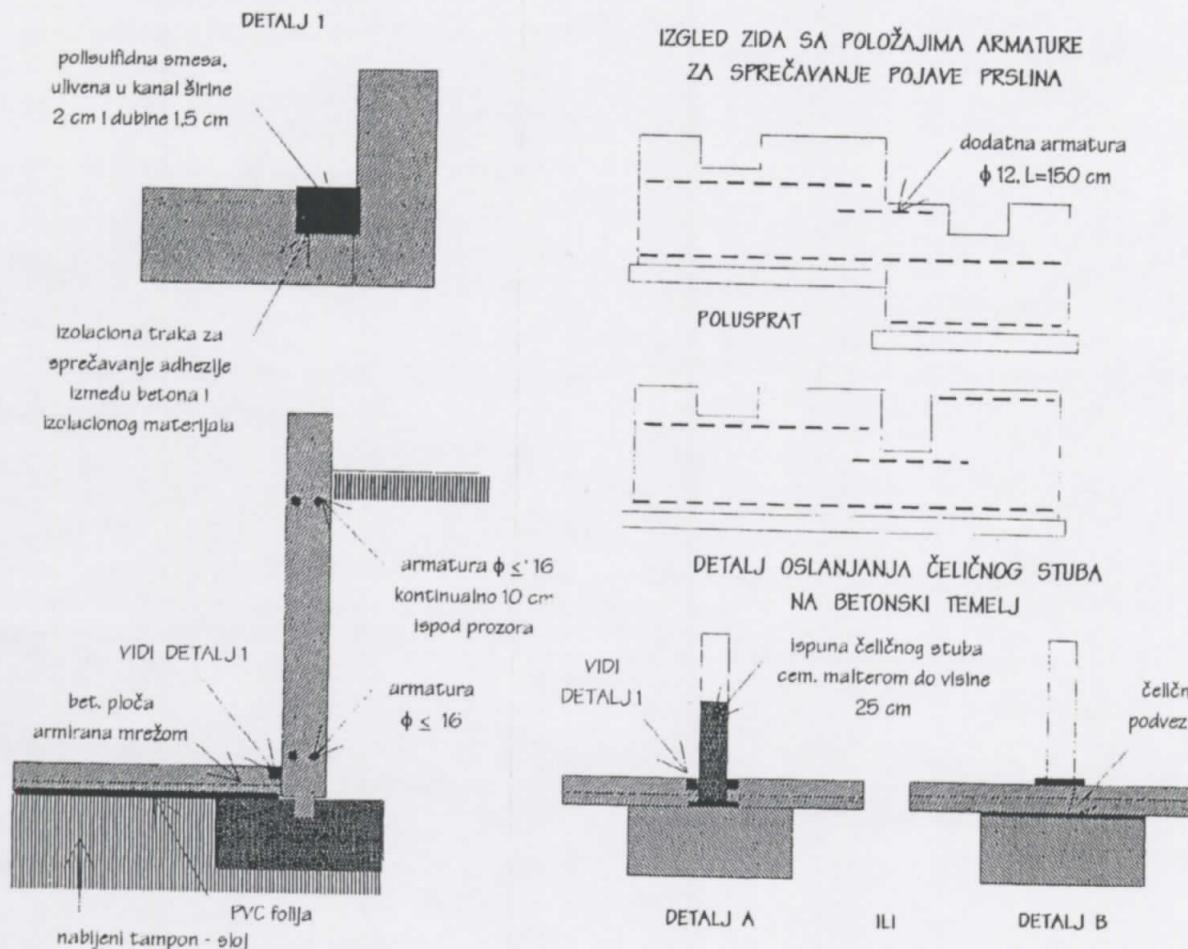
DETALJ - PLOČA PODRUMA I TEMELJNI ZID



DETALJI OKO STUBOVA



Slika 2.22. Detalji zaptivanja podruma u postojećim zgradama



Slika 2.23. Detalji zaptivanja kod novih zgrada

- intenziviranje ventilacije povećavanjem broja izmena vazduha na sat (dobra prirodna ventilacija podrazumeva više od jedne kompletne izmene vazduha na sat)
- ugrađivanje instalacija za prečišćavanje vazduha, što predstavlja najskuplji metod zbog visokih cena elektrostatičkih i elektronskih prečistača kojima se koncentracija radona u zgradama može sniziti do 19 puta.

## 2.9. METODE MERENJA RADONA I NJEGOVIH KRATKOŽIVEĆIH POTOMAKA

Postoji širok spektar raznih uređaja, mernih kompleta, instrumenata i dr. za merenje radona i njegovih kratkoživećih potomaka. Tehnike za merenje radona se mogu, prema trajanju merenja, podeliti u dve osnovne grupe:

- trenutne tehnike - daju vrednost koncentracije radona u jednom trenutku i ukoliko koriste neki izvor napajanja strujom nazivaju se još i aktivne merne tehnike.

- dugovremenske tehnike - daju srednju vrednost koncentracije radona u jednom dužem vremenskom intervalu i pogodnije su za procenu radiacionog zdravstvenog rizika. Ukoliko se pri ovakovom merenju ne koriste aktivne električne komponente onda su to pasivne merne tehnike.

Od trenutnih mernih tehnika najpoznatija je Lucass - ova sonda koja meri alfa zračenje radonovih potomaka. To je staklena bočica čije su unutrašnje strane obložene scintilacionim materijalom, najčešće ZnS(Ag), i u koju se upušta vazduh kroz gumeni zatvarač. Vazduh se propušta kroz filter i potomci radona se zaustave na njemu. Sačeka se najmanje tri sata do uspostavljanja ravnoteže između radona i njegovih potomaka, a zatim se scintilacije u ZnS(Ag) izazvane alfa zračenjem detektuju fotomultiplikatorom. Postoji proporcionalnost između broja impulsa u jedinici vremena i koncentracije radona u vazduhu uvučenom u bočicu. Konstanta te proporcionalnosti se naziva kalibracioni koeficijenat, zavisi od geometrije same bočice i predstavlja koncentraciju radona u vazduhu u ( $\text{Bq}/\text{m}^3$ ) po jednom impulsu u jedinici vremena (korigovano na fon brojačkog uređaja).

"Filterska metoda" se zasniva na propuštanju vazduha preko raznih nepokretnih filtera i predstavlja jednu od najpoznatijih tehnika za merenje radonovih potomaka. Pomoću odgovarajućih pumpi propušta se vazduh preko nepokretnog filtra, brzinom  $w (\text{m}^3/\text{s})$  pri čemu se prirodni aerosoli, kojima je pripojen veći deo kratkoživećih radonovih potomaka, zadržavaju na filteru. Posle prekida propuštanja vazduha kroz filter, meri se alfa zračenje sa filtra i na osnovu dobijenih rezultata određuje koncentracija potomaka u atmosferi. Da bi se odredila koncentracija radona nužno je prepostaviti određeni stepen ravnoteže između radona i potomaka.

Najznačajniji među dugovremenskim (integracionim) metodama su trag detektori i aktivni ugalj. Princip rada trag detektora sastoji se u sledećem: pri prolasku alfa čestice kroz neki izolator usled jonizacije atoma i molekula dolazi do stvaranja niza slobodnih hemijskih radikala koji, ukoliko je njihova gustina dovoljno velika, predstavljaju "latentan trag". Ako komad izolatora sa postojećim latentnim tragovima izložimo nekoj hemijski aktivnoj supstanci dobijaju se tragovi vidljivi i pod optičkim mikroskopom. Najčešće korišćeni trag detektori su Kodac - ovi LR-115 i plastični CR 39 detektor koji se proizvodi u više zemalja Evrope i SAD.

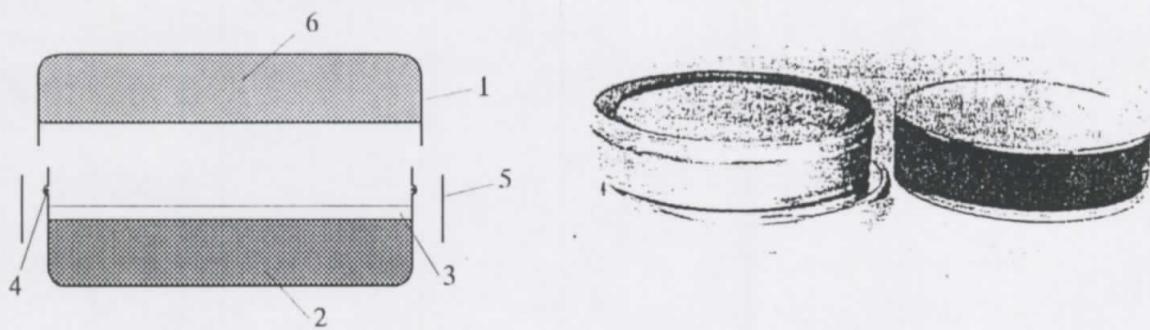
Za merenje radona trag detektori se koriste na dva načina: kao "nepokriveni" detektori pri čemu tragovi nastaju od alfa čestica emitovanih od radona i potomaka koji se nalaze u atmosferi blizu detektora; i kao detektori u difuzionoj komori u koju se radon iz atmosfere difunduje kroz filter papir. Na taj način potomci radona ne prodiru u komoru i ne detektuju se. Broj tragova po jedinici površine detektora ( $r$ ) i u jedinici vremena izlaganja je proporcionalan srednjoj vrednosti koncentracije radona ( $C$ ) [1]:

$$C = k r \quad (2.31)$$

pri čemu je konstanta proporcionalnosti  $k$  - kalibracioni koeficijent i on zavisi od vrste korišćenih trag detektora, uslova njihovog izlaganja i nagrizanja i faktora radioaktivne ravnoteže između radona i njegovih potomaka. Njegovo određivanje, odnosno kalibriranje detektora koji se želi koristiti, obavlja se pomoću izvora dovoljno visoke koncentracije radona (rastvor  $\text{RaCl}$  ili komad uranove rude).

Merenje radona pomoću adsorpcije na aktivnom uglju je pasivna, integraciona tehnika kao i trag detektori. Međutim ova metoda ima znatnih prednosti nad trag detektorima, a to su pre svega: kraće vreme integracije potrebno za dobijanje informacije, veća osetljivost, niža cena, nema hemijskog razvijanja niti dugotrajnog očitavanja tragova, uzorci se mogu koristiti više puta posle odgovarajućeg temperaturnog tretmana i analiza podataka može biti automatizovana (primenom postojećih softverskih programa) tako da zahteva minimum ljudskog napora.

Aktivni ugalj se nalazi u kanistru, slika 2.24. [25] i [26], koji se prilikom merenja otvara i postavlja na željenu lokaciju. Radon iz vazduha difuzijom dospeva u kanister i adsorbuje se na aktivnom uglju, koji ima visok afinitet prema nekoliko gasova i para, uključujući i  $^{222}\text{Rn}$ . Radon adsorbovan u granulama aktivnog uglja raspada se na kratkoživeće potomke:  $^{218}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Pb}$ ,  $^{214}\text{Bi}$ ,  $^{214}\text{Po}$  i  $^{210}\text{Pb}$ . Radonovi potomci  $^{214}\text{Pb}$  i  $^{214}\text{Bi}$  emituju gama zračenje ( $^{214}\text{Pb}$  – 295 i 352 keV;  $^{214}\text{Bi}$  – 609 keV), što omogućava određivanje koncentracije radona gama spektrometrijski preko navedenih prelaza, jer se već nakon tri časa uspostavi ravnoteža radona i potomaka u uglju.



Slika 2.24. Izgled kanistra sa aktivnim ugljem

1. metalna kutija sa poklopcem; 2. zrna aktivnog uglja; 3. metalna rešetka; 4. unutrašnji šireći prsten; 5. vinil traka; 6. mehani umetak (stiropor) pričvršćen za unutrašnju površinu poklopca.

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

Da bi se ostvarila kvalitetna gama-spektrometrija, detektor koji se koristi treba da ima veliku efikasnost i dobру energetsku rezoluciju pošto gama kvant karakteriše visoka energija i relativno mala ionizaciona sposobnost. Kao najpogodniji detektori u gama-spektrometriji koriste se scintilacioni NaJ(Tl) i poluprovodnički Ge(Li) i HPGe detektori. Scintilacione detektore karakteriše visoka efikasnost usled dobre apsorpcije gama zračenja, dok poluprovodnički detektori imaju visoku rezoluciju usled male energije, koja je potrebna za stvaranje para elektron-šupljina [25].

Prema EPA specifikaciji aktivnost radionuklida, izuzev  $^{40}\text{K}$ , u aktivnom uglju koji se primjenjuje za adsorpciju radona, mora da bude manja od 3.7 mBq/kg. S obzirom da aktivni ugalj ima jak afinitet prema vlazi iz vazduha, neophodna je kalibracija za dati opseg vlažnosti. Za svaki kanister, kalibracioni faktor se može odrediti na osnovu relacije [25]:

$$CF = \frac{I - I_F}{T_s E RN DF}; \quad (2.32)$$

gde su:

- CF - kalibracioni faktor, tj. brzina adsorpcije radona u ( $\text{m}^3/\text{ks}$ ),
- I – ukupan spektralni intenzitet u ( $\text{C}/\text{ks}$ ),
- $I_F$  – spektralni intenzitet fona u ( $\text{C}/\text{ks}$ ),
- $T_s$  - vreme eksponacije kanistra u (ks),
- E - efikasnost detektora u ( $\text{C}/(\text{ks Bq})$ ),
- RN - koncentracija radona u ( $\text{Bq}/\text{m}^3$ ) i

- DF - faktor raspada od sredine vremena ekspozicije do početka brojanja, koji se izračunava po formuli [25]:

$$DF = e^{-\frac{0.693 t}{T_{1/2}(Rn)}}, \quad (2.33)$$

gde su:

- t - vreme u danima proteklo od sredine ekspozicije do početka merenja i
- $T_{1/2}(Rn)$  - vreme poluraspada radona (3.824 dana).

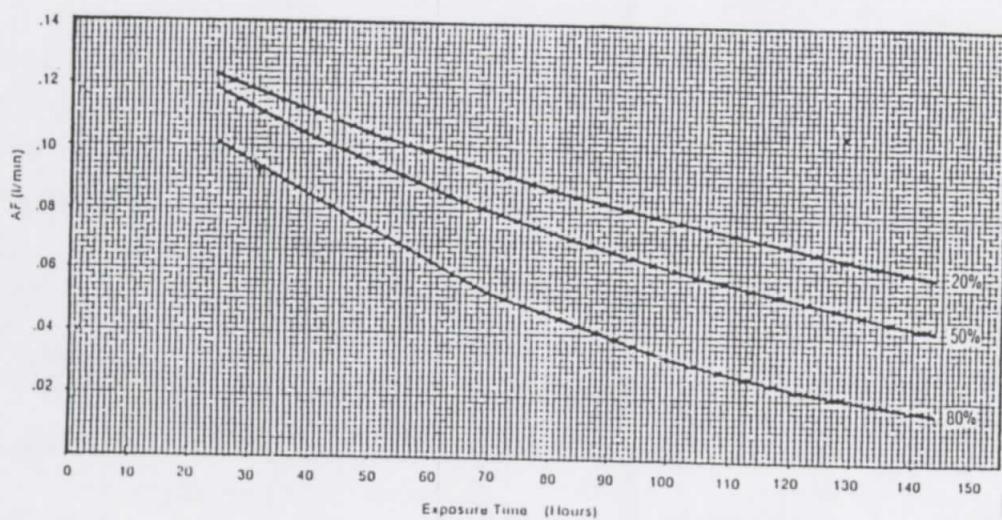
Iz jednačine (2.32) se može izraziti nepoznata koncentracija radona RN:

$$RN = \frac{I - I_F}{T_s E CF DF}. \quad (2.34)$$

Ukoliko je period ekspozicije duži od 48 časova, inicijalni CF mora biti korigovan na sledeći način: na osnovu prinosa vode odabira se odgovarajuća kriva vlažnosti (tabela 2.10. i slika 2.25.) [4] sa koje se očitava podešavajući faktor AF.

Tabela 2.10. Kriterijumi za odabir krive vlažnosti

Težinski priros	Kriva
manji od 1.0 g	20%
1.0 - 4.0 g	50%
veći od 4.0 g	80%



Slika 2.25. Zavisnost podešavajućeg kalibracionog faktora AF od vremena ekspozicije (kriva vlažnosti)

Korekcija inicijalnog kalibracionog faktora se vrši na osnovu formule:

$$Krajnji\ CF = Iinicijalni\ CF \frac{AF\ za\ dato\ vreme\ ekspozicije}{AF\ za\ dva\ dana\ (48h)\ ekspozicije} \quad (2.35)$$

## 3. EKSPERIMENTALNI DEO

### 3.1. METODOLOGIJA I MERNA TEHNIKA

U toku merenja korišćena je kompletna merna procedura i kanistri sa aktivnim ugljem USA EPA.

Sam postupak sastojao se u postavljanju otvorenih kanistara sa aktivnim ugljem u prostoriju u kojoj se ispituje koncentracija radona na udaljenosti 1 m od poda, pri čemu se vodilo računa da kanistri budu udaljeni od zidova i vodenih tokova koji predstavljaju takođe izvore radona u zatvorenim prostorijama (poglavlja 2.5.2. i 2.5.3.).

Posle određenog vremena izlaganja (dva dana ili oko 48 časova) kanister se hermetički zatvara i količina radona u uzorku se određuje gama-spektrometrijski preko emisije karakterističnog gama zračenja njegovih potomaka – olova i bizmuta.

S obzirom da aktivni ugalj ima jak afinitet prema vlazi iz vazduha, neophodna je kalibracija za dati opseg vlažnosti. Inicijalni kalibracioni faktor CF se određuje na osnovu masenog prinosa vode u (g) apsorbovane za period ekspozicije. Zbog toga se meri masa svakog kanistra na analitičkoj vagi pre otvaranja i neposredno posle zatvaranja. Na osnovu izmerenih vrednosti odredi se priraštaj mase  $\Delta m$  i sa krive zavisnosti kalibracionog faktora od prinosa vode (slika 3.1.) očita vrednost kalibracionog faktora za svaki mereni kanister.

Određivanje spektralnih intenziteta gama zračenja iz kanistra izvršeno je NaJ(Tl) scintilacionim detektorom velike efikasnosti. Detektor je smešten u niskofonsku komoru zapremine  $1\text{m}^3$ . Zidovi komore, debljine 25 cm, izrađeni su od brodskog čeličnog lima, koji je izliven pre Drugog svetskog rata, pa se pouzdano zna da zidovi nisu kontaminirani dugoživećim fisionim produktima [25].

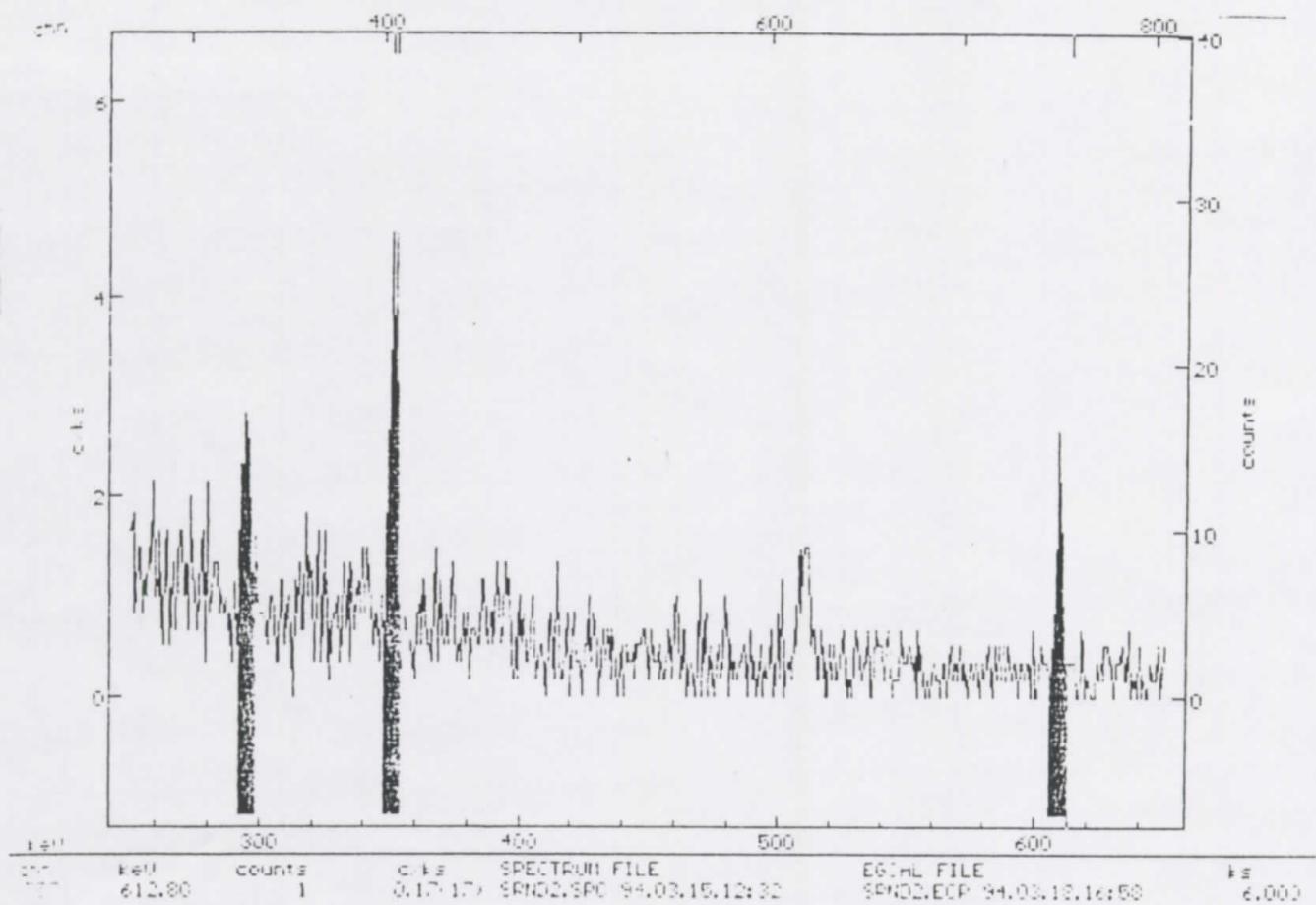
Uzorak (kanister) postavlja se uz slobodan kraj koaksijalne cevi neposredno uz sam detektor i za određeno vreme merenja ( $t_m = 3 \text{ ks}$ ) vrši odbroj signalna za markirane spektralne linije: 295, 352 i 609 keV-a (slika 3.1.).

Efikasnost detektora određuje se iz odbroja koji daje standardni kanister na izabranim spektralnim linijama.

Za merenje fonskog odbroja koristi se nulti kanister koji nije bio izložen ekspoziciji. Mala radioaktivnost koju on pokazuje potiče od prirodnih radionuklida koji se nalaze u aktivnom drvenom uglju.

Ako je  $I$  izmereni intenzitet gama zračenja iz kanistra, a  $I_F$  intenzitet fona kanistra, za određivanje koncentracije radona koristi se relacija:

$$RN = \frac{I - I_F}{T_s E CF DF} \quad (3.1)$$



Slika 3.1. Markirane spektralne linije bizmuta i olova.

### 3.2. REZULTATI MERENJA I DISKUSIJA

U tabeli 3.1. dati su rezultati merenja fonskog odbroja:

Tabela 3.1. Intenzitet fona kanistra

Spektralna linija $E_\gamma$ [keV]	Odbroj $N_F$	Intenzitet $I_F$ [ $\text{ks}^{-1}$ ]
295	1035	$15 \pm 4$
352	3093	$55 \pm 7$
609	1796	$25 \pm 5$
$\sum_i I_{F_i} = 95 \pm 9$		

$$I_F = (95 \pm 9) \text{ ks}^{-1}$$

Greška ukupnog spektralnog intenziteta računa se po formuli:

$$\Delta I_F = \sqrt{(\Delta I_{F1})^2 + (\Delta I_{F2})^2 + (\Delta I_{F3})^2} \quad (3.2)$$

U tabeli 3.2. dati su rezultati merenja odbroja koji daje standardni kanister:

Tabela 3.2. Spektralni intenzitet standardnog kanistra

Spektralna linija $E_\gamma$ [keV]	Odbroj $N_S$	Intenzitet $I_S$ [ $\text{ks}^{-1}$ ]
295	18827	$9414 \pm 97$
352	34404	$17202 \pm 131$
609	26403	$13201 \pm 115$
$\sum_i I_{Si} = 39817 \pm 199$		

$$I_S = (39817 \pm 199) \text{ ks}^{-1}$$

Aktivnost standardnog kanistra je 1.12.1990. iznosila:  $A_0 = 722.6 \text{ Bq}$ . Aktuelna aktivnost određuje se iz formule:

$$A_S = A_0 2^{-\frac{t}{T_{1/2}(Ra)}} \quad (3.3)$$

i za poznate podatke:

- $t = 8.9$  godina I
- $T_{1/2}(Ra) = 1620$  godina

Iznosi:

$$A_S = 719.9 \text{ Bq}$$

Efikasnost detektora za date uslove se računa po formuli:

$$E = \frac{I_S - I_F}{A_S} \quad (3.4)$$

i za korišteni NaJ(Tl) detektor iznosi:

$$E = 55.2 (\text{Bq ks})^{-1}$$

**Postupak računanja koncentracije radona  $^{222}\text{Rn}$  u zatvorenoj prostoriji gama-spektrometrijskom metodom:**

**Ustanova:** Predškolska ustanova u ulici Ilike Đuričića

**Vreme ekspozicije  $T_S$ :**

Vreme otvaranja	9:03	20.09.1999.
Vreme zatvaranja	9:00	22.09.1999.

Vreme ekspozicije  $T_S = 172.7 \text{ ks}$

**Priraštaj mase  $\Delta m$ :**

masa pre otvaranja	157.5 g
masa posle zatvaranja	161.6 g

$$\text{Priraštaj mase: } \Delta m = 4.1 \text{ g}$$

**Kalibracioni faktor CF:**

Za priraštaj mase od 4.1 g, kalibracioni faktor ima vrednost (slika 3.2.):

$$CF = 0.086 \text{ l/min} = 1.46 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{ks}$$

**Spektralni intenzitet I:**

Tabela 3.3. Rezultati merenja odbroja kanistra  $D_2$

Spektralna linija $E_\gamma [\text{keV}]$	Odbroj N	Intenzitet $I [\text{ks}^{-1}]$
295	952	$317 \pm 18$
352	2056	$685 \pm 26$
609	1632	$544 \pm 23$
$\sum_i I_i = 1546 \pm 39$		

$$I = (1546 \pm 39) \text{ ks}^{-1}$$

**Faktor raspada DF:**

Početak merenja u: 9:34 22.09.1999.  
 $t = 1.024$  dana

$$DF = 2^{-\frac{t}{T_{1/2}(Rn)}} = 2^{-\frac{1.024}{3.824}} = 0.831 \quad (3.5)$$

**Koncentracija radona  $^{222}\text{Rn}$  u zatvorenoj prostoriji RN:**

Zamenom poznatih vrednosti u formulu (3.1):

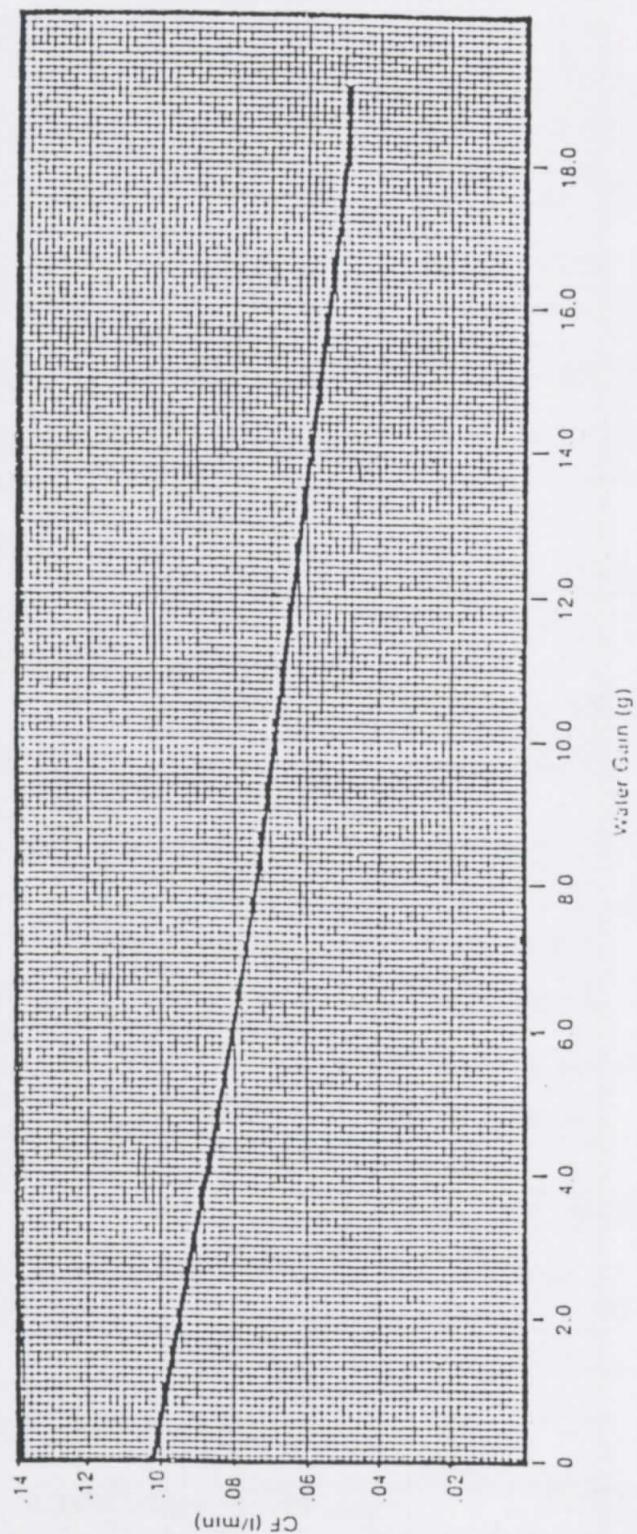
$$RN = \frac{I - I_F}{T_s E CF DF} =$$

dobija se koncentracija:

$$RN = (125.5 \pm 4.2) \text{ Bq/m}^3$$

Pri čemu se greška merenja određuje na osnovu formule:

$$\Delta RN = \frac{\sqrt{I} + \sqrt{I_F}}{T_s E CF DF} \quad (3.6)$$



Slika 3.2. Zavisnost kalibracionog faktora od prinosa vode.

Rezultati određivanja koncentracije radona u predškolskim i školskim ustanovama u Novom Sadu u periodu zima/proleće 1998/99.

Tabela 3.4. Koncentracije radona u predškolskim (prva kolona) i školskim ustanovama (druga kolona)

No.	Lokacija	Koncentracija [Bq/m <sup>3</sup> ]	No.	Lokacija	Koncentracija [Bq/m <sup>3</sup> ]
1.	Dragiš Brašovan	< 1.1	1.	Peteš Šandor	8.8±1.3
2.	Alekse Šantića	< 1.2	2.	Mihajlo Pupin	9.6±1.4
3.	Laze Kostića	< 1.2	3.	Nikola Tesla	12.7±1.4
4.	Episkopa Visariona	2.7±1.4	4.	7. April	13.8±1.5
5.	Branimira Čosića	4.5±0.9	5.	Miloš Crnjanski	19.7±1.6
6.	Braće Krkljuš	6.6±1.6	6.	Vasa Stajić	27.2±1.8
7.	Ćirila i Metodija	12.3±1.5	7.	Žarko Zrenjanin	28.9±1.8
8.	Sonje Marinković	13.2±1.7	8.	J. Popović (mala)	33.3±1.9
9.	Gagarinova	17.6±1.8	9.	J. Popović (velika)	52.0±2.2
10.	Braće Dronjak	19.5±1.7	10.	Jožef Atila	53.4±2.2
11.	Jiričkova	24.1±1.4	11.	Đorđe Natošević	54.1±2.3
12.	Svetozara Miletića	26.5±1.5	12.	Isidora Sekulić	54.5±2.3
13.	Narodnog Fronta	36.9±1.9	13.	Mašinska škola	101.8±3.0
14.	Zlatne Grede	40.5±1.7	14.	Dositej Obradović	115.5±3.2
15.	Marodićeva	46.5±1.9	15.	Branko Radičević	250.1±4.6
16.	Vršačka	66.4±2.2			
17.	Janka Čmelika	85.2±2.9			
18.	Ilije Đuričića	113.0±4.0			
19.	Antona Urbana	148.0±3.0			
20.	Trg Komenskog	162.7±3.5			

#### Ponovljena merenja za pet predškolskih ustanova sa povišenom koncentracijom <sup>222</sup>Rn

Tabela 3.5. Koncentracije radona izmerene 20.9.1999.

No.	Lokacija	Koncentracija [Bq/m <sup>3</sup> ]
1.	Trg Komenskog	29.0±2.5
2.	Ilije Đuričića	125.5±4.2
3.	Vršačka	15.9±2.3
4.	Antona Urbana	64.9±3.4
5.	Janka Čmelika	26.1±2.5

Rezultati merenja koncentracije radona u pomenutim predškolskim ustanovama gama-spektrometrijskom metodom primenom adsorpcije na aktivnom uglju pokazuju da su koncentracije <sup>222</sup>Rn u ovim ustanovama ispod dozvoljenih vrednosti datih u opštem delu rada. Snižavanje koncentracije radona koje se uočava ponavljanjem merenja u pet kritičnih predškolskih ustanova se može objasniti činjenicom da je u zimskom periodu provetrvanje prostorija bilo veoma loše zbog uštede u energiji što značajno utiče na povećanje koncentracije radona.

## 4. ZAKLJUČAK

Kako radon i njegovi potomci daju najveći doprinos radijacionoj opasnosti od svih prirodnih izvora zračenja, da bi se izbegle ili barem ublažile posledice povećane koncentracije radona, treba preduzeti sve mere da bi se ona smanjila na najmanju moguću vrednost (ALARA princip).

U ovom radu izvršeno je određivanje koncentracije radona gama-spektrometrijskom metodom u pet predškolskih ustanova na teritoriji Novog Sada. Izmerene koncentracije (tabela 3.5.) su ispod dozvoljenih koncentracija radona za zatvoreni prostor-  $200 \text{ Bq/m}^3$  za nove zgrade i  $400 \text{ Bq/m}^3$  za stare zgrade. Merenjem je potvrđena tendencija snižavanja koncentracije radona u letnjem periodu zbog pojačane prirodne ventilacije.

Korišćenje gama-spektrometrijske metode za izračunavanje intenziteta  $\gamma$  zračenja radonovih potomaka omogućava određivanje koncentracije radona u zatvorenim prostorijama sa zadovoljavajućom tačnošću. Primena adsorpcije radona na aktivnom uglju je izuzetno pogodna integraciona tehnika zbog kraćeg vremena potrebnog za dobijanje informacija, veće osjetljivosti i niže cene.

## LITERATURA

1. Nikezić D., *Radon - glavni radioaktivni kontaminant čovekove okoline*, Jonizujuća zračenja iz prirode (monografija), 145, Beograd, (1995).
2. Dangić A., *Geohemografski procesi u prirodi i radionuklidi*, Jonizujuća zračenja iz prirode (monografija), 41, Beograd, (1995).
3. Avramović I., Veličković D., Stanković S., Kovačević M., *Merenje koncentracije radona u stambenim objektima na teritoriji Beograda*, Jonizujuća zračenja iz prirode (monografija), 191, Beograd, (1995).
4. Benderać R., Ristić D., Pantelić G., *Mogućnost primene aktivnih ugljeva za merenje koncentracije radona*, Jonizujuća zračenja iz prirode (monografija), 221, Beograd, (1995).
5. Radmilović V., *Prirodni radionuklidi u građevinskim materijalima sa osvrtom na nivo radona u stambenim prostorijama*, Jonizujuća zračenja iz prirode (monografija), 241, Beograd, (1995).
6. Bikit I., Slivka J., Čonkić Lj., Krmar M., *Specifični problemi merenja prirodnih radionuklida*, Jonizujuća zračenja iz prirode (monografija), 263, Beograd, (1995).
7. Pavlović S., Nikezić D., *Nivoi izloženosti jonizujućem zračenju iz prirode i metode za proračun doza*, Jonizujuća zračenja iz prirode (monografija), 335, Beograd, (1995).
8. Dukanović M., *Jonizujuća zračenja u zatvorenim arhitektonskim prostorima kao ekološki problem*, Jonizujuća zračenja iz prirode (monografija), 387, Beograd, (1995).
9. Pavlović R., Pavlović S., *Razvoj koncepcije smanjenja izlaganja prirodnom zračenju i novi međunarodni standardi u zaštiti od radona*, Jonizujuća zračenja iz prirode (monografija), 413, Beograd, (1995).
10. Colle R., Rubin R. J., Knab L. I., Hutchinson J. M. R., *Radon transport through and exhalation from building materials*, U.S. DEPARTMENT OF COMMERCE, September 1981
11. Nielson K. K. et al., *The RETREAD Model of Radon Generation and Transport from Soils into Slab-on-grade Houses*, Health Physics, Vol 67, No.4, October 1994.
12. Mowris R. J., Fisk W. J., *Modeling the effects of exhaust ventilation on <sup>222</sup>Rn entry rates and indoor <sup>222</sup>Rn concentrations*, Health Physics, Vol 54, No.5, May 1988.
13. Bernard L. Cohen, *A national survey of <sup>222</sup>Rn in U.S. homes and correlating factors*, Health Physics, Vol 51, No.2, August 1986.
14. Howard M. P., Koenraad M., *A passive diffusion 222Rn sampler based on activated carbon adsorption*, Health Physics, Vol 48, No.6, June 1985.
15. Bernard L. Cohen, Richard Nason, *A diffusion barrier charcoal adsorption collector for measuring Rn concentrations in indoor air*, Health Physics, Vol 50, No.4, April 1986.
16. Čonkić Lj., Slivka J., Krmar M., Vesović M., Bikit I., Đurčić Ž., Jeftić T., Vaderna S., *Kontrola radioaktivnosti građevinskog zemljišta na teritoriji opštine Novi Sad*, Izveštaj za 1996/97. godinu, Novi Sad, juli 1997.
17. Čonkić Lj., Krmar M., Bikit I., Vesović M., Slivka J., Đurčić Ž., Žikić N., Vaderna S., *Ispitivanje koncentracije radona u predškolskim i školskim ustanovama u Novom Sadu*, Fazni izveštaj za 1998. godinu, Novi Sad, oktobar 1998.
18. Pavlić B., *Modeliranje nastanka radona i transporta iz zemljišta u građevinske objekte*, Seminarski rad, Novi Sad, avgust 1997.

19. Baucal M., *Prirodna radioaktivnost i emanacija radona iz građevinskog materijala*, Diplomski rad, Novi Sad, 1993.
20. Radon update, *Facts Concerning Environmental Radon*, Idaho State University, <http://www.physics.isu.edu/radinf/radon.htm>
21. William Field, Ph.D., *Radon Occurrence and Health risk*, University of Iowa, <http://www.vh.org/Providers/Textbooks/Radon/HealthRisk.html>
22. Rogers V. C., Nielson K. K., *Multiphase radon generation and transport in porous materials*, Health Physics, Vol 60, No.6, June 1991.
23. Hendee W. R., Doege T. C., *Origin and Health Risks of Indoor Radon*, Seminars in Nuclear Medicine, Vol 18, No.1, January 1987.
24. Čonkić Ljiljana, *Zaštita životne sredine*, Doktorska disertacija
25. Branković D., *Ispitivanje koncentracije radona u stambenim prostorijama*, Diplomski rad, Novi Sad, 1994.
26. Čonkić Lj., Bikit I., Krmar M., Žikić N., Đurčić Ž., Vesović M., Slivka J., *Određivanje koncentracije  $^{222}\text{Rn}$  u zatvorenim prostorijama*, Novi Sad, 1998.

**UNIVERZITET U NOVOM SADU  
PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET  
KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA**

**Redni broj:**

RBR

**Identifikacioni broj:**

IBR

**Tip dokumentacije:**

TD Monografska dokumentacija

**Tip zapisa:**

TZ Tekstualni štampani materijal

**Vrsta rada:**

VR Diplomski rad

**Autor:**

AU Sofija Ćurčić

**Mentor:**

MN Dr Ljiljana Čonkić, vanr.prof.

**Naslov rada:**

NR Gama spektrometrijsko određivanje koncentracije radona

**Jezik publikacije:**

JP Srpski (latinica)

**Jezik izvoda:**

JI Srpski (latinica)

**Zemlja publikovanja:**

ZP SR Jugoslavija

**Uže geografsko područje:**

UGP Vojvodina

**Godina:**

GO 1999

**Izdavač:**

IZ Autorski reprint

**Mesto i adresa:**

MA 21000 Novi Sad, Trg Dositeja Obradovića 4

**Fizički opis rada:**

FO Broj poglavlja (5), strana (42), lit.citata (26), tabela (15), slika (27)

**Naučna oblast:**

NO Fizika

**Naučna disciplina:**

ND Zaštita životne sredine

**Predmetna odrednica/ Ključne reči:**

PO Radon, gama spektrometrija

**UDK:**

Čuva se:

ČU U biblioteci PMF Novi Sad, 21000 N. Sad, Trg D. Obradovića 4

Važna napomena:

VN

Izvod:

IZ U radu su prikazani rezultati gama-spektrometrijske metode određivanja koncentracije radona u zatvorenim prostorijama korišćenjem NaJ(Tl) detektora. Na osnovu eksperimentalnih podataka određene su koncentracije  $^{222}\text{Rn}$  u pet predškolskih ustanova u Novom Sadu.

Datum prihvatanja teme od strane NN veća:

DP 1. 9. 1999.

Datum odbrane:

DO 30. 9. 1999.

Članovi komisije:

(Naučni stepen/ ime i prezime/ zvanje/ fakultet)

KO

Predsednik: Dr Miroslav Vesović, vanr. prof.

član: Dr Ljiljana Čonkić, vanr. prof.

član: Dr Radomir Kobilarov, vanr. prof.

član: Dr Miodrag Krmar, docent