

D-424



UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET
DEPARTMAN
ZA FIZIKU



УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ
ПРИРОДНО-МАТЕМАТИЧКИ ФАКУЛТЕТ

ПРИМЉЕНО:	14. ЈУЛ 2003
ОРГАНИЗ.ЈЕД.	Б Р О Ј
0603	9/319

Šipka Silvana

Metod određivanja koncentracije aktivnosti radona pomoću čvrstih trag detektora CR-39

— diplomski rad —

mentor: Prof. dr Ištván Bikit

Novi Sad, 2003.

SADRŽAJ:

Uvod.....	1
-----------	---

I OPŠTI DEO

1. Jonizujuće zračenje i radionuklidi u životnoj sredini.....	2
1.1 Kosmičko zračenje.....	2
1.2 Kosmogeni radionuklidi.....	2
1.3 Prirodni zemaljski radionuklidi.....	3
1.4 Radon.....	3

II RADON

2.1 Osobine radona važne u radioekologiji i definicije nekih relevantnih fizičkih veličina.....	5
2.2 Ponašanje kratkoživećih radonovih potomaka u atmosferi...9	
2.3 Koncentracije radona u zatvorenim prostorijama i na otvorenom prostoru.....	12
2.4 Faktori koji utiču na koncentraciju radona u zatvorenim prostorijama.....	13
2.4.1 Zemljište kao izvor radona i jačina ekshalacije.....	14
2.4.2 Građevinski materijali kao izvor radona.....	15
2.4.3 Voda i gas kao izvori radona u zatvorenim prostorijama..	17
2.4.4 Zavisnost koncentracije radona u zatvorenim prostorijama od jačine ventilacije.....	18
2.5 Varijacije koncentracije radona u vazduhu.....	18

III METODE MERENJA RADONA I METOD RADA

3.1 Trag detektori u čvrstom stanju.....	22
3.1.1 Mehanizam formiranja traga.....	24
3.1.2 Postupak nagrizanja i metodologija.....	26
3.1.3 Brojanje tragova.....	28

IV EKSPERIMENTALNI DEO

31

ZAKLJUČAK

38

LITERATURA.....

39

Uvod:

Jonizujuće zračenje predstavlja jedan od najopasnijih zdravstvenih rizika u životnoj sredini. Radioaktivni zraci razaraju žive ćelije te radioaktivni elementi i izotopi čak i u malim količinama mogu da izazovu zdravstvene probleme kod stanovništva, životinja i živog sveta uopšte. U savremenoj sredini su zastupljeni radionuklidi prirodnog i antropogenog (proizvedenog) porekla.

U prirodnoj sredini zastupljenost različitih redionuklida je mala, tj. niskog je sdržaja. Međutim, izvesnim geohemijskim ciklusima odgovarajućih elemenata ovi radionuklidi mogu da se koncentrišu u nekom delu životne sredine do nivoa koji predstavlja rizik za zdravlje stanovništva i živog sveta.

Razvoj nuklearnih tehnologija u poslednjih nekoliko decenija doveli su do obrazovanja brojnih antropogenih (proizvedenih) radionuklida, od kojih neki različitim procesima (nuklearne eksplozije, incidenti u atmskim centralama i dr.) dospevaju u životnu sredinu. Ulaskom u životnu sredinu ovi radionuklidi se uključuju u geohemijske cikluse odgovarajućih hemijskih elemenata.

Pojavljivanje brojnih radionuklida u prirodi i mogućnosti da se lokalno koncentrišu do nivoa opasnosti za zdravlje stanovništva i živog sveta uopšte nameću potrebu odgovarajućih sistematskih istraživanja u cilju zaštite stanovništva i živog sveta od jonizujućeg zračenja. Ta istraživanja treba da omoguće identifikaciju radionuklida, njihovih izvora, porekla, načina pojavljivanja, procesa geohemijske migracije (rasejanja i koncentrisanja) u životnoj sredini, kao i efekta njihovog zrčenja na živu materiju.



I OPŠTI DEO

1. Jonizujuće zračenje i radionuklidi u životnoj sredini

Jonizujuća zračenja koja susrećemo u životnoj sredini možemo svrstati prema mestu generisanja:

- zračenje zemaljskog porekla
- zračenje kosmičkog porekla

Izvore jonizujućeg zračenja možemo svrstati prema genezi i pojavljivanju u životnoj sredini:

I Prirodni izvori:

- prirodni zemaljski radionuklidi
- kosmogeni radionuklidi
- kosmičko zračenje

II Antropogeni izvori:

- radioaktivne padavine
- medicinski
- tehnogeni

III Radiaktivni otpad

Zračenja svih grupa deluju na stanovništvo na dva načina: spolja ili eksterno (zračenje na organizam) i iznutra ili interno (zračenje u organizmu).

1.1 Kosmičko zračenje

Jonizujuća zračenja koja dospevaju na Zemlju iz dubine kosmičkog prostora i sa sunca su velikih energija (0,01-10 GeV)[1]. Ovi zraci deluju na životnu sredinu dvojako: direktno i indirektno izazivajući sekundarno zračenje i obrazovanje kosmogenih radionuklida.

Fluks kosmičkog zračenja, koji dopire na površinu Zemlje, ravnomerno se menja sa promenom geografske širine i nadmorske visine- raste od ekvatora ka polovima kao i sa povećanjem nadmorske visine. Ovo zračenje se odlikuje uniformnom raspodelom i relativno malim intezitetima, njegov udio u ukupnom ozračivanju stanovništva je manje značajan u odnosu na druge izvore.

1.2. Kosmogeni radionuklidi

U interakcijama kosmičkog zračenja sa zemaljskim izvorima u atmosferi i/ili na površini Zemlje kroz odgovarajuće nuklearne reakcije obrazuju se u malim količinama različiti radionuklidi kao što su: ^3H , ^7Be , ^{10}Be , ^{14}C , ^{20}Al , ^{32}Si , ^{30}Cl , ^{39}Ar , ^{53}Mn , ^{59}Ni , ^{81}Ni , ^{81}Kr sa vremenom poluraspada u opsegu 10^2 - 10^9 godina. Ovi radionuklidi se uključuju u geohemijske cikluse odgovarajućih elemenata pridružujući se njihovim prirodnim izotopima. Zbog svojih malih i apsolutnih i relativnih izotopskih zastupljenosti, ovi radionuklidi kroz geohemijske procese ne postižu značajne procente ni u jednom od geohemijskih ciklusa datih elemenata .

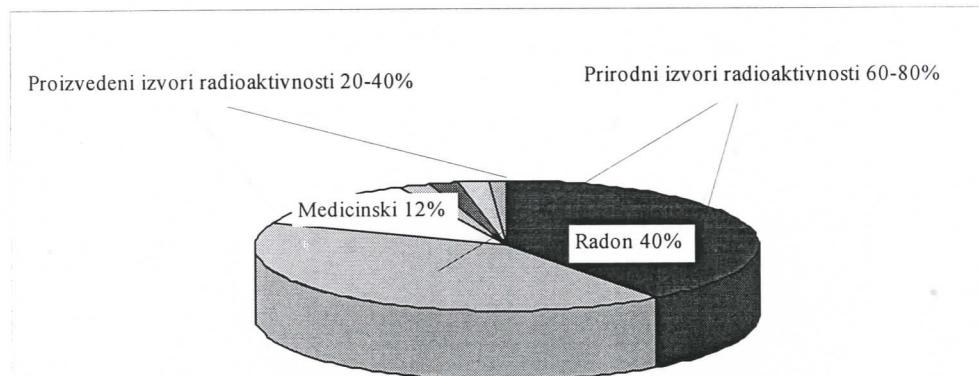
1.3. Prirodni zemaljski (primarni) radionuklidi

Prirodni zemaljski radionuklidi su najčešći i najznačajniji izvori ionizujućeg zračenja u životnoj sredini, kako u pogledu ukupnog zračenja tako i u pogledu lokalnih visokih doza zračenja. Istraživanja u poslednjih desetak godina pokazuju da u normalnim uslovima preko 70% [1].ukupne doze, koju godišnje primi prosečno stanovništvo, predstavlja prirodno ionizujuće zračenje. Prirodni radionuklidi su predstavljeni sve većim brojem radiaktivnih izotopa različitih elemenata čije je vreme poluraspada (10^5 - 10^{16} god.) dovaljno dugo u onisu na starost Zemlje ($4,6 \times 10^9$ god.): ^{40}K , ^{50}V , ^{57}Rb , ^{115}In , ^{129}Te , ^{138}La , ^{149}Ce , ^{144}Nd , ^{147}Sm , ^{152}Gd , ^{176}Lu , ^{174}Hf , ^{187}Re , ^{190}Pt , zatim ^{232}Th , ^{234}U , ^{235}U i ^{238}U i članovi njihovih serija radioaktivnih raspada. Oni se međusobno razlikuju po vremenima poluraspada i tipovima raspada (α , β i γ -emitri), intezitetima zračenja, načinima pojavljivanja, migraciji i geohemijskim ciklusima. Geohemijski procesi mogu da regionalno ili lokalno značajno koncentrišu neke od ovih radionuklida dovodeći čak do obrazovanja njihovih mineralizacija ili rudnih ležišta, kao npr. U i Th.

Najobiljniji prirodni radionukloid u litosferi (Zemljinoj kori) je Rb-87, a slede ga po obilnosti Th-232, K-40 i U-238. Najvaće rizike za zdravlje ljudi predstavljaju U-238, i njegovi potomci Ra-226, sa vremenom poluživota 1600 godina i Rn-222 , sa vremenom poluživota 3,824 dana, kojim ćemo se baviti u daljem tekstu kao i jednom od metoda njegovog merenje [2].

1.4. Radon

Savremena istraživanja su pokazala da 40% (slika 1.1) od ukupne doze zračenja, koje primi prosečno stanovništvo, je uslovljeno udisanjem prirodnog radiaktivnog gasa ^{222}Rn . Na osnovu ovoga možemo reći da takav radon predstavlja jedan od najvećih zdravstvenih rizika za stanovništvo.



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 kratkoživecim 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 je 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 [3]. Promene na ćelijskom i molekularnom nivou znatno su izraženije u ranim životnim fazama.

II RADON

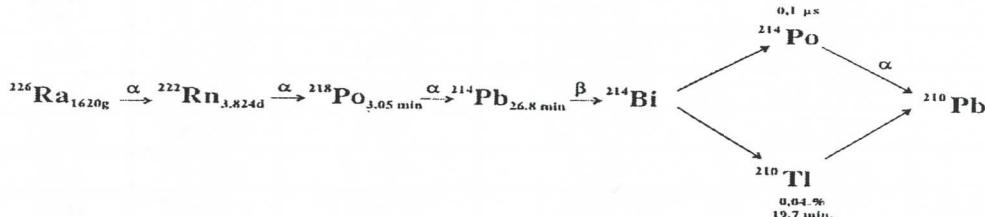
2.1. Osobine radona važne u radioekologiji i definicije nekih relevantnih fizičkih veličina

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. Emisije α čestice energije 5.5 MeV-a [4].

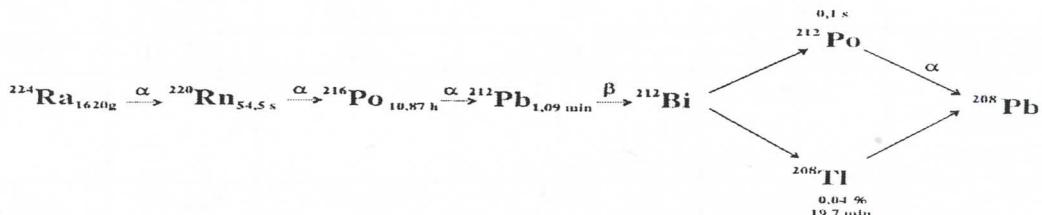
Radon nastaje raspadom radijumovih jezgara i sva tri prirodna radioaktivna niza sadrže po jedan radonov izotop. Izotopi radona su:

- ^{222}Rn sa periodom poluraspada od 3.824 dana. Prisutan je u nizu uranijuma ^{238}U i predstavlja najznačajniji radonov izotop. U daljem izlaganju pod terminom "radon" podrazumevamo upravo ovaj izotop.
- ^{220}Rn sa periodom poluraspada od 54.5 s. Prisutan je u nizu torijuma ^{232}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}Rn sa periodom poluraspada od 3.92 s. Prisutan je u nizu uranijuma ^{235}U i naziva se Aktinon. On je vrlo malo zastupljen u prirodi (zbog malog sadržaja izotopa ^{235}U) i njegov doprinos u ozračenju ljudi je neznatan.

Raspade ^{222}Rn i ^{220}Rn na njihove kratkoživuće potomke možemo prikazati šemom [5]:



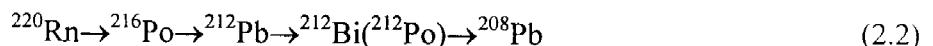
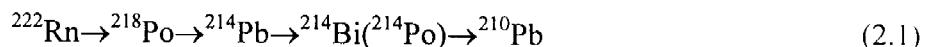
Slika 2.1. Šema raspada radona ^{222}Rn



Slika 2.2. Šema raspada torona ^{220}Rn

Zbog male verovatnoće raspada preko $^{210}\text{Tl}(\text{RaC}')$, ova grana se može zanemariti. $^{208}\text{Pb}(\text{RaD})$ ima veliko vreme poluraspada (tabela 2.1) i zbog procesa taloženja ne može se nagomilati u atmosferi u značajnim količinama. Zbog kratkog vremena

poluraspada ^{214}Po je uvek u ravnoteži sa svojim prethodnikom ^{214}Bi . Tako da je moguće uprostiti gore predstavljene šeme [5]:

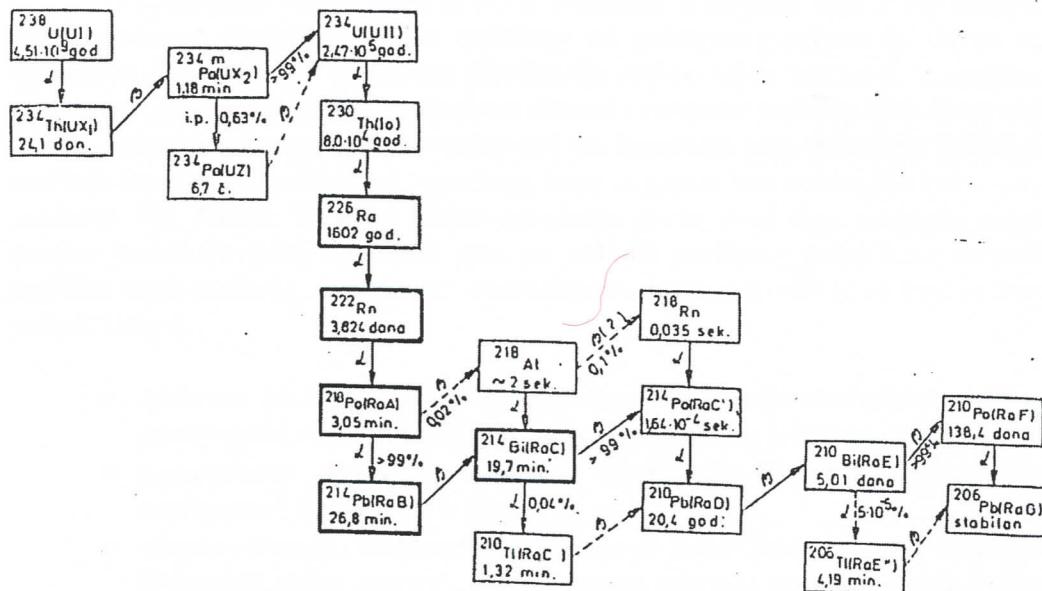


U šemama raspada uokvireni su kratkoživeći potomci (tabela 2.1.) [5].

Tabela 2.1. Karakteristike izotopa radona i njihovih kratkoživećih potomaka.

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

^{226}Ra je član radioaktivnog niza ^{238}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}K , ^{235}U , ^{238}U , ^{232}Th . Ovi dugoživeći radioizotopi su začetnici tri prirodna radioaktivna niza: uran-aktinijumskog, uran-radijumskog (sl. 2.2.) i torijumskog niza.



Slika 2.3. Uran-radijumski niz

Raspadom ^{226}Ra formira se ^{222}Rn i pošto su atomi ^{222}Rn hemijski inertni oni su slobodni i mogu da difunduju kroz materijal u kome su stvoreni. Jedan deo atoma ^{222}Rn uspe da predje u atmosferu, dok se drugi deo raspada 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]:

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

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 γ -zračenja, koje se uzima kao referentno (za α -čestice ima vrednost 10). Naime biološki efekat ozračenja zavisi i od tipa zračenja, odnosno, od gustine jonizacije (broj stvorenih jona po jedinici predenog 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 zapremine i izražava se u (Bq/m^3).
- *ukupna energija emitovanih α -čestica za jedan atom u lancu raspada radona* (Potential alpha energy), ϵ_p , je ukupna energija svih α -čestica emitovanih u procesu raspada tog atoma do stabilnog ^{210}Pb . U tabeli 2.2. [6] date su vrednosti ukupne energije emitovanih alfa čestica potomaka ^{222}Rn , po jednom atomu i po jediničnoj aktivnosti.

Tabela 2.2. Ukupne energije alfa čestica po jednom atomu ϵ_p i po jediničnoj aktivnosti ϵ_p/λ_r .

Radionuklid	$T_{1/2}$	Ukupna energija emitovanih α čestica			
		(MeV)	(10^{-12} J)	(MeV)	(10^{-10} J)
Potomci radona, ^{222}Rn					
^{210}Po	3.05 min	13.69	2.19	3615	5.79
^{214}Pb	26.8 min	7.69	1.23	17840	28.6
^{214}Bi	19.9 min	7.69	1.23	13250	21.2
^{214}Po	164 μs	7.69	1.23	2×10^{-3}	3×10^{-6}
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 vazduhu bilo koje smeš kratkoživećih radonovih ili toronovih potomaka [6]:

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

gde je C_i broj atoma i-tog radonovog kratkoživećeg potomka po m^3 vazduha.

Vansistemska jedinica za PAEC je Working Level ili WL i iznosi $1\text{WL} = 21\text{ mJ/m}^3$. Jednom WL odgovara oslobođena energija alfa zračenja od $1.3 \times 10^{14}\text{ eV/m}^3$ u vazduhu. U slučaju da je ^{222}Rn u ravnoteži sa svojim kratkoživećim potomcima, koncentracija radona pri kojoj je $\text{PAEC} = 1\text{ WL}$, iznosi 3.7 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)* \mathbf{P} - predstavlja proizvod PAEC-a i vremena provedenog u atmosferi sa tim PAEC-om. Sistemska jedinica za ovu veličinu je Js/m^3 , a vansistemska, tradicionalna, jedinica je Working Level Month ili skraćeno WLM. Osoba koja proveđe 173 sata u atmosferi u kojoj je $\text{PAEC}=1\text{ WL}$, izložena je radonovim potomcima od 1 WLM. Veza WLM i sistemskih jedinica je [5]:

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

- *ravnotežna ekvivalentna koncentracija radona* (equilibrium equivalent concentration) \mathbf{EEC} , odnosi se na neravnotežnu smeš kratkoživećih radonovih potomaka u vazduhu i to je ona koncentracija radona u radioaktivnoj ravnoteži sa njegovim potomcima koji imaju isti PAEC kao i neravnotežna smeš na koju se EEC odnosi. Skraćena oznaka za EEC je C_e .
- *faktor ravnoteže* (ili neravnoteže u pojedinim referencama) \mathbf{F} - definiše se kao količnik ravnotežne ekvivalentne koncentracije radona i stvarne koncentracije radona C_0 u vazduhu, tj.[5]:

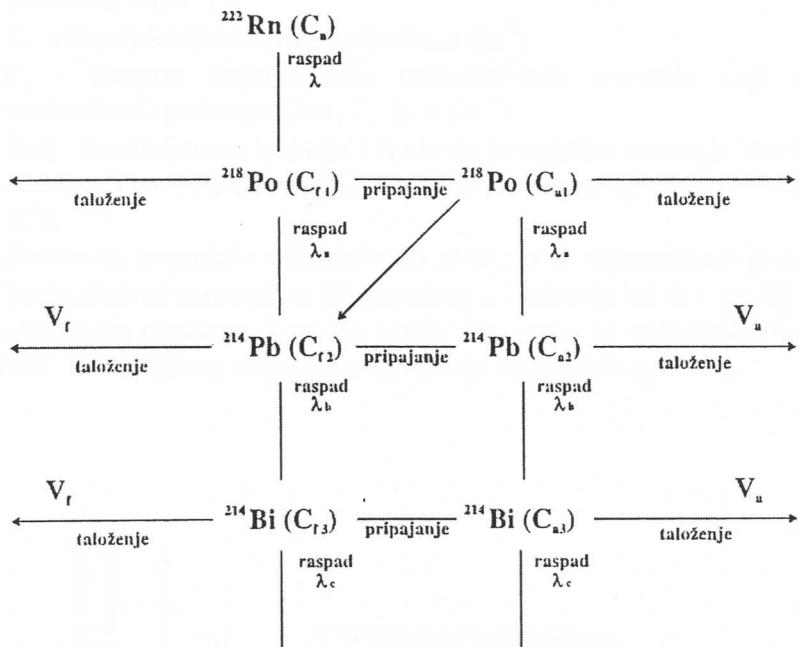
$$F = C_e/C_0 \quad (2.7)$$

2.2. Ponašanje kratkoživećih radonovih potomaka u atmosferi

Kao što je već navedeno raspadom jezgra ^{222}Rn nastaju kratkoživeći radonovi potomci ^{218}Po , ^{214}Pb i $^{214}\text{Bi}/^{214}\text{Po}$. 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 ^{218}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.



Slika 2.4. Ponašanje kratkoživećih radonovih potomaka u atmosferi.

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% [5].

Šema procesa koji se odigravaju u atmosferi, a u kojima učestvuju radonovi potomci, prikazana je na sl. br.2.3. [5]. Oznake na slici su: C_{fi} - koncentracije i-tog potomka u slobodnoj formi, C_{ai} - koncentracije i-tog potomka u pripojenoj formi, λ su konstante radioaktivnog raspada, V_f i V_a su brzine taloženja slobodnih i pripojenih potomaka, respektivno.

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 $\Delta C_j(d)/C_j$ [5]:

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

Pri čemu je:

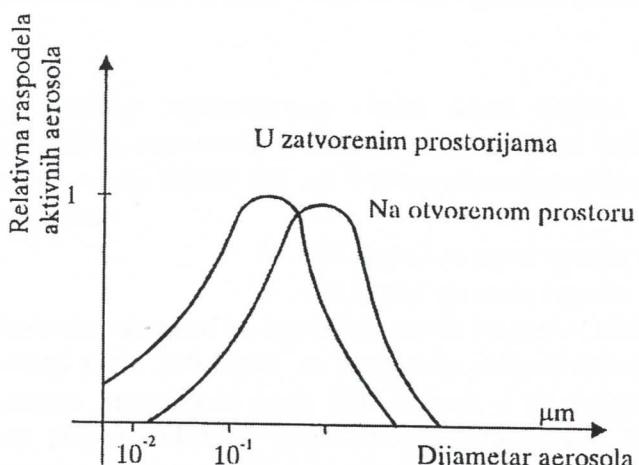
$$C_j = \sum_{d=0}^{\infty} \Delta C(d). \quad (2.9)$$

U gornjim jednačinama korišćene su oznake:

- d - dijametar 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 0.5×10^{-12} do $2.3 \times 10^{-12} m^3/s$.

Relativna raspodela radioaktivnih aerosola po dijametrima je data na sl br.2.4. [5].

Radioaktivni aerosoli sa dijametrima u intervalu od 0.1 do 10 nm. [7] se najbolje talože u ljudskim plućima. Aerosoli većih dimenzija se zadržavaju u nosu i usnoj duplji ne dopirući do osetljivog respiratornog epitela bronhijalnog stabla.



Slika 2.5. Relativna raspodela radioaktivnih aerosola po dijametrima.

Pored pripajanja potomaka aerosolima postoji i obrnuti proces, odvajanje. Pri raspadu ^{218}Po emituje 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}Pb iznosi 117keV, a energija veze atoma u aerosolu je reda eV [5]. 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 [5]; gde je

S površina na raspolaganju za taloženje u (m^2), C_j je koncentracija j-tog radonovog potomka u (Bq/m^3) i v je brzina taloženja u (m/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 [5]:

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

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

2.3. 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 [8] od 1994.godine dozvoljene koncentracije radona za zatvoreni prostori su:

- 200 Bq/m^3 za nove zgrade i
- 400 Bq/m^3 za stare zgrade.

Građevinski standard za izgradnju novih stanova i kuća je 100 Bq/m^3 radona kao prosečni godišnji nivo, 200 Bq/m^3 za preporuku jeftinih sanacionih mera i 600 Bq/m^3 za preporuku skupih sanacionih mera [8]. 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 ionizujućeg zračenja.

Koncentracije radona na otvorenom prostoru su nekoliko puta niže nego u zatvorenim prostorijama i iznose u intervalu od $5 - 15 \text{ Bq/m}^3$ [9]. 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, pronalaze se nepovoljne oblasti sa povećanom koncentracijom u zgradama, karakteriše se građevinski materijal itd. U tabeli 2.3. [5] 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^3 [5].

Tabela 2.3. Srednje koncentracije radona u zatvorenim prostorijama.

Srednja godišnja koncentracija radona u zatvorenom	
Zemlja	(Bq/m ³)
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 [8]. 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 jeftinih mera i u dva stana (1.53%) skupih sanacionih mera. Stanovi i kuće sa većim koncentracijama radona su stari objekti izgrađeni pre više decenija.

Sanacione mere koje se predlažu mogu biti zasnovane na:

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

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

	Koncentracija radona u (Bq/m ³)				
	<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

2.4. Faktori koji utiču na koncentraciju radona u zatvorenim prostorijama

Radon u zatvoreni prostor dospeva iz nekoliko izvoraž:

- 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.

2.4.1. 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 ležištima ili kao primeće 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.) [1]. 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.) [1].

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

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

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

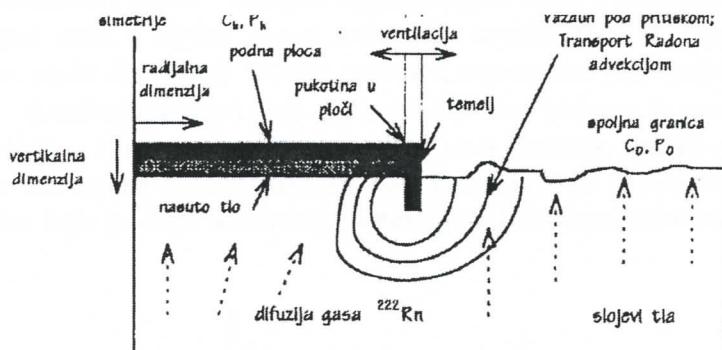
Radionuklid	Rečna voda	Okeanska voda	Vegetacija (pepeo)	Živa materija
K (%)	0.0023	0.0387	3.0	0.3
Rb (mg/kg)	0.001	0.12	100	5
Th (mg/kg)	0.0001	0.00001	-	-
U (mg/kg)	0.04	0.003	0.5	<0.010

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

² Nedostaju podaci

Delimično torijum, a naročito uran prelaze u hidrotermalne rastvore i mogu da obrazuju hidrotermalne rudne koncentracije u i oko granitoidnih masa. 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 zemljištu. 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 zemljišta u zgrade su otvor i pukotine u betonskim pločama i blokovima, loše veze između zidova i ploča, odvodne cevi, podni



Slika 2.6. Mehanizmi transporta radona iz zemljišta u zatvorene prostore

slivnici pokriveni perforiranim poklopcima i slično (slika 2.7.) [10]. Naime, razlika u pritiscima pokreće vazduh, a sa njim i radon iz okolnog zemljišta

do ispod građevina, odakle radon prodire u kuće kroz gore pomenute otvore.

Jačina ekshalacije J, odnosno fluks radona iz tla, je aktivnost radona koja u jedinici vremena prođe kroz jediničnu površinu zemljišta. Opseg vrednosti za fluks radona iz tla iznosi od 0.0002 do 0.053 Bq/(m²s) pri čemu je srednja vrednost 0.016 Bq/(m²s) [5]. Ekshalacija radona iz zemljišta zavisi od više faktora:

- koncentracije radijuma ^{226}Ra u zemljištu,
- permeabilnosti (propustljivosti) zemljišta,
- vlažnosti zemljišta,
- 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 rastvoreni ^{226}Ra).

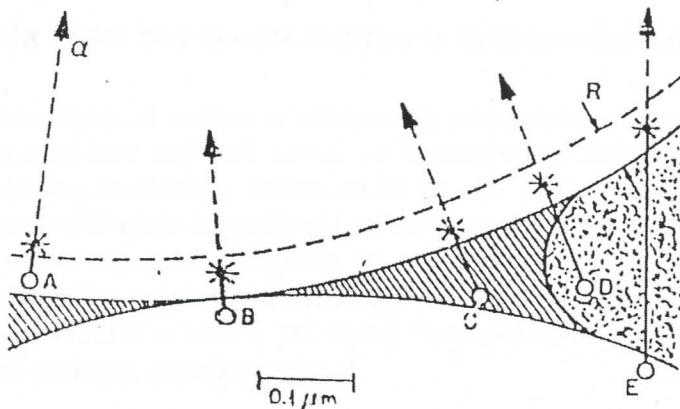
2.4.2. Građevinski materijali kao izvor radona

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

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

Radioaktivnost građevinskog kamenja 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. Koncentracija ^{226}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. 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 [11].

Koefficijent emanacije η predstavlja deo radonovih potomaka koji napuste komad materijala u kome su formirani i menja se u širokom opsegu vrednosti od 1 do 30% [5]. Samo oni atomi radona koji su nakon formiranja (raspadom jezgra ^{226}Ra) dospeli u šupljine koje postoje u materijalu mogu se difuzijom osloboditi u atmosferu (slika 2.7.) [12].



Slika 2.7. Ilustracija razčitih načina dospevanja radona u međučestične šupline materijala

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%) [13].

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}Ra , 300 Bq/kg za ^{232}Th , 5000 Bq/kg za ^{40}K i za ukupan zbir veštačkih radionuklida 4000 Bq/kg, stim da se ispunji uslov za B.F. (Building Factor) [4]:

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

gde su:

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

2.4.3. 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 oslobodi pri njenom korišćenju u kupatilima i pri kuhanju. Koncentracija radona u vodi je vrlo različita od mesta do mesta: najveća je u bunarima u reonima sa granitnom podlogom do 630 Bq/m³, a najniža u tekućim površinskim vodama do 2 Bq/m³ [5]. Pri visokoj koncentraciji radona u vodi i pri većoj "uzburkanosti" i potrošnji ovaj izvor radona može postati značajan (tabela 2.7.) [14].

Tabela 2.7. Srednje koncentracije radona u prostorijama sa različitom namenom.

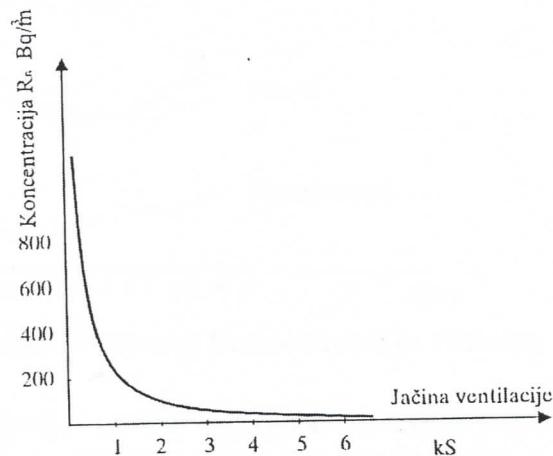
Tip prostorije	Broj uzoraka	Srednja koncentracija ^{222}Rn	
		Bq/m ³	(pCi/l)
dnevna soba	185	55	(1.49)
kuhinja	94	64	(1.73)
trpezarija	37	42	(1.14)
kupatilo	53	51	(1.38)
spavaća soba	49	50	(1.36)
hodnik	12	54	(1.46)
ostalo	8	34	(0.92)

2.4.4. 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 otvorene 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} m^2 jer snižava pritisak unutar prostorija i dovodi do "usisavanja" radona iz zemljišta) [15].

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 2.8. [5].



Slika 2.8.Zavisnost koncentracije radona u zatvorenim prostorijama od jačine ventilacije

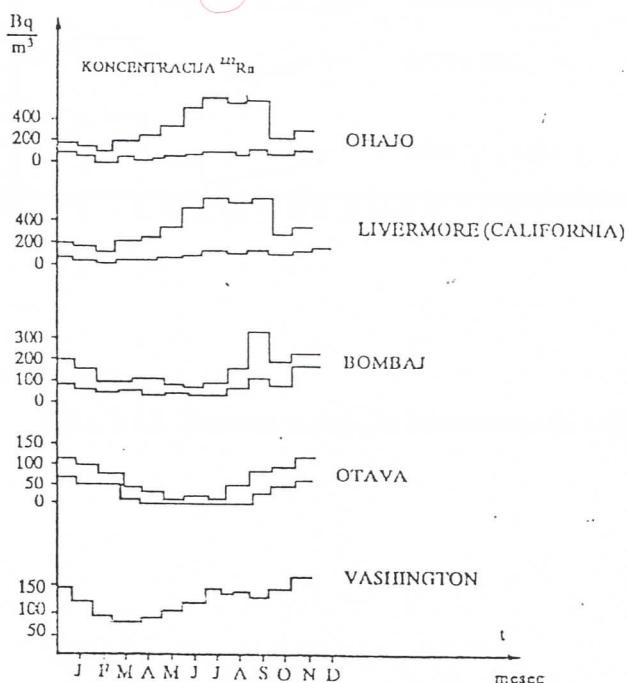
2.5. Varijacije koncentracije radona u vazduhu

Koncentracija radona na otvorenom prostoru zavisi od:

- jačine ekshalacije radona iz zemljišta i
- meteoroloških parametara.

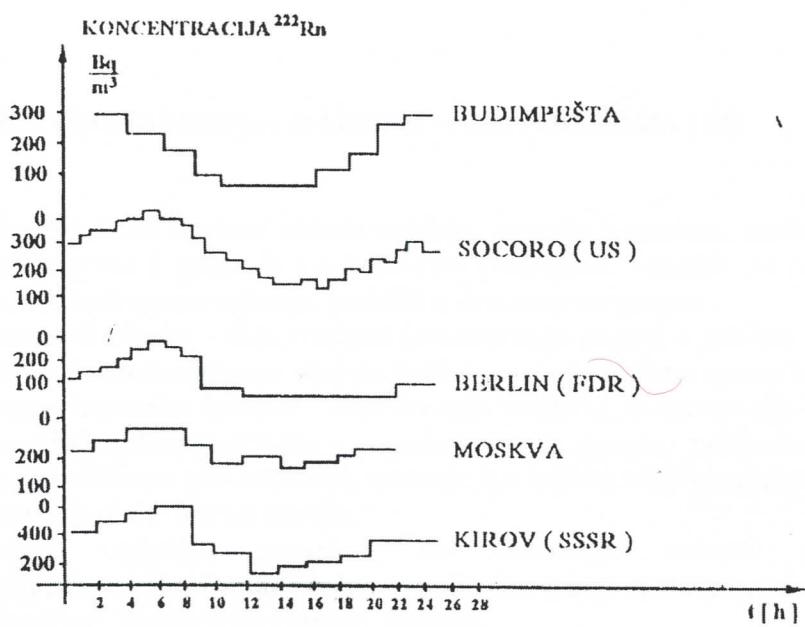
Glavni izvor radona na otvorenom prostoru je zemljište, dok su svi ostali izvori (npr. voda, prirodni gas, geotermalni fluidi, vulkanski gasovi, vazduh koji struji iz pećina i drugi) od sekundarnog značaja i mogu se zanemariti.

Pri poređenju 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 2.9. [5] 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).



Slika 2.9. Sezonske promene koncentracije radona

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 2.10. [5] data je promena koncentracije radona na otvorenom prostoru u toku jednog dana na više lokacija.



Slika 2.10. Dnevne varijacije koncentracije radona na otvorenom prostoru

III METODE MERENJA RADONA I METOD RADA [18]

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 radijacionog zdravstvenog rizika. Ukoliko se pri ovakovom merenju ne koriste aktivne električne komponente onda su to pasivne merne tehnike.

Među tehnike pogodne za detekciju radona spadaju:nuklearna emulzija,adsorpcija, čvrsta i tečna scintilacija, gama spektrometrija,beta monitoring, targ detektori, jonizacione komore, elektreti,

Jedna od najstarijih i najjednostavnijih mernih tehnika je scintilaciono brojanje u gasnoj fazi pri čemu se meri alfa zračenje radonovih potomaka. Primer ove metode je Lucassova sonda-staklena bočica, čije su unutrašnje strane obložene scintilacionim materijalom ZnS (Ag) i u koju se upušta vazduh kroz gumeni zatvarač. Vazduh se propušta kroz filter i potomci radona se zaustave na njemu. Nakon uspostavljanja ravnoteže između radona i njegovih potomaka scintilacije izazvane alfa česticama u ZnS(Ag) . Osetljivost ove metode zavisi od dužine vremena brojanja i geometrije same bočice.

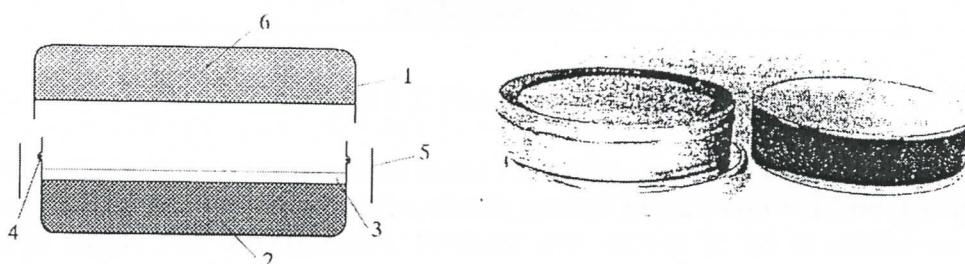
Scintilaciono brojanje se takođe može izvršiti i u tečnoj fezi. Radon je dobro rastvorljiv u vodi i ne taj način se transportuje na velike udaljenosti. Moguće je izvršiti izdvajanje radona iz vode mešanjem sa toluenom u kome se radon bolje rastvara pošto se toluen i voda ne mešaju. Koncentracija radona u toluenu se određuje tečnom scintilacionom tehnikom (ili se koristi toluen kao scintilator ili se koristi poznata količina tečnih scintilatora kao što su PPO ili POPOP (Fukui, 1985;Navratil,1995)).

Jonizacione komore i proporcionalni brojač su široko rasprostranjene metode za određivanje koncentracije radona u atmosferi. Za indirektno određivanje koncentracije radona koristi se metoda spektroskopije. Pomoću alfa spektroskopije određuje se broj emitovanih alfa čestica sa filtera, na kojima se zadržavaju radonovi potomci, u određenom intervalu vremena brojanja.

Gama spektroskopija je metoda koja se zasniva na merenju interakcije gama zraka (koji potiču od radonovih potomaka) sa materijom.

Merenje radona pomoću adsorpcije na aktivnom uglju je pasivna, integraciona tehnika kao i targ detektori. Prednosti ove metode u odnosu na targ detektore su pre svega: kraće vreme integracije potrebno za dobijanje informacije, 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 3.1. [16] i [17], 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}Rn . Radon adsorbovan u granulama aktivnog uglja raspada se na kratkoživeće potomke: ^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi , ^{214}Po i ^{210}Pb . Radonovi potomci ^{214}Pb i ^{214}Bi emituju gama zračenje (^{214}Pb – 295 i 352 keV; ^{214}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 3.1.Kanister 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 (eksponicije), koje traje ne kraće od 48 časova, aktivan 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.

3.1.Trag detektori u čvrstom stanju

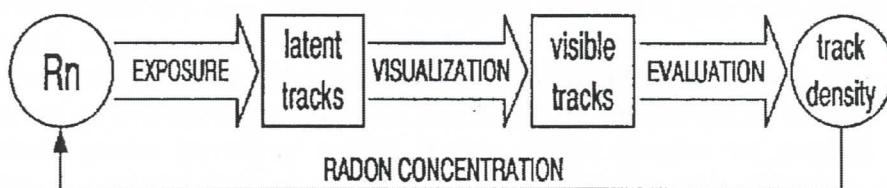
Metode određivanja koncentracije radona na terenu osim što se mogu podeliti na trenutne i dugotrajne, dele se na pasivne i aktivne. Pasivne metode koriste difuziju radona u radnu zapreminu, dok se kod aktivnih gas pumpa u ili kroz detektujući instrument.

Najznačajnija dugovremenska (integraciona)pasivna metoda, su trag detektori u čvrstom stanju (SSNTD-Solid State Nuclear Track Detectors). Princip rada ovih detektora je prikazan na slici 3.2 , gde se uočavaju sledeće faze [18]:

- 1)Detektor se eksponira zračenju koje potiče od radona-Rn
- 2)Usled dejstva tog zračenja na detektor dobijamo latentne tragove

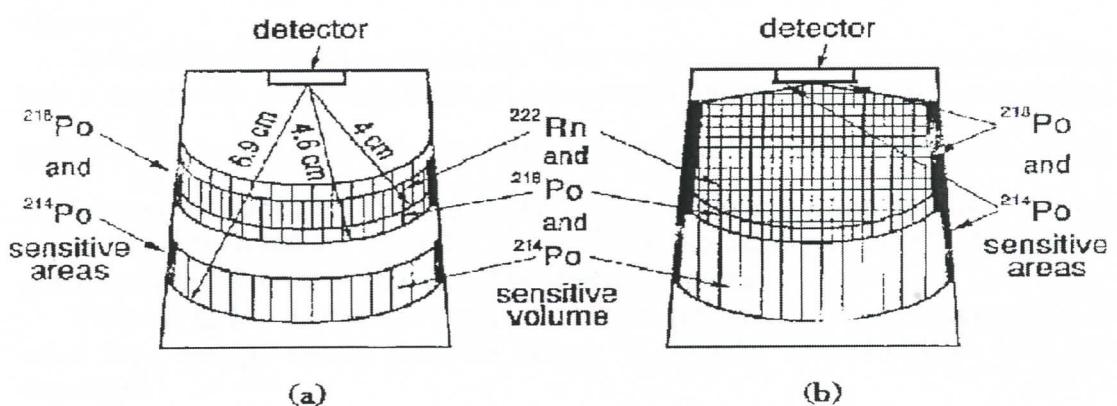
3) Hemijskim nagrizanjem ti tragovi se fiksiraju i postaju vidljivi

4) Brojanjem vidljivih tragova određujemo njihovu gustinu i najzad kao povratnu informaciju dobijamo koncentraciju aktivnosti radona



Slika 3.2. Princip rada SSNTD

Svaka alfa čestica, koja prođe kroz radnu zapreminu detektora ostavlja trag oštećenja , usled jonizacije, što posle hemijske obrade postaje uvećano do veličine uskog kanala koji je vidljiv pod mikroskopom. Prednost ove metode je što je selektivna za alfa čestice i nije osetljiva na spoljašnje uslove kao što su : vlažnost vazduha, niske temperature, zagrevanje i svetlost. Ovi detektori mogu da 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 u blizini detektora; i kao detektori sa posebnom geometrijom i konstrukcijom koja obezbeđuje da potomci radona ne prodiru u komoru (Slika 3.3). SNDTD se izrađuju od plastičnih materijala, malih su dimenzija (1cm x 1cm), od 100 – 500 μ m debljine, jednostavnii su za upotrebu (ne zahtevaju dodatnu elektroniku), jeftini su (cena za 400 detektori je 40 US \$) i jednostavno se obrađuju uz upotrebu trmostatiranog kupatila, hemijskih reagenasa i optičkog mikroskopa. Zbod toga su plastični trag detektori često korišćena integralna tehnika za merenje radona *in situ*, kojom dobijamo srednju vrednost koncentracije radona u toku dužeg vremenskog perioda (90 dana i duže).



Slika 3.3. Difizione komore trag detektora sa osetljivim:

a)površinskim zonama

b)zapreminske zonama

Uobičajeno je da se koncentracija aktivnosti radona izražava u jedinicama Bq/m^3 , pošto se većina regulatornih referentnih nivoa izražava u ovim jedinicama. Ukoliko je potrebno da se proračuna doza, može se koristiti konverzionalni faktor koji daje ICRP (1993; Publication 65) koji procenjuje efektivnu dozu od 3 mSv godišnje za srednju koncentraciju radona u stanovima od 200 Bq m^{-3} .

Većina dozimetara su difuzione komore, gde spora difuzija kroz filter papir ili kroz proreze na poklopcu sprečava ulaz čvrstih potomaka radona ili torona i smanjuje ili eliminiše prolaz gasovitog torona. Radon unutar komore se raspada na svoje kratkoživeće potomke koji se talože na površini detektora ili zidovima dozimetra (slika 3.25). Dozimetri se najčešće kalibrišu sa identičnim komorama u kojima se nalazi poznata koncentracija ^{222}Rn . Na taj način ukoliko je poznata gustina tragova na CR-39 plastiči lako se može preračunati koncentracija aktivnosti ^{222}Rn u vazduhu ukoliko je poznato vreme ekspozicije detektora.

3.1.1. Mehanizam formiranja traga

1) Teške nanelektrisane čestice (od protona pa nadalje, znači ne beta čestice i gama zraci) mogu ostavljati latentne kvazi kontinualna oštećenja u izolatoru- tragove, koji su relativno dugotrajni na normalnim temperaturama (i ispod 0°C). Ti tragovi preživljavaju i visoke temperature, zavisno od sredine u kojoj se nalaze i intenziteta ionizacije (tj, linearne gustine izbačenih elektrona). Latentni tragovi mogu biti videni samo transmisionim elektronskim mikroskopom-TEM, jer im je dijametar 10nm i manje.

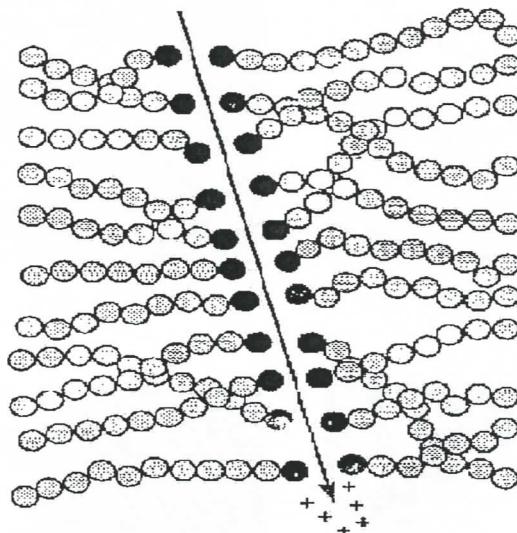
2) Latentni tragovi se podvrgavaju dejstvu hemijskih sredstava (baza ili kiselina NaOH ili KOH ; HF ili HNO_3). Upotrebljena hemijska sredstva fiksiraju tragove – čine ih stalnim, i uvličavaju ih da bi bili vidljivi pod optičkim mikroskopom (μm u dijametru).

3) Različiti dielektrici imaju različit “prag registracije”, tako da samo one čestice koje u datom delu svoje trajektorije pri usporavanju imaju linearni odnos energetskog gubitka $\frac{dE}{dx}$ ili osnovnu brzinu jonizacije J , iznad kritične vrednosti ili praga, će biti registrovani u datoј dielektričnoj sredini. Tako polimeri imaju daleko niži prag registrovanja nego staklo i mineralni kristali. Široko korišćeni polimer CR-39 (polialil glikol karbonat) može da registruje čak i tragove protona.

Prolazak teške nanelektrisane čestice dovodi do kidanja polimerskih lanaca (Sl.3.4) usled čega nastaju visoko reaktivni delovi (slobodni radikali)- koji mogu biti dugotrajni.

Kada se plastika nakon toga tretira odgovarajućim nagrizačem (alkalni hidroksidi, vodeni rastvorovi NaOH ili KOH uz dodatak alkohola) oblast rezanja (kidanja) je rastvorena i ktrajnja šupljina može postati uvećana za faktor $10^2\text{-}10^3$. Tako tragovi oštećenja postaju kvazikontinualni i trjno fiksirani -tako da se zagrevanjem ne

mogu istopiti kao latentni tragovi; nagrizeni tragovi se uvećavaju i postaju vidljivi pod običnim optičkim mikroskopom.



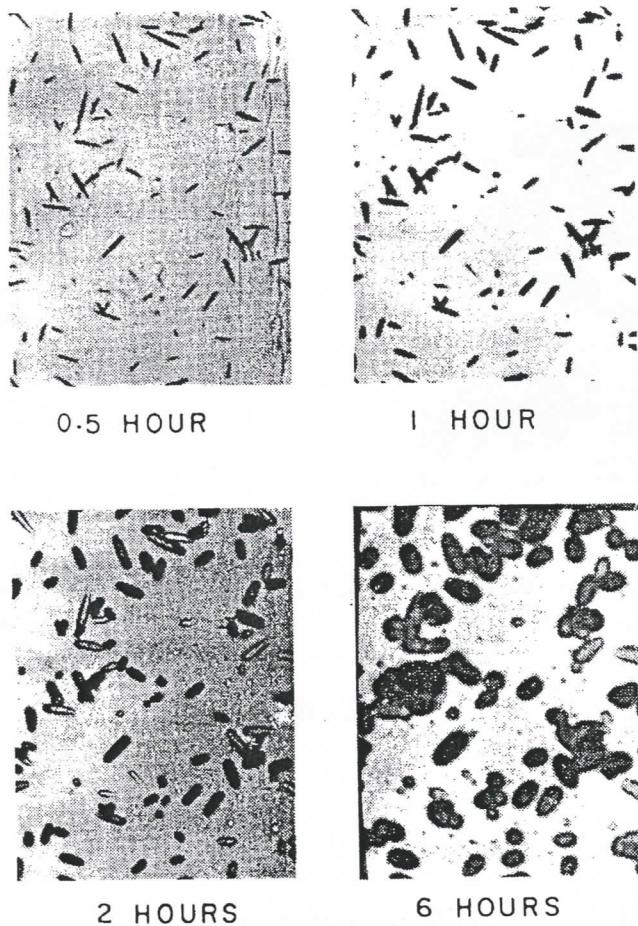
Slika 3.4. Kidanje polimernih lanaca pri prolasku alfa čestice

Količina oštećenja, a samim tim i veličina tragova, zavisi od brzine linearнog energetskog transfera (LET) nanelektrisane čestice duž trajektorije. Oblik i dijometar "nagrizene jame" zavisi od dva parametra: nagrizajućih karakteristika plastične sredine označenih kao njihova *brzina nagrizanja* v_B i *brzine nagrizanja tragova* v_T za dati nagrizivač korišten pod odgovarajućim uslovima: tip, molarnost i temperatura nagrizivača, i predstavlja odgovarajuću karakteristiku interakcije nanelektrisanih čestica sa sredinom, duž putanje. Odnos ove dve brzine je dat izrazom:

$$v = \frac{v_T}{v_B}$$

i predstavlja parametar bitan za određivanje karakteristika nagrizanja (daje "efikasnost nagrizanja", kritični ugao nagrizanja θ_c , itd.).

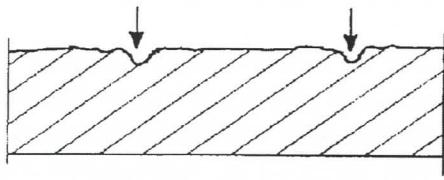
Takođe veličina i oblik tragova zavise i od vremena trajanja nagrizanja, i to u toku višečasovne ekspozicije se menjaju u toku vremena (sl.3.5.)



Slika 3.5.Izgled tragova posle pola sata, jednog ,dva i šest časova ekspozicije nagrizajućim hemikalijama

3.1.2.Postupak nagrivanja i metodologija

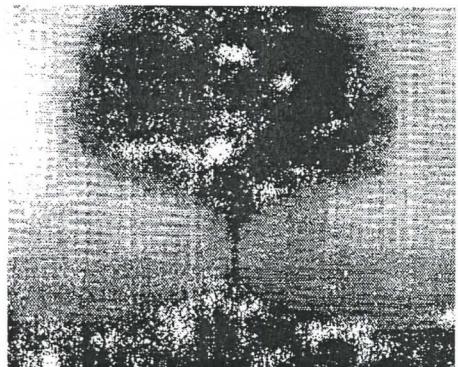
Postupak nagrivanja zavisi od načina brojanja tragova: optičkim mikroskopom (ručno ili automatski/poluautomatski) i nemikroskopske metode, kao što su brojanje varnica i metoda pomoću scintilatora koji ispunjava nagrizene šupljine. Najčešće metode nagrivanja su hemijsko i elektro-hemijsko nagrivanje (sl.3.6. a i b)



Stage 1 - Pit Formation



Stage 2 - Tree Formation



- a) Stage 1-u obliku jame-hemijsko nagrizanje
- b) Stage 2-u obliku drveta – elektrohemijjsko nagrizanje

- c) elektrohemijjski nagrižen trag u obliku drveta

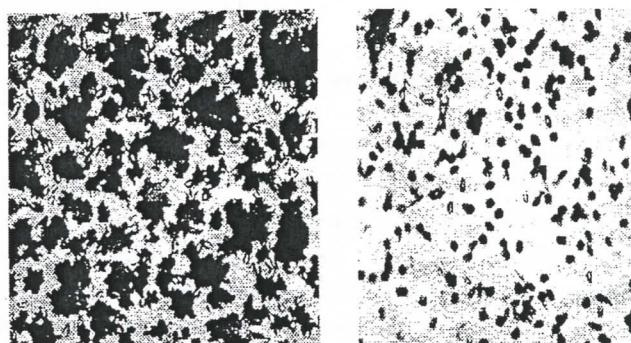
Slika.3.6.

hemijjsko:

Hemijjsko nagrizanje (CE) se obično sprovodi u termostatiranom kupatilu na temperaturama u opsegu od 40°C do 70°C (izuzetno u nekim slučajevima i do 90°C) uz korišćenje vodenog rastvora NaOH (ili KOH) molarnosti od 2 do 6 M (npr. za 6 M NaOH, $6 \times 40 = 240$ g NaOH u 1 l vodenog rastvora (destilovana voda)). Tipično vreme nagrizanja je od 2 do 6 h. Povećanje molarnosti, vremena trajanja nagrizanja i temperature utiče na veličinu nagriyene šupljine. U nekim slučajevima rastvoru se dodaje etil alkohol u određenoj proporciji (npr. PEW rastvor od KOH, etil alkohola i vode), jer alkohol povećava osetljivost registrovanja u nekim vrstama plastike (polikarbonatima), dok u ostalim smanjuje (CR-39). Detektorske folije su razdvojene žičanim oprugama ili se nalaze u vertikalnim okvirima na fiksiranim rastojanjima. Detektori su uronjeni u rastvor nagrizivača sa ili bez mešanja/rotiranja, unutar zatvorenih epruveta koje su smeštene u vodeno kupatilo na konstantnoj temperaturi. Nakon završenog postupka, detektori se uklanjuju i peru u destilovanoj vodi i ostavljaju nekoliko minuta u malom ultrasoničnom kupatilu ili destilovanoj vodi da bi se odstranili ostaci nagrizanja. Nakon sušenja detektori su spremni za brojanje pod optičkim mikroskopom. Dijametar nagrizenih tragova je u proseku nekoliko μm (sl.3.7.desno), međutim može da se uveća do $50 \mu\text{m}$ ili više nakon produženog nagrizanja.

elektrohemski nagrizanje

Pošto su tragovi nastali na ovaj način lako vidljivi i golim okom (sl. 3.7 levo) (uvećavaju se za faktor 10^2), elektrohemski nagrizanje (ECE) služi za pripremu kod brojanja mikrofisi čitačem, slajd projektorom ili slabo uvećavajućeg mikroskopa (10x). Osnovni mehanizam je primena visoko frekventnog električnog polja za razdvajanje suprotno nanelektrisanih jona u polju. Tipično električno polje je 50 kV cm^{-1} na 2 kHz frekvencije. Za plastične detektore debljine $200 \mu\text{m}$, primenom napona od 1000 V dobija se polje od 50 kV cm^{-1} . Takvo polje dovodi do električnog probora i varničenja na krajevima nagrivenih tragova u dielektričnoj sredini, odnosno plastici. Finalna veličina ECE nagrivenih mrlja može biti oko $100 - 200 \mu\text{m}$.



Slika 3.7. Izgled tragova dobijen refleksionim optičkim mikroskopom
a)levo-elektrohemski nagriveni tragovi
b)desno-hemijski nagriveni tragovi

3.1.3 Brojanje tragova

brojanje varnica

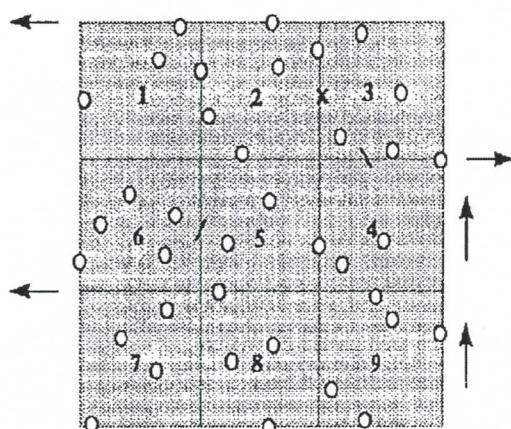
Predstavlja poluautomatsku tehniku brojanja tragova i koristi se u slučaju relativno male gustine tragova ($<10^3 \text{ cm}^{-2}$). Autori ove tehnike su Cross i Tommasino (1970). Preko nagrivenih detektora nanosi se aluminiziran Mylar plastični film i zatim se detektor izlaze jakom električnom polju kroz čitavu debljinu (250 kV cm^{-1}). Aluminizirani sloj koji je okrenut metalnom površinom prema detektoru predstavlja područje kratkog spoja određenog kapaciteta. Na taj način električna struja sagoreva aluminijum direktno iznad šupljina tako da varnica ne može proći kroz datu šupljinu ponovo. Varnica preskače po šupljinama po slučajnom radosledu i automatski ih broji skaler koji je priključen u kolo. Efikasnost ovog načina brojanja tragova u poređenju sa optičkim brojanjem je $95\% \pm 5\%$.

Brojanje pomoću scintilatora koji ispunjava nagrizene jame

Ovu poluautomatsku metodu koja obezbeđuje brzo brojanje nagrizenih tragova uveli su Harvey i Weeks (1982). Pasta od scintilacionog materijala (npr. ZnS) se premaže preko gornje površine detektora i na taj način ispuni nagrizene tragove u obliku jama, a višak materijala se obrše sa površine detektora. Brojanje tragova se vrši tako što se detektor postavlja na granični prozor fotomultiplikatorske cevi (PMT) tako da mu nagrizena površina bude slobodna da se izloži jakom izvoru alfa čestica ($100 \mu\text{Ci}$). Scintilacije izazvane u scintilacionom materijalu koji ispunjava nagrizene jame se automatski broje pomoću fotomultiplikatora i prateće elektronike. Kalibracija odnosi brzine brojanja (10^3 - 10^5 s^{-1}) i broja nagrizenih jama, uspostavljanje linearnosti fotomultiplikatorskog odgovora i gustine tragova i moguće određivanje kalibracionog faktora predstavlja dodatne eksperimente.

Brojanje tragova pomoću optičkog mikroskopa

Postoji više uređaja na tržištu koji automatski obavljaju poslove brojanja tragova i statističke obrade podataka, kao što su npr.: Quantimet 900; Magiscan 2; ELBECK, ITRACK itd. Da bi se razumeo metod rada ovih uređaja, opisaćemo postupak brojanja kod "ručne" ili poluautomatske metode. Na slici je prikazano vidno polje optičkog mikroskopa koje je podeljeno na 9 piksela obeleženih brojevima. Da bi se olakšao proces brojanja, fokus mikroskopa se pomera od leva na desno (pravac strelica na slici 3.8) u jednom nivou duž X ose i zatim se pomera po pikselima duž Y ose da bi se prešlo na drugi nivo.



Slika 3.8

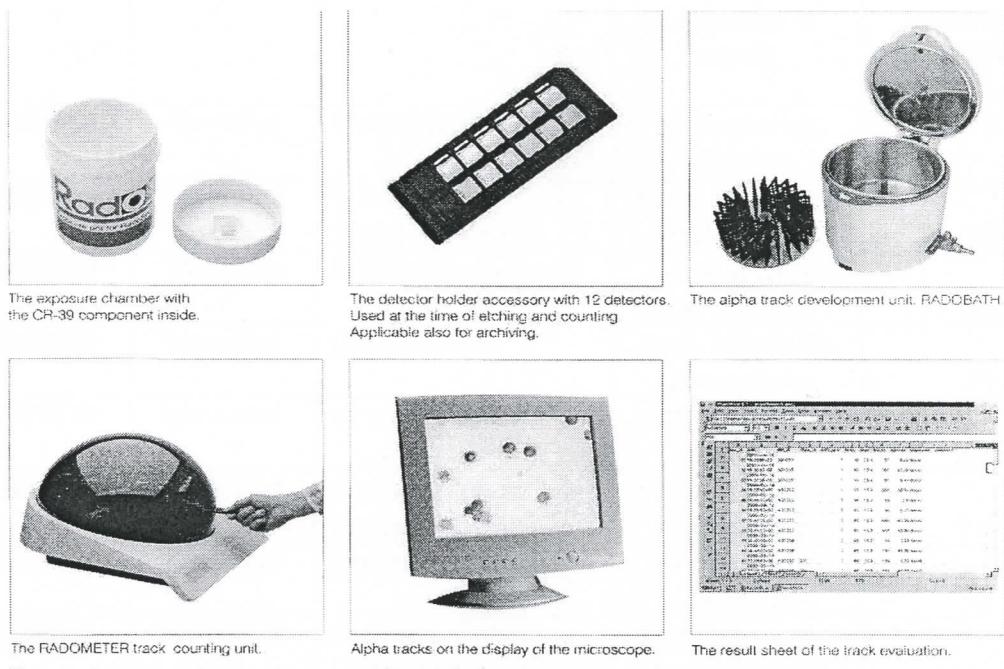
Problemi koji se mogu javiti kod automatskog brojanja tragova su prepoznavanje tragova, prekrivanje tragova i doprinos pozadinskog zračenja. Stvarni nagrizeni tragovi u obliku jama se mogu identifikovati sporim pomeranjima fokusa mikroskopa gore-dole u potrazi za svetlim tačkama reflektovane svetlosti sa dna nagrzenog traga u obliku

konusa. Stvarni tragovi su pravilnog geometrijskog oblika: kružnog ili eliptičnog ukoliko alfa čestica pada pod velikim uglom u odnosu na površinu detektora. Međutim, prilikom svakog merenja postoji određen broj tragova koji potiču od pozadinskog zračenja: od primesa u samom plastičnom materijalu, kosmičkog zračenja ili od izlaganja detektora raznim radioaktivnim nečistoćama u toku izrade ili u toku postavke eksperimenta. Uzimajući to sve u obzir, najverovatnija gustina pozadinskih tragova može se proceniti na $10 - 40 \text{ cm}^{-2}$, što daje zanemarljivu grešku u odnosu na broj stvarnih tragova npr. 1000 cm^{-2} .

IV EKSPERIMENTALNI DEO

U ovom radu su prikazani rezultati merenja koncentracije aktivnosti radona u vazduhu zatvorenih prostorija (objekata) na teritoriji opštine Novi Sad, a koja su izvršena radi izrade radonske mape Vojvodine.

Merenja su izvršena trag detektorima u čvrstom stanju CR-39 (plastični materijal osetljiv na alfa zračenje), dok su tragovi očitani i obrađeni pomoću RADOSYS 2000 elektronske opreme u Mađarskoj, koja uključuje (slika 4.1): RADOBATH 2000 (termostatirano kupatilo za hemijsko nagrizanje tragova na detektorima, RADOMETER 2000 opremu za čitanje tragova sa B&W CCD kamerom i kompatibilnim PC računarom).



Slika 4.1 RADOSYS oprema za merenje koncentracije aktivnosti radona alfa trag detektorima CR 39

Dimenzije detektora koji je u toku merenja bio prilepljen za poklopac plastične difuzione komore su $10 \times 10 \times 1$ mm. Detektor je osetljiv samo na alfa zračenje i njegova osetljivost iznosi $2.9 \text{ tragova}/(\text{cm}^3 \text{ kBqh/m}^3)$. Detektori su bili nagrizani 25% rastvorom NaOH, 4 časa na konstantnoj temperaturi od 90°C .

Na jednoj lokaciji, detektor je postavljan prizemnim prostorijama, zatim u prostoriji gde ljudi više borave, odnosno u dnevnoj ili spavaćoj sobi, na visini od jednog metra u odnosu na pod (nivo ljudske glave dok čovek spava), daleko od vode ili izvora

grejanja. Vreme eksponiranja detektora je 90 dana čime su izbegnute dnevne oscilacije koncentracije aktivnosti radona na tim lokacijama.

U tabeli br 4.1 prikazane su vrednosti koncentracije aktivnosti radona izmerene na 86 lokacija na području opštine Novi Sad, zatim je na osnovu tih vrednosti napravljen histogram log-normalne raspodele koncentracija (slika 4.1), izračunata je srednja vrednost, standardna devijacija, minimalna i maksimalna vrednost unutar opštine (tabela 4.3) i procentualna zastupljenost tih koncentracija u opštini Novi Sad (tabela 4.2). U tabeli su dati i podaci o tipu gradnje kao i o spratnosti prostorije u kojoj je bio postavljen detektor.

Tabela 4.1 Vrednosti koncentracije aktivnosti radona merene trag detektorom CR 39 na području opštine Novi Sad u periodu od 12. decembra 2002. – 12. marta 2003. godine

R.br.	šifra	opština	adresa	tip gradnje i lokacija u stanu	Koncentracija aktivnosti radona [Bq/m ³]
1	B89666	Novi Sad	Sonje Marinković 14	stara,suteren, podrum	72
2	B89668	Novi Sad	Kovilj Žarka Zrenjanina 15	nova, prizemlje, dnevna soba	155
3	B89669	Novi Sad	Bul.Oslobodenja 19	nova, suteren, dnevna soba	28
4	B89670	Novi Sad	Ćirpanova 53	stara, prizemlje, dnevna soba	54
5	B89671	Novi Sad	Braće Ribnikar 33	stara, prizemlje, podrum	315
6	B89673	Novi Sad	Omladinskih radnih akcija 5	nova, prizemlje, dnevna soba	212
7	B89674	Novi Sad	Antuna Urbana 6a	nova, suteren, podrum	31
8	B89675	Novi Sad	Sremska Kamenica Dr.Branka Manojlovića 6	nova, I sprat, spavaća soba	70
9	B89676	Novi Sad	Rakovac Salaksije bb	nova, I sprat, dnevna soba	75
10	B89678	Novi Sad	Rumenka Sv.Markovića-Toze 14	nova, podrum	235
11	B89679	Novi Sad	Dimitrija Avramovića 6	nova, prizemlje, spavaća soba	23
12	B89680	Novi Sad	Milana Simovića 2	nova,podrum	268
13	B89682	Novi Sad	Prizrenska 20	nova, prizemlje, dnevna soba	80
14	B89683	Novi Sad	Sremska Kamenica Vuka Karadžića 12b	nova, podrum	115

R.br.	šifra	opština	adresa	tip gradnje i lokacija u stanu	Koncentracija aktivnosti radona [Bq/m3]
15	B89684	Novi Sad	Rumenački put 31	nova, suteren, dnevna soba	19
16	B89686	Novi Sad	Stevana Mokranjca 20	nova, podrum	19
17	B89688	Novi Sad	Svetosavska 16	stara, prizemlje, dnevna soba	59
18	B89690	Novi Sad	Milana Glumca 8	nova, I sprat, spavaća soba	291
19	B89691	Novi Sad	Kružna 2	nova, prizemlje, dnevna soba	19
20	B89692	Novi Sad	Bul.Cara Lazara 54	nova, suteren, dnevna soba	223
21	B89695	Novi Sad	Oblačića Rada 2	nova, prizemlje, dnevna soba	171
22	B89696	Novi Sad	Vojvode Bojovića 3	stara, podrum	265
23	B89698	Novi Sad	Majevička 43	stara, prizemlje radna soba	131
24	B89700	Novi Sad	Aranj Janoša 14	nova, prizemlje, spavaća soba	60
25	B89701	Novi Sad	Kisač Šturova 65	nova, prizemlje, dnevna soba	13
26	B89702	Novi Sad	Dragiše Brašovana 8	nova,prizemlje, dnevna soba	62
27	B89704	Novi Sad	Braće Dronjak 13	nova, prizemlje, dnevna soba	353
28	B89705	Novi Sad	Veternik Nova 4b	nova, prizemlje, ostava	54
29	B89706	Novi Sad	Dunavska 27	nova,prizemlje, dnevna soba	35
30	B89707	Novi Sad	Njegoševa 2	stara, I sprat, dnevna soba	167
31	B89709	Novi Sad	Pariske Komune 20	nova,podrum	34
32	B89710	Novi Sad	Tone Hadžića 30	stara, prizemlje, dnevna soba	42
33	B89747	Novi Sad	Novi Ledinci Zlatana Petrovića 10	nova, I sprat, spavaća soba	23
34	B89763	Novi Sad	Sremska Kamenica I.L.Ribara 23	stara, prizemlje, dnevna soba	41
35	B89764	Novi Sad	Sremska Kamenica V.Nazora 45	nova, prizemlje, dnevna soba	39

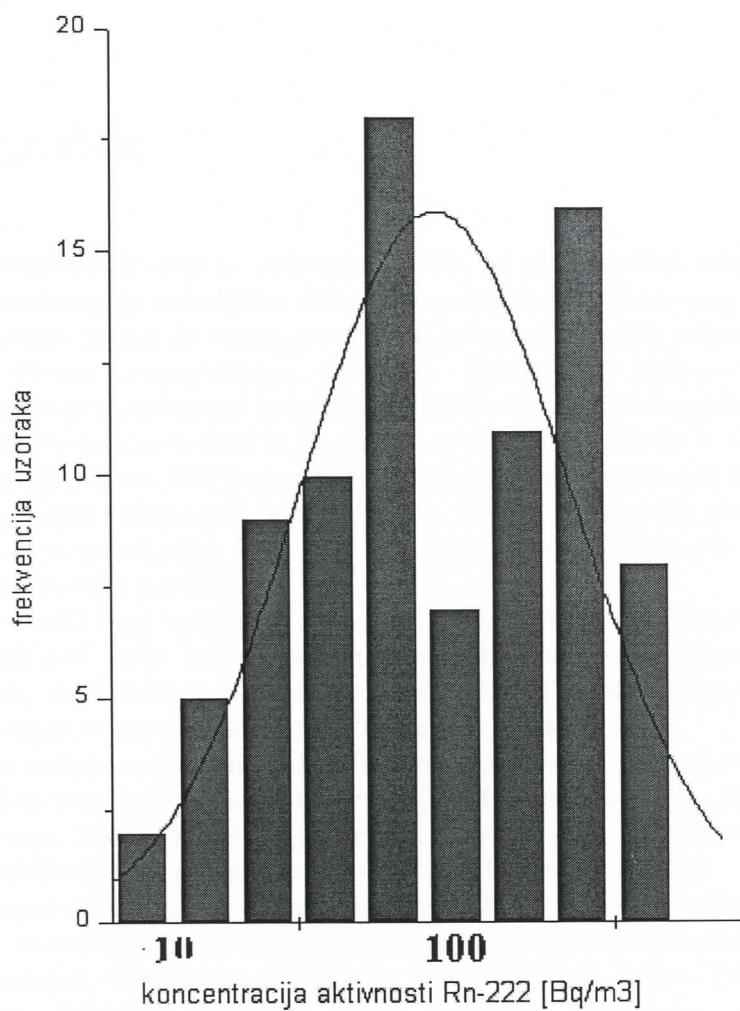
R.br.	šifra	opština	adresa	tip gradnje i lokacija u stanu	Koncentracija aktivnosti radona [Bq/m ³]
36	B89768	Novi Sad	Bukovac Save Vukovića 18	nova, prizemlje, dnevna soba	183
37	B89770	Novi Sad	Bukovac Kralja Petra I 53	nova, prizemlje, spavaća soba	300
38	B89772	Novi Sad	Petrovaradin Livadska 14	stara, prizemlje, radna soba	57
39	B89774	Novi Sad	Petrovaradin Račkog 45	stara, prizemlje, dnevna soba	390
40	B89779	Novi Sad	Petrovaradin Mišeluk 3 br.1	nova, podrum	50
41	B89781	Novi Sad	Kamenjar Podunavska 38	nova, prizemlje, dnevna soba	27
42	B90044	Novi Sad	Petrovaradin Reljkovićeva 25	nova, prizemlje, dnevna soba	225
43	B90046	Novi Sad	Geri Karolja 23	nova, prizemlje, spavaća soba	309
44	B90047	Novi Sad	Janka Čmelika 68/b	nova, prizemlje, dnevna soba	445
45	B90050	Novi Sad	Novi Ledinci Zmaj Jovina 5	nova, prizemlje, radna soba	384
46	B90051	Novi Sad	Rumenka Danila Kiša 14	nova, prizemlje, dnevna soba	193
47	B90052	Novi Sad	Stevana Sindelića 54	nova, prizemlje, radna soba	39
48	B90054	Novi Sad	Kać Nikole Tesle 45	nova, prizemlje, radna soba	60
49	B90057	Novi Sad	Dubrovačka 5	nova, prizemlje, kuhinja	59
50	B90061	Novi Sad	Nikole Pašića 4	nova, I sprat, spavaća soba	75
51	B90062	Novi Sad	Đorđa Rajkovića 10	nova, prizemlje, spavaća soba	118
52	B90064	Novi Sad	Vladike Platona 2	stara, suteren, radna soba	64
53	B90065	Novi Sad	Veternik Zrmanjska 4	nova, I sprat, spavaća soba	213
54	B90066	Novi Sad	Veternik Dobrovoljačka 44	nova, I sprat, radna soba	390
55	B90068	Novi Sad	Stanoja Glavaša 72/b	nova, prizemlje, radna soba	339
56	B90070	Novi Sad	Sremska Kamenica Gajeva 17	stara, prizemlje, radna soba	224

R.br.	šifra	opština	adresa	tip gradnje i lokacija u stanu	Koncentracija aktivnosti radona [Bq/m ³]
57	B90074	Novi Sad	Kisač Janošikova 39	nova, prizemlje, spavaća soba	336
58	B90075	Novi Sad	Sremska Kamenica Glavica, Staro Selo	nova, prizemlje, kuhinja	123
59	B90076	Novi Sad	Vojvode Bojovića 6/1	nova, prizemlje, dnevna soba	17
60	B90077	Novi Sad	Narodnog Fronta 49	nova, prizemlje, dnevna soba	10
61	B90079	Novi Sad	Sonje Marinković 16	nova, visoki perter, dnevna soba	12
62	B90080	Novi Sad	Gorana Kovačića 14	nova, prizemlje, dnevna soba	37
63	B90082	Novi Sad	Trg 27.Marta 2	nova, visoki perter,spavaća soba	64
64	B90084	Novi Sad	Petrovaradin Patrijarha Rajačića 51/a	nova, prizemlje, dnevna soba	246
65	B90086	Novi Sad	Petrovaradin Dinka Šimunovića 65	nova, prizemlje, dnevna soba	206
66	B90087	Novi Sad	Pašićeva 25	stara, prizemlje, dnevna soba	89
67	B90088	Novi Sad	Đordja Tabakovića 20	stara, prizemlje, dnevna soba	333
68	B90113	Novi Sad	Feješ Klare 43	nova, prizemlje, radna soba	30
69	B90114	Novi Sad	Zlatne grede 4	stara, suteren, radna soba	75
70	B90115	Novi Sad	Veternik Žrtava Fašizma 32	nova, prizemlje, radna soba	37
71	B90116	Novi Sad	Petrovaradin Preradovićeva 142	stara, prizemlje, spavaća soba	172
72	B90118	Novi Sad	Petrovaradin Franje Štefanovića 8	nova, suteren, radna soba	74
73	B90120	Novi Sad	Rumenka Arsenija Čarnojevića 54	stara, visoki parter, spavaća soba	196
74	B90124	Novi Sad	Stepanovićevo Solunskih Dobrovoljaca 162	nova, prizemlje, spavaća soba	265

R.br.	šifra	opština	adresa	tip gradnje i lokacija u stanu	Koncentracija aktivnosti radona [Bq/m ³]
75	B90125	Novi Sad	Dordja Rajkovića 3	nova, podrum, dnevna soba	78
76	B90126	Novi Sad	Futoški put 14e	nova, I sprat, kuhinja	55
77	B90127	Novi Sad	Stepanovićevo Stepe Stepanovića 77	stara, prizemlje, radna soba	24
78	B90128	Novi Sad	Ledinci Liparija 2	nova, prizemlje, spavača soba	264
79	B90131	Novi Sad	Branka Radičevića 52	stara, prizemlje,	95
80	B90136	Novi Sad	Bele Njive 29a	stara, prizemlje, spavača soba	22
81	B90137	Novi Sad	Koste Šokice 37	stara, prizemlje, spavača soba	129
82	B90138	Novi Sad	Almaška 19	stara, prizemlje, spavača soba	96
83	B90139	Novi Sad	Fruškogorska 12	nova, podrum	24
84	B90142	Novi Sad	Kovilj Kralja Petra 16	stara, prizemlje, dnevna soba	155
85	B90152	Novi Sad	Laze Nančića 59	stara, prizemlje, ostava	141
86	B90154	Novi Sad	Petrovaradin Kninska 17	nova, prizemlje, dnevna soba	35

Tabela 4.2 Procentualna zastupljenost koncentracija aktivnosti radona u opštini Novi Sad

interval koncentracija [Bq/m ³]	broj lokacija	procentualna zastupljenost u opštini
<100	48	56
100-200	14	16
200-400	24	28
>400	1	1



Slika 4.1 Log-normalna distribucija koncentracija aktivnosti radona

Tabela 4.3 Srednja koncentracija aktivnosti radona u zatvorenim prostorijama u opštini Novi Sad, minimalna i maksimalna koncentracija

A_{sr} [Bq/m ³]	σ [Bq/m ³] st.devijacija	n broj uzorka	Amin [Bq/m ³]	Amax [Bq/m ³]
133	115	86	10	445

ZAKLJUČAK

Savremena istraživanja su pokazala da 40% od ukupne doze zračenja, koje primi prosečno stanovništvo, je uslovljeno udisanjem prirodnog radiaktivnog gasa ^{222}Rn . Na osnovu ovoga može se reći da radon predstavlja jedan od najvećih zdravstvenih rizika za stanovništvo. Prema preporukama Komisije ICRP od 1994. godine dozvoljene koncentracije radona za zatvoreni prostor su: 200 Bq/m³ za nove zgrade i 400 Bq/m³ za stare zgrade. Građevinski standard za izgradnju novih stanova i kuća je 100 Bq/m³ radona kao prosečni godišnji nivo, 200 Bq/m³ za preporuku jeftinih sanacionih mera i 600 Bq/m³ za preporuku skupih sanacionih mera. Naime, i u slučaju ovih preporuka i normi primenjuje se princip ALARA (As Low As Reasonably Achievable - onoliko nisko koliko se razumno može postići).

Postoji veliki broj razvijenih metoda za određivanje koncentracije radona, a u poslednje vreme kao jedna od najznačajnijih integracionih pasivnih metoda izdvaja se metoda sa trag detektorima u čvrstom stanju (SSNTD-Solid State Nuclear Track Detectors), od kojih se najviše koristi Cr-39 plastični detektor.

U ovom radu je opisana metoda određivanja koncentracije radona pomoću CR-39 detektora i dati su rezultati merenja koncentracije radona u zatvorenim prostorijama na 86 lokacija u Novom Sadu. Određena je srednja koncentracija aktivnosti radona od 133 Bq/m³ sa standardnom devijacijom od 115 Bq/m³. Lokacija sa minimalnom koncentracijom od 10 Bq/m³ je ul. Narodnog fronta br.49 (novi tip gradnje), a lokacija sa maksimalnom koncentracijom od 445 Bq/m³ je ul. Janka Čmelika br. 68/b (novi tip gradnje). Vlasnicima objekata sa povišenom koncentracijom radona (iznad 200 Bq/m³) preporučene su jeftinije sanacione mere: pojačana ventilacija, saniranje podne konstrukcije i zaptivanje podova oblogama.

Rezultati su upoređeni sa dosadašnjim merenjima na teritoriji opštine Novi Sad koja su izvršena metodom adsorpcije na aktivnom uglju, pri čemu se odredila srednja koncentracija od 55 Bq/m³. Budućnost daljih istraživanja u ovoj oblasti je poređenje ove dve metode na većem broju merenja.

LITERATURA

1. Dangić A., *Geochemijski procesi u prirodi i radionuklidi*, Jonizujuća zračenja iz prirode (monografija), 41, Beograd, (1995).
2. Mira Jurić-doktorska disertacija "Uticaj radona na zdravlje čoveka", Novi Sad 1999.
3. Baucal M., *Prirodna radioaktivnost i emanacija radona iz građevinskog materijala*, Diplomski rad, Novi Sad, 1993.
4. 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.
5. Nikezić D., *Radon - glavni radioaktivni kontaminant čovekove okoline*, Jonizujuća zračenja iz prirode (monografija), 145, Beograd, (1995).
6. 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).
7. William Field, Ph.D., *Radon Occurrence and Health risk*, University of Iowa, <http://www.vh.org/Providers/Textbooks/Radon/HealthRisk.html>
8. 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).
9. Branković D., *Ispitivanje koncentracije radona u stambenim prostorijama*, Diplomski rad, Novi Sad, 1994.
10. 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.
11. Radmilović V., *Prirodni radionuklidi u građevinskim materijalima sa osvrtom na nivo radona u stambenim prostorijama*, Jonizujuća zračenja iz prirode (monografija), 241, Beograd, (1995).
12. 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
13. Baucal M., Prirodna radioaktivnost i emanacija radona iz gradjevinskog materijala, Diplomski rad, Novi sad, 1993. Bernard L. Cohen, *A national survey of ²²²Rn in U.S. homes and correlating factors*, Health Physics, Vol 51, No.2, August 1986.
14. 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.
15. Mowris R. J., Fisk W. J., *Modeling the effects of exhaust ventilation on ²²²Rn entry rates and indoor ²²²Rn concentrations*, Health Physics, Vol 54, No.5, May 1988.

- 16.Sofija Ćurčić: Gama-spektrometrijsko određivanje koncentracije radona, Diplomski rad, Novi Sad 1999.
- 17.Čonkić Lj., Bikit I., Krmar M., Žikić N., Đurčić Ž., Vesković M., Slivka J., *Određivanje koncentracije ^{222}Rn u zatvorenim prostorijama*, Novi Sad, 1998.
- 18.S.Durrani, R. Ilić: Radon Measurements by etched track detectors, Applications in Radiation Protection, Earth Sciences and the Environment, Singapore 1997



**Univerzitet u Novom Sadu
Prirodno - matematički fakultet**

Ključna dokumentacijska informacija

Redni broj:

RBR

Identifikacioni broj:

IBR

Tip dokumentacije:

TD

Monografska dokumentacija

TZ

Tekstualni štampani materijal

VR

Diplomski rad

Autor:

AU

Šipka Silvana

Mentor:

MN

Prof. dr Bikit Ištvan, redovni profesor PMF, Novi Sad

Naslov rada:

NR

"Određivanje koncentracije aktivnosti radona pomoću čvrstih trag detektora CR-39"

Jezik publikacije:

JP

Srpski (latinica)

Jezik izvoda:

JI

Srpski

Zemlja publikovanja:

ZP

Srbija i Crna Gora

Uže geografsko područje:

UGP

Vojvodina

Godina:

GO

2003.

Izdavač :

IZ

Autorski reprint

Mesto i adresa:

MA

21000 Novi Sad, Prirodno-matematički fakultet, Institut za matematiku,
Trg Dositeja Obradovića 4

Fizički opis rada:

FO

(4/4/0/10/21/51 0)

(broj poglavlja/ strana/ lit.citata/ tabela/
slika/ grafika/ priloga)

<i>Naučna oblast:</i>	Fizika
NO	
<i>Naučna disciplina:</i>	Nuklearna fizika
ND	
<i>Predmetna odrednica/</i>	
<i>Ključne reči:</i>	<i>Radon, CR-39, trag detektori, koncentracija aktivnosti</i>
PO	
UDK	
<i>Čuva se:</i>	U biblioteci Departmana za fiziku,
ČU	Prirodno-matematički fakultet, Novi Sad
<i>Važna napomena:</i>	nema
VN	
<i>Izvod:</i>	U radu je predstavljena metoda određivanja
IZ	koncentracije aktivnosti radona pomoću trag detektora CR-39
<i>Datum prihvatanja teme od strane</i>	
<i>Nastavno-naučnog veća:</i>	10. 07. 2003.
DP	
<i>Datum odbrane:</i>	16. 07. 2003.
DO	
<i>Članovi komisije:</i>	(naučni stepen/ ime i prezime/ zvanje/ fakultet)
KO	
<i>Predsednik:</i>	Prof. dr Miroslav Vesković, redovni profesor, PMF, Novi Sad
<i>Član:</i>	Prof. dr Istvan Bikit, redovni profesor, PMF, Novi Sad
<i>Član:</i>	dr Milica Pavkov, docent, PMF, Novi Sad