



Univerzitet u Novom Sadu
Prirodno - matematički fakultet
Departman za fiziku



Dušan Dubajić

MOGUĆNOSTI PREDVIĐANJA SEIZMIČKIH AKTIVNOSTI KONTINUIRANIM PRAĆENJEM KONCENTRACIJE RADONA

Diplomski rad

Mentori:
Prof. dr Jovana Nikolov
Izv. prof dr Vanja Radolić

Novi Sad, 2022.

Zahvaljujem se svojoj porodici, rodbini, prijateljima i svima koji su se našli na mom putu i pružili pomoć kad je bilo najpotrebnije.

Zahvaljujem se svojim mentorima, profesorici Jovani Nikolov za entuzijazam, savete i sugestije koje mi je poklanjala tokom studija, kao i tokom izrade ovog rada; profesoru Vanji Radoliću za krajnji profesionalizam, stručnost i velikodušnost, kao i članovima komisije i svim svojim profesorima tokom celokupnog školovanja, koji su pomogli da dođem do ove tačke.

Hvala: Ružici, Ivani i Katarini.

Na kraju, posebnu zahvalnost i poštovanje dugujem kolegi i prijatelju Davidu od kojeg sam naučio sve ono što ne piše u knjigama.

Sadržaj

| | |
|---|----|
| 1. Uvod..... | 4 |
| 2. Prirodna radioaktivnost..... | 7 |
| 2.1. Radioaktivni nizovi..... | 10 |
| 3. Radon..... | 13 |
| 3.1. Pokretljivost radona..... | 14 |
| 3.1.1. Izvori radona..... | 14 |
| 3.1.2. Migracija – difuzija i advekcija..... | 15 |
| 3.1.3. Raspad radona na kratkoživeće potomke..... | 16 |
| 3.2. Radon u zemljištu – korelacija sa seizmičnošću..... | 17 |
| 4. Pasivne metode detekcije radonskog signala..... | 19 |
| 4.1. Elektreti..... | 19 |
| 4.2. Metoda ugljenih filtera..... | 20 |
| 4.3. Trag detektori..... | 20 |
| 5. Čvrsti nuklearni trag detektori (SSNTD)..... | 22 |
| 5.1. CR-39..... | 23 |
| 5.2. Detekcija alfa čestica CR-39 detektorom..... | 26 |
| 5.2.1. Merenje intenziteta alfa čestica..... | 26 |
| 6. Sistematika eksperimentalnih merenja..... | 28 |
| 6.1. Monitoring of soil radon by SSNTD in Eastern India in search of possible earthquake precursors [18]..... | 28 |
| 6.2. Radon as an earthquake precursor [33]..... | 31 |
| 6.3. Anomalous radon emission as precursor of earthquake [34]..... | 33 |
| 6.3.1. Turska..... | 34 |
| 6.3.2. Meksiko..... | 34 |
| 6.3.3. Tajland..... | 34 |
| 6.3.4. Kalifornija, SAD..... | 35 |
| 7. Zaključak..... | 36 |
| 8. Biografija..... | 40 |

1. Uvod

Ovaj rad počecu rečenicom Čarlsa Darvina u kojoj on kaže kako svaki zemljotres uništi najstarija zdanja, ceo svet i najsitniji deo svega što je bilo čvrsto i stabilno; u jednom trenutku nestaje sve ono što sati uloženog truda ne mogu proizvesti [1].

Darvin je svojevremeno opisivao ruševine koje su ostale nakon zemljotresa u gradu Concepción, Čile, koji se desio 20. februara 1835. godine. Želeo je iskazati kolika je zapravo snaga i moć prirode, koja nije selektivna prilikom razaranja. Fascinantna je spoznaja da je danas zahvaljujući napretku nauke i tehnike, ovakve prirodne katastrofe moguće predvideti sa određenom tačnošću.

U ovom radu opisane su odabrane eksperimentalne metode i analize mogućnosti predviđanja zemljotresa kao prirodne katastrofe uz pomoć nuklearne fizike. Najpre će biti definisani neki osnovni pojmovi.

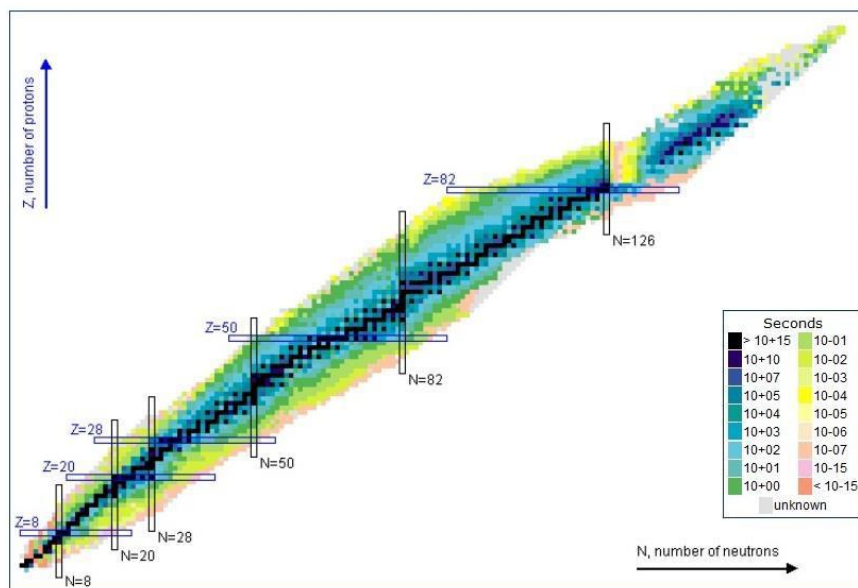
Zemljotres je iznenadno i nasilno kretanje Zemljine kore i plitke unutrašnjosti, koje uglavnom uzrokuje manja ili veća oštećenja materijalnog tipa, kao i oštećenja ekosistema zahvaćenih zemljotresom. Uzrocima zemljotresa smatraju se takozvani seizmički talasi koji nastaju pomeranjem delova Zemljine unutrašnjosti. Ova pomeranja su manifestacija sila kojima masivni delovi (najčešće stene i kamenje) vrše pritisak jedni na druge na nekoj dubini ispod površine Zemlje.

Postoji još veliki broj definicija koje precizno determinišu zemljotres kao prirodnu katastrofu, ali sve one su manje ili više sadržane u okviru već navedene. U daljem radu neće biti reči o ovom prirodnom fenomenu sa geološke strane, već samo sa fizičke, kao i o fizičkim uzrocima i posledicama zemljotresa. [2]

Nuklearna fizika je jedna od najmlađih oblasti fizike. Posmatrajući istorijsku lentu vremena, početak razvoja nuklearne fizike možemo smestiti na prelaz između 19. i 20. veka, a događaj koji smatramo začecem razvoja svesti o nuklearnim pojavama je svakako otkriće prirodne radioaktivnosti. U prve redove ćemo svrstati pretke nuklearne fizike Anrija Bekerela, Ernesta Raderforda, Pjera i Mariju Kiri i ostale koji su svojim naizgled „suludim“ idejama, matematičkim proračunima, radom i trudom uobličili nuklearnu fiziku u ono što je ona danas. Predmet izučavanja nuklearne fizike je, u prvom redu atomsko jezgro, tačnije njegova struktura i transformacije. Danas se ona razvija podjednako i kao teorijska i kao eksperimentalna nauka, a poslužila je i kao osnova za razvoj drugih disciplina.

Ne bi bilo zgoreg u ovom poglavlju rada reći nešto više o osnovnim procesima radioaktivnog raspada i prisustvu radioaktivnih jezgara u prirodi. Intuitivno je sasvim jasno da je atomsko jezgro u odnosu na ceo atom zapravo tačka zanemarljivih dimenzija, što znači da zakoni i principi koji se odnose na atom, ne moraju nužno da važe i za atomsko jezgro, što najčešće i jeste slučaj. Istorijski gledano, svest o sastavu atomskog jezgra se razvijala relativno sporo i u početku je ličila na umetničko delo impresionizma. Bila je to ogromna slika isprskana mnoštvom boja, neartikulisanih oblika, refleksija, potpuno apstraktna, a opet lepa. O atomu i jezgru se znalo mnogo, a opet ništa. Dok se nije došlo do Hajzenbergove proton-neutronske teorije o strukturi atoma, postojalo je mnogo netačnih hipoteza koje ne samo da nisu davale jasniju sliku o strukturi atoma, već su zamagljivale dotadašnja saznanja. Na primer, Proutova hipoteza postavljena 1816. godine, da se svaki atom sastoji od više atoma vodonika, jer su atomske težine svih elemenata približno jednake celobrojnom umnošku atomske težine vodonika, zatim proton-elektronska hipoteza koja kaže da u jezgru zajedno egzistiraju i protoni i elektroni, što je kontradiktorno današnjim saznanjima.

Naravno, sve ove hipoteze bile su odbačene uvođenjem proton-neutronske strukture atoma, ali su ujedno bile i put koji je do nje doveo. Dakle u sastav jezgra ulaze pozitivni protoni i elektroneutralni neutroni. Ove čestice jednim imenom zovemo nukleoni. Pa tako i jezgro zovemo nuklid. Nuklid je jezgro sa specifičnim svojstvima. U nuklearnoj fizici, od posebnog značaja su nestabilna jezgra, odnosno radionuklidi. Već je odavde jasno da jezgro može biti stabilno ili nestabilno. Granica između ove dve grupe nije jasno određena, no stabilnim jezgrima smatramo ona čiji se broj nije smanjio za neki značajniji iznos u vremenskom intervalu reda veličine 10^{10} godina, što bi bila neka procena starosti onog dela svemira koji poznajemo. Za sva jezgra koja se raspadaju brže od toga možemo reći da su nestabilna ili radioaktivna. Danas je poznato preko 2000 jezgara koja su proizvedena u laboratoriji, od čega je velika većina nestabilna. Na osnovu sistematike podataka o poznatim jezgrima (njihovog broja protona Z i neutrona N), načinjen je takozvani proton-neutronska dijagram, koji nam daje informacije o stabilnosti jezgra.



Slika 1.1. Proton-neutronski dijagram

Na ovom dijagramu ucrtana su sva do sad poznata jezgra, a svakom jezgru odgovara pojedinačan kvadratić na šemi. Centralni kvadratići, odnosno oni crne boje su jezgra koja postoje u prirodi, to jest stabilna jezgra, kao i neka nestabila čiji je period poluraspada dovoljno dug tako da se nisu raspala. Linija na kojoj leže ova jezgra na dijagramu poznata je pod nazivom linija stabilnosti. Kvadratići koji ovičavaju liniju stabilnosti su nestabilna jezgra, koja teže da dostignu stabilnost. To se najčešće dešava radioaktivnim raspadom. [3]

2. Prirodna radioaktivnost

U prethodnom poglavlju je pomenuto da je radioaktivnost prisutna u prirodi. Prirodna radioaktivnost odnosno, radioaktivnost uopšteno označava spontani proces transformacije nestabilnog jezgra u stabilno, pri čemu se menja sastav jezgra ili njegovo energijsko stanje.

Istorijski gledano, radioaktivnost je poznata od 1896. godine kad je Anri Bekerel izvršio seriju eksperimenata koja ga je dovela do slučajnog otkrića da uranijumova ruda emituje zračenje nezavisno od spoljašnjih uticaja. Ovo zračenje je prvi klasifikovao Ernest Raderford koji je shodno razlikama koje je uočio između pojedinih vrsta zračenja, klasifikovao zrake na α , β i γ .

Pošto je proces radioaktivnog raspada spontan, znači da ne podleže spoljašnjim uticajima poput temperature, pritiska i slično. Jasno je da su jedini zakoni kojima se radioaktivni raspad pokorava, zakoni verovatnoće. Dakle, ne može se sasvim sigurno odrediti trenutak kada će se neko jezgro raspasti, kao što je to moguće na primer za pomračenje meseca, već se može odrediti verovatnoća dešavanja nekog radioaktivnog raspada. Zbog toga se u nuklearnoj fizici koriste posebne fizičke veličine uvedene da opišu proces radioaktivnog raspada.

Verovatnoća da će se neko jezgro raspasti u jedinici vremena, zove se *konstanta radioaktivnog raspada* i ona je karakteristika svakog jezgra pojedinačno. Eksperimentalno se može izraziti kao:

$$\lambda = \frac{\left[\frac{\Delta N}{\Delta t}\right]}{N} \quad (2.1)$$

gde je N ukupan broj radioaktivnih jezgara u posmatranom uzorku u početnom trenutku, a ΔN broj jezgara koji se raspao u trenutku Δt .

Preko konstante radioaktivnog raspada može se definisati vreme života nestabilnog jezgra i to relacijom:

$$\tau = \frac{1}{\lambda} \quad (2.2)$$

Obzirom da radioaktivni raspad podleže zakonima verovatnoće, bilo je teško doći do zakona koji bi važio za sva nestabilna jezgra i opisao spontan proces njihovog

raspada. Međutim, praćenjem dinamike velikog broja raspada, ipak je uočena određena pravilnost koja je dovoljno opšta da obuhvata sva radioaktivna jezgra. Ako je u nekom trenutku t u uzorku postojalo N radioaktivnih jezgara, broj raspada u određenom vremenskom intervalu dt je:

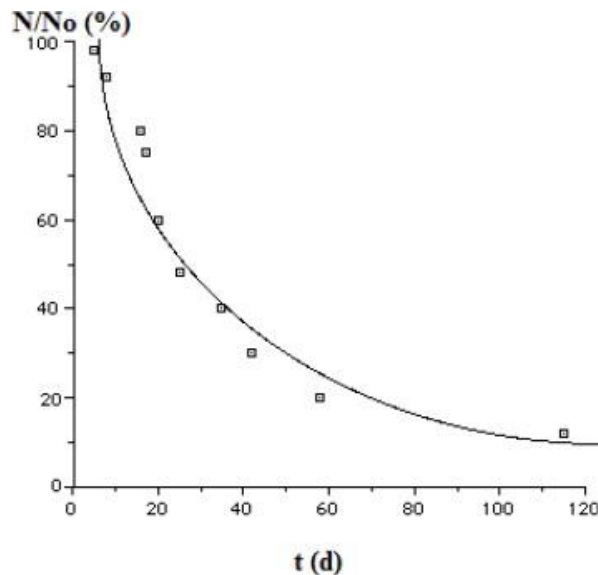
$$dN = -\lambda \cdot N \cdot dt \quad (2.3)$$

Integracijom gornje jednačine i uzimanjem u obzir početni uslov $N_{(t=0)}=N_0$, gde je N_0 broj radioaktivnih jezgara u početnom trenutku $t=0$, dobija je zakon radioaktivnog raspada.

$$\begin{aligned} \frac{dN}{N} &= -\lambda dt \\ \int_{N_0}^N \frac{dN}{N} &= \int_0^t \frac{dt}{t} \\ \ln N \Big|_{N_0}^N &= -\lambda t \Big|_0^t \end{aligned} \quad (2.4)$$

Dakle, za zakon radioaktivnog raspada se dobija:

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



Slika 2.1. Grafički prikaz zakona radioaktivnog raspada u logaritamskoj skali

Neizostavna veličina kad se govori o radioaktivnom raspadu, je svakako aktivnost uzorka. Ona se definiše kao broj jezgara koji se raspadne u jedinici vremena. Iz zakona radioaktivnog raspada, aktivnost nekog uzorka se može izraziti kao:

$$A = -\frac{dN}{dt} = \lambda N \quad (2.6)$$

Aktivnost nekog uzorka takođe opada eksponencijalno, što se može videti ukoliko jednačinu (2.6) pomnožimo konstantom radioaktivnog raspada λ :

$$A = A_0 e^{-\lambda t} \quad (2.7)$$

Vreme za koje se broj početnih jezgara smanji na polovinu naziva se vreme poluraspada $T_{1/2}$. Veza između vremena poluraspada i konstante raspada može se naći polazeći od zakona radioaktivnog raspada:

$$\begin{aligned} t &= T_{1/2} \\ N(t) &= \frac{N_0}{2} \\ N = N_0 e^{-\lambda t} &\Rightarrow \frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}} \\ \ln \frac{1}{2} &= -\lambda T_{1/2} \\ \ln 2 &= \lambda T_{1/2} \\ T_{1/2} &= \frac{\ln 2}{\lambda} \end{aligned} \quad (2.8)$$

2.1. Radioaktivni nizovi

Radioaktivna jezgra se mogu podeliti na prirodna i veštačka. Prirodna jezgra su prisutna u prirodi i tu se spontano dešava njihov radioaktivni raspad, dok su veštačka jezgra stvorena laboratorijski. Prirodna radioaktivna jezgra mogu biti:

- primordijalnog porekla – nastaju raspadom tri radionuklida čije je vreme poluraspada reda veličine postojanja Zemlje. Ovi radionuklidi velikom većinom pripadaju radioaktivnim nizovima koji započinju raspadima ^{235}U , ^{238}U , i ^{232}Th . Međutim postoje i radionuklidi sa dovoljno dugim periodom poluraspada koji ne pripadaju navedenim nizovima, na primer ^{40}K .
- kosmičkog porekla – nastaju interakcijom kosmičnog zračenja sa atmosferom, a najpoznatiji su ^7Be , ^{14}C i ^3H . [6]

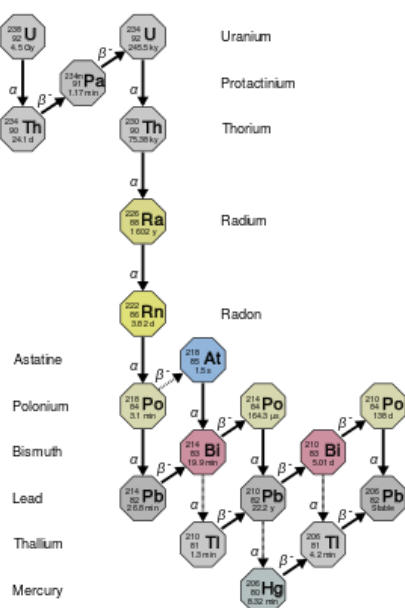
Dakle, najveći broj prirodnih radionuklida nastaje u radioaktivnim nizovima.

Postoje tri radioaktivna niza:

- uranijumov niz – započinje raspadom ^{238}U
- aktinijumov niz – započinje raspadom ^{235}U
- torijumov niz – započinje raspadom ^{232}Th .

Svaki radioaktivni niz sastoji se iz sukcesivnih raspada, pri čemu su zastupljena sva tri oblika raspada (alfa, beta i gama) i završava se stabilnim izotopom.

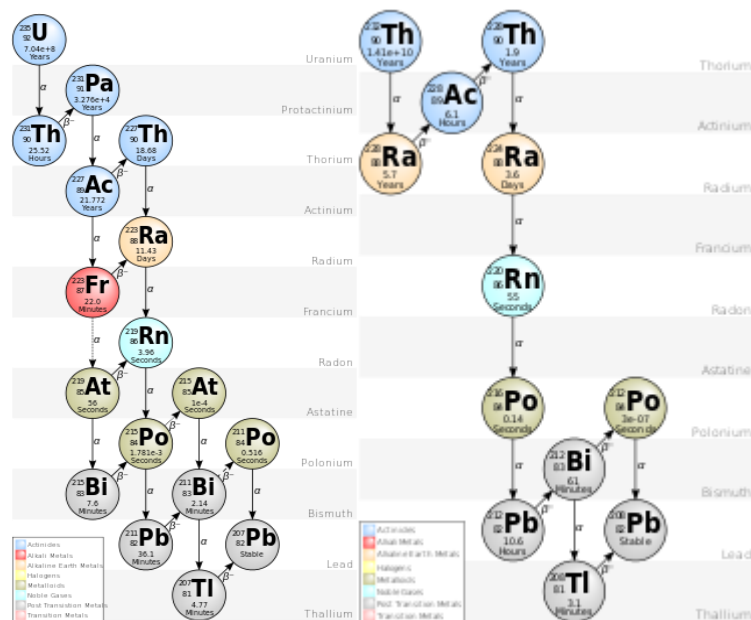
[3]



Slika 2.2. Uranijumov niz

Uranijumov niz započinje raspadom ^{238}U , pri čemu se emituje alfa čestica i nastaje nestabilno jezgro ^{234}Th , koji je takođe nestabilan i beta raspadom prelazi u nestabilni ^{234}Pa . Raspadi se nastavljaju sve dok ne nastane stabilno jezgro ^{206}Pb , kojim se ovaj niz završava. Uranijumov niz sa naznačenim oblicima raspada dat je na slici 2.2.

Aktinijumov niz započinje alfa raspadom ^{235}U , a završava se stabilnim ^{206}Pb , a torijumov započinje raspadom ^{232}Th . Oba niza prikazana su na *Slici 2.3*. (levo: aktinijumov, desno torijumov).



Slika 2.3. Aktinijumov i torijumov niz

Zaključuje se da pri svakom radioaktivnom raspadu nastaje nestabilan član niza, koji se opet raspada n puta dok ne nastane stabilan izotop. Postavlja se pitanje kako se može odrediti broj atoma N , period poluraspada $T_{1/2}$ ili konstanta raspada λ bilo kojeg člana ovakvog niza. To se jednostavno može rešiti razmatranjem sledećeg slučaja:

$$N_1 \rightarrow N_2 \rightarrow N_3 \quad (2.9)$$

Transformacija (2.8) predstavlja radioaktivni niz od tri člana, gde se član N_1 naziva predak, a N_2 potomak, pri čemu se predak raspada konstantom poluraspada λ_1 , a potomak konstantom poluraspada λ_2 . Ovakav radioaktivni proces može se opisati sa tri diferencijalne jednačine u sledećem obliku:

$$\frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 N_1 \quad (2.10)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = -\lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 \quad (2.11)$$

$$\frac{dN_3}{dt} = -\lambda_2 N_2 \quad (2.12)$$

Rešavanjem jednačine (2.10) dobija se broj atoma drugog člana u

radioaktivnom nizu. Treba napomenuti da je broj atoma prvog člana dat zakonom radioaktivnog raspada (2.4), to jest, ako se isti uvrsti u (2.10), dobija se partikularni integral ove jednačine i on glasi:

$$N_2(t) = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{01} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) + N_{02} e^{-\lambda_2 t} \quad (2.13)$$

Jednačina (2.12) daje zavisnost broja atoma potomka nastalih raspadom njegovog pretka, od vremena. Ako se vrednost N_2 iz jednačine (2.12) uvrsti u diferencijalnu jednačinu (2.11) i ova reši, dobija se broj atoma poslednjeg člana niza koji je stabilan. Ovo rešenje glasi:

$$N_3(t) = N_{03} + N_{02} (1 - e^{-\lambda_2 t}) + N_{01} \left(1 - \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{-\lambda_1 t} + \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{-\lambda_2 t} \right) \quad (2.14)$$

U prethodnom slučaju razmatran je radioaktivni niz od tri člana. Ovakvo se razmatranje može primeniti i na radioaktivni niz od n članova, pa se proces opisuje sa n diferencijalnih jednačina, pri čemu se dolazi do broja jezgara koji se raspadne u jedinici vremena, svakog člana ponaosob. [4]

3. Radon

Obzirom na to da je radioaktivnost prisutna u prirodi, ona ima uticaja na živi svet koji tamo obitava, pa samim tim i na čoveka. Ljudi su svakodnevno izloženi zračenju koje potiče od izvora prisutnih u prirodi. Ovakvi izvori se najčešće nalaze u sastavu stena, kamenja i samim tim je moguća njihova migracija i distribucija u životnu sredinu. Poznavanje količine radionuklida koji se nalaze u sastavu životne sredine je od značaja za nauku. Visoka geohemijska mobilnost radionuklida u životnoj sredini im omogućava da kontaminiraju one segmente životne sredine sa kojima je čovek u kontaktu. Stoga je važno znati raspodelu i koncentraciju radionuklida u sastavu životne sredine, kako bi se lakše razumeli fizički i geohemijski procesi, koji dovode do prisustva zračenja u prirodi. [5]

Kao što je prethodno navedeno, prirodna radioaktivnost potiče uglavnom od raspada tri radioaktivna niza, odnosno njihovih članova, koji su odgovorni za gotovo celokupnu količinu zračenja u životnoj sredini. Dakle, nema načina da se izbegne prisustvo prirodnih radionuklida, jer prisutni su u sastavu tla, još od geološke formacije planete Zemlje. [5]

Jedan od sveprisutnih izvora radioaktivnosti u prirodi je radon. To je gas bez boje, mirisa i ukusa. Najviše doprinosi ukupnoj dozi zračenja koju primi stanovnik nekog geografskog područja, posmatrano za neki vremenski period. Naziv radon potiče od njegovog pretka, radijuma, čijim raspadom nastaje ovaj gas. Najznačajniji izotop radona je ^{222}Rn koji predstavlja alfa emiter sa periodom poluraspada 3.825 dana, a vreme polueliminacije iz pluća u slučaju inhalacije je 30 minuta. [11] Produkt je radijumovog raspada (^{226}Ra) koji ulazi u sastav primordijalnog uranijumovog niza (^{238}U). U daljem izlaganju pod terminom „radon“ podrazumevaće se ovaj izotop.

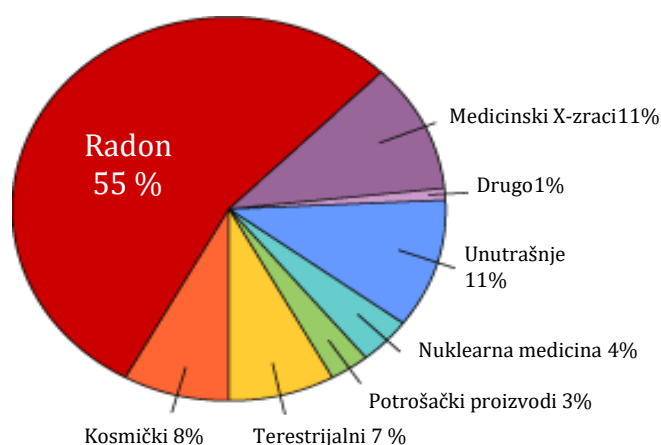


Radon je za razliku od ostalih plemenitih gasova radioaktivan i toksičan, ali je inertan, tj. ne učestvuje u hemijskim reakcijama sa drugim plemenitim gasovima ali difunduje sa gasovitom i tečnom fazom. Brzo migrira kroz pore u Zemljinoj kori, što znači da je široko rasprostranjen, što ga i čini jednim od najzastupljenijih izvora prirodne radioaktivnosti. ^{222}Rn i ^{220}Rn imaju primenu u zaštiti životne sredine. [7]

3.1. Pokretljivost radona

3.1.1. Izvori radona

Najzastupljeniji izvori ovog radioaktivnog alfa emitera u stanju gasa jesu stene u sastavu zemljišta, a njegova visoka geološka mobilnost omogućuje kontaminaciju podzemnih voda, kao i vode za piće iz dubokih izvora, tako da se i sve podzemne vode širom planete Zemlje smatraju izvorom radona – ^{222}Rn . Radon se proizvodi direktno raspadom radijuma koji se dešava najčešće u mineralima i odgovoran je za oko polovinu doze zračenja koju primi celokupno stanovništvo širom planete. [8, 9] Studije ukazuju na to da se radon oslobađa prvenstveno iz zemljišta i da oko 10% ekshalira u atmosferu.



Slika 3.1. Radon kao dominantan kontaminant životne sredine [14, 15]

Distribucija radona unutar Zemljine kore zavisi od mnogo faktora, kao što su inicijalna distribucija uranijuma u zemljištu, temperatura tla, pukotine tla, granulacija, poroznost, vlažnost, kao i površinski vetrovi. [5] Migracije radona uslovljavaju povećane koncentracije ovog gasa na pojedinim delovima unutar Zemljine kore, kao što su rudnici, izvorišta podzemne vode i slično.[10] Glavni izvori radona merenog u zatvorenim prostorijama su građevinski materijali od kojih su prostorije napravljene, ako se govori o nadzemnim objektima. U slučaju samih izvorišta radona (rudnici, rasedi, pukotine), to su stene koje ta izvorišta čine. Signifikantno manja količina radona može nastati i nekim industrijskim aktivnostima poput sagorevanja uglja, sagorevanja gasa u domaćinstvima, kao i upotrebom nekih pesticida. [5]

3.1.2. Migracija – difuzija i advekcija

Koncentracija radona u zemljištu je oko 10^3 puta veća nego u atmosferi, što nam omogućava definisanje gradijenta koncentracije između zemljišta i vazduha u zatvorenoj prostoriji (indoor air). Gradijent se stalno održava zahvaljujući proizvodnji potomaka iz uranijumovog i torijumovog niza i odgovoran je za kontinualan fluks radonovih izotopa.

Primarni mehanizam transporta (migracije) radona u nekom medijumu pre nego što se raspadne, dešava se putem kretanja molekula, sa izraženom tendencijom kretanja atoma radona u pravcu opadanja gradijenta koncentracije. Koeficijent koji povezuje ove parametre naziva se difuzioni koeficijent D_e i izražava se u jedinicama m^2s^{-1} . Prema Fikovom zakonu¹ difuzivna gustina fluksa aktivnosti radona po jedinici pore izražava se kao:

$$Jd = -D_e \nabla C \quad (3.2)$$

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

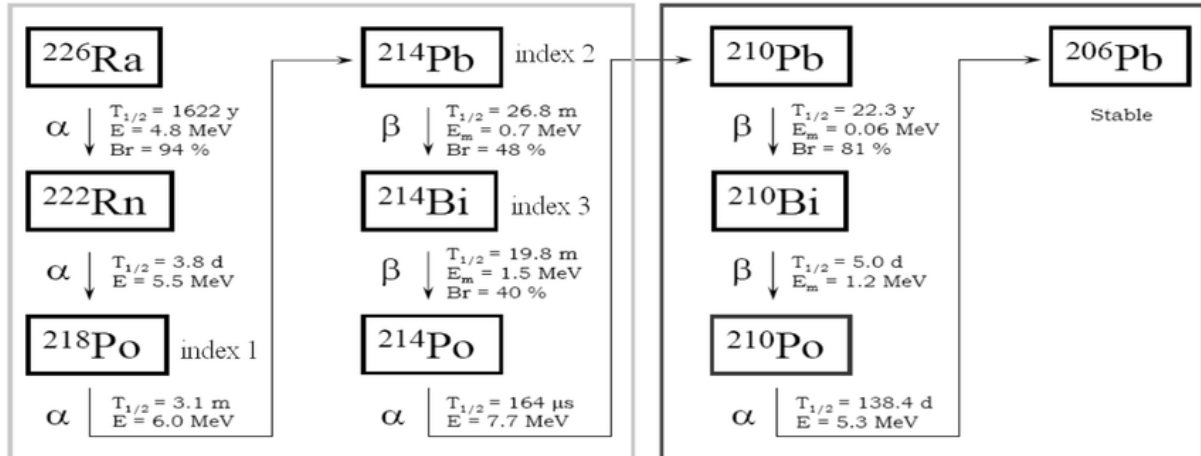
Oko 90% radona koji putem difuzije napušta mesto radonskog izvora će se raspasti nakon pređenih 5 m u vodi, 2 m u peskovitom zemljištu i oko 5 m u vazduhu. [8]

Još jedan od načina transporta je advekcija. Ona se javlja kad postoji gradijent pritiska u fluidima koji se prostiru kroz pore i pukotine u zemljištu. Ukoliko fluid ima dovoljno malu vrednost Rejnoldsovog broja, što je slučaj kod transporta radona kroz zemljište ili građevinski materijal, može se uspostaviti laminaran tok usled postojanja gradijenta pritiska. Gradijent pritiska se javlja prvenstveno zbog promene u meteorološkim uslovima, što ponekad značajno utiče na koncentraciju radona na određenom lokalitetu.

¹ Fikov zakon glasi: Fluks difuzije nekog fluida, proporcionalan je negativnom gradijentu koncentracije tog fluida. [17]

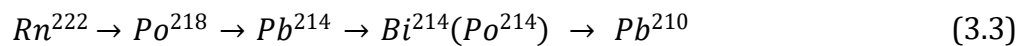
3.1.3. Raspad radona na kratkoživeće potomke

Značajno je pokazati i raspad ^{222}Rn na njegove kratkoživeće potomke, jer time je ilustrovan proces postizanja ravnoteže. Posmatramo šemu:



Slika 3.2. Šema raspada ^{222}Rn

Zbog male verovatnoće raspada preko ^{210}Tl ova grana se može zanemariti. ^{210}Pb ima veliko vreme poluraspada i zbog procesa taloženja ne može se nagomilati u atmosferi u većim količinama. Zbog kratkog vremena poluraspada ^{214}Po je uvek u ravnoteži sa svojim prethodnikom ^{214}Bi , tako da je predstavljenu šemu moguće uprostiti: [12]



Prikaz raspada ^{222}Rn na njegove kratkoživeće potomke je signifikantan u pogledu postizanja stabilnosti. Takođe je vrlo značajno poznavati potomke radonovog raspada, kao i njihove karakteristike, jer svaki od njih poseduje različitu energiju, samim tim i različit domet, što se različito odražava u pogledu detekcije alfa čestica radonskog porekla. [5] Važno je znati prodornu moć i domet alfa čestica kako samog radona tako i njegovih kratkoživećih potomaka koji se emituju tokom raspada radona, kao i rezidualnih jezgara koja uzmiču usled emisije alfa čestice.

3.2. Radon u zemljištu – korelacija sa seizmičnošću

Definicija zemljotresa je precizno navedena u uvodnom delu rada, no podsećanja radi, rećićemo da se zemljotresom smatra prirodna katastrofa koja nastaje tektonskim pomeranjem litosfernih ploča. Ovakva katastrofa dugi niz godina predstavlja pretnju ljudskom rodu uzrokujući ogromne materijalne štete i gubitke života. Da bi redukovali ove štetne efekte i uopšte da bi se približili fenomenu zemljotresa, naučnici širom sveta proučavaju moguće prekursore zemljotresa, poput faktora geofizičkog, geohemijskog, litosfernog porekla, kao i ponašanje životinja, varijacije podzemnih voda, elektromagnetne promene u jonosferi it d. [18]

Mnogo pažnje u ovim studijama privukli su geohemijski faktori poput radona, metana, helijuma koji emaniraju iz zemljišta i geotermalnih izvora. Kontinuiran monitoring koncentracije radona u hidrotermalnim sistemima ili kao podzemnog gasa, je posebno interesantan metod za određivanje uzročnih signala zemljotresa. Ogromne varijacije koncentracije radona dolaze od različitih uzročnika i one se zovu anomalije. [18] Anomalije se manifestuju kao ogromne devijacije od normalne stope emanacije radona na mestima observacije. Anomalije koje nastaju usled tektonskih pomeranja litosfernih ploča mogu obezbediti odgovarajući prekursorski signal.

Deo radon gasa ostaje u zemljištu, odnosno svom izvorištu, dok ostatak radon gasa migrira usled prethodno opisanih procesa. Tektonska pomeranja koja se dešavaju tokom faze preparacije zemljotresa uzrokuju promene u pritisku koji delovi Zemljine kore vrše jedni na druge, kao i promene u protoku prisutnih fluida, što dovodi do transformacija u pogledu mase posmatranog zemljišta. Ove promene dovode do transporta gasova iz dubine Zemlje sve do njene površine i delova bliskih površini. Postoji nekoliko in-situ kao i laboratorijskih istraživanja koji potvrđuju ovakvo tvrđenje. Nakon ovakve spoznaje, razvijen je matematički formalizam koji bi sredio rezultate o promenama radonske koncentracije u zemljištu i doveo do smislenih zaključaka.

Bilo kako bilo, mehanizmi i uzroci radonskih anomalija na pojavu zemljotresa, još uvek nisu u potpunosti ispitani.

Prve matematičke formulacije koje povezuju magnitudu zemljotresa sa maksimalnom udaljenošću od epicentra, gde je zabeležena radonska anomalija, dao je Dobrovoljski 1979. Relacija daje vezu između maksimalne distance D_m izražene u km i magnitude M . [18]

$$D_M = 10^{0.43M}, M \geq 3 \quad (3.4)$$

Kasnije, 1981. i 1985. Flajšer i Mogro Kampero su modifikovali ovu relaciju: [18]

$$\begin{aligned} D_M &= 10^{0.48M}, & M \geq 3 \\ D_M &= \frac{10^{0.81M}}{16.6}, & M \geq 3 \end{aligned} \quad (3.5)$$

1980. godine Sultanhodyhajev, A. N. Dao je relaciju koja povezuje magnitudu M prekursorsko vreme T i epicentralnu razdaljinu D , koja daje maksimalno prekursorsko vreme izraženo u danima:

$$T_{sul} = \frac{10^{(0.36M \pm 0.15)}}{D}, M \geq 3 \quad (3.6)$$

$$T_{sul} = \frac{10^{(0.36M - 0.15)}}{D}, M < 3 \quad (3.7)$$

Mnogi faktori utiču na pojavu radonskih anomalija, pa tako čak i neki meteorološki faktori, poput temperature, atmosferskog pritiska, količine padavina i td, stoga se ne može uvek sa sigurnošću utvrditi da li neka radonska anomalija potiče isključivo usled tektonskih pomeranja unutar litosfere. Ponekad se dešava da su pore i pukotine unutar litosfere ispunjene radonom koji emanira u atmosferu usled promena u atmosferskom pritisku, količine padavina, ili specifičnih mehanizama koji vladaju unutar litosfere, a potpomažu emanaciju gasova. Tad pore i pukotine postaju prazne, čak i u slučaju zemljotresa i tad nije moguće predvideti ovakvu katastrofu. [20]

4. Pasivne metode detekcije radonskog signala

Metode merenja radona u cilju određivanja njegove koncentracije obuhvataju identifikaciju i brojanje nuklearnih događaja. Zasnivaju se na registraciji i detekciji naelektrisanih čestica (alfa i beta) i zračenja (gama) sa materijalom detektora. Sve metode se dele na aktivne i pasivne u zavisnosti da li se obrada rezultata vrši u toku samog procesa merenja (aktivne) ili nakon dugotrajnog izlaganja u atmosferi radona (pasivne). U oba slučaja prag registracije sa fizičke tačke gledišta predstavlja gubitak energije jonizujuće čestice potreban za kidanje određenog broja hemijskih veza u polimeru materijala detektora. Obzirom da se u ovom radu akcenat stavlja na čvrste trag detektore, koji su potkategorija pasivnih metoda, na njih će u ovom slučaju i biti obraćena posebna pažnja. Pasivne metode merenja zasnivaju se na određivanju gustine tragova alfa čestica iz raspada radona (broja tragova po jedinici površine detektora).

Pasivne metode podrazumevaju dugotrajno izlaganje detekcionog sistema atmosferi radona. Najpoznatije pasivne metode detekcije radonskog signala su:

- metoda elektreta
- metoda ugljenih filtera (kanistra)
- metoda čvrstih trag detektora.

4.1. Elektreti²

Pasivni detektor na bazi elektreta podrazumeva naelektrisan teflonski disk koji ima dvojaku ulogu: kao izvor elektrostatičkog polja i kao senzor. Alfa događaji uzrokuju jonizaciju vazduha na kativnoj površini detektora kao i konstanto smanjenje naelektrisanja na elektretu. Za kvantifikaciju radonske koncentracije prati se promena napona elektreta. [23] Elektreti su pasivni i relativno jeftini detektori. Mana im je što zahtevaju prisustvo spoljašnjeg električnog polja, kao i posebne uslove poput vlažnosti atmosfere i kondenzacije unutar detektorske zapremine. [25]

² Elektreti su materijali koji nakon određenog tretmana zadržavaju električnu polarizaciju i nakon prestanka dejstva spoljašnjeg električnog polja. [24]

4.2. Metoda ugljenih filtera

Naziv ugljeni filter odnosi se na aktivan ugalj zatvoren u metalno kućište koji poseduje zaštitu od mehaničkih oštećenja i mogućnost hermetičkog zatvaranja. Ovo je jedna pasivna i relativno jeftina i brza metoda. Pasivnost metode se ogleda u dugotrajnom izlaganju detektora radonskoj atmosferi i činjenici da na mestu uzorkovanja nema potrebe za bilo kakvim izvorom energije. Metoda je jeftina zbog mogućnosti višestruke upotrebe istih filtera. Najskuplji deo opreme predstavljaju gama spektrometri neophodni za merenje izloženih filtera. [27]

Osnovni deo ugljenog filtera je aktivan ugalj koji se koristi zbog visokog afiniteta prema radonu. Adsorpciju radona na uglju je predložio još Raderford 1906. a ubrzo se razvila upotreba metode jer se pokazala kao dosta efikasna. Princip kalibracije ugljenih filtera, kao i konstrukcija filtera, princip merenja koncentracije radona, gama spektrometrijski sistem, detaljno su opisani u EPA metodi. [26]

4.3. Trag detektori

Jedna od pasivnih metoda merenja koncentracije radona jeste metoda čvrstih nuklearnih trag detektora. Detaljnije o čvrstim nuklearnim trag detektorima biće rečeno u sledećem poglavlju, a na ovom mestu, više pažnje biće posvećeno njihovom istorijskom razvoju.

Istorija nuklearnih trag detektora počinje 1958. godine kada je Young, otkrio da ako se LiF kristal dovede u kontakt sa uranskom folijom i ozrači termalnim neutronima, stvoriće se tragovi nakon tretmana agresivnim rastvorom hidrokksida. Broj tragova pokazao je potpunu korelaciju sa procenjenim brojem fisionih produkata iz uranske folije koji su uzmakli u kristalu. [28] Godinu dana kasnije Silk i Barnes su izveli zapažanje o oštećenju liskunskih pločica koristeći transmisioni elektronski mikroskop upoređujući tragove sa vlasima ljudske kose.

Temeljnija istraživanja ovog efekta započeli su Fleischer, Price i Walker tokom ranih 1960-ih. Proširili su tehniku nagrizanja izloženih kristala, koristeći druge materijale poput stakla, plastike i različitih mineralnih kristala. [29]

Rane studije pokazale su da su nagriženi tragovi:

- Proizvedeni samo teškim jonizujućim česticama (alfa česticama uslučaju plastike i fisionih produkata u slučaju kristala)
- Proizvedeni samo u električnim izolatorima i čistim poluprovodnicima
- Stabilni i kad se izlože velikim dozama X zračenja, beta čestica i UV zračenja.

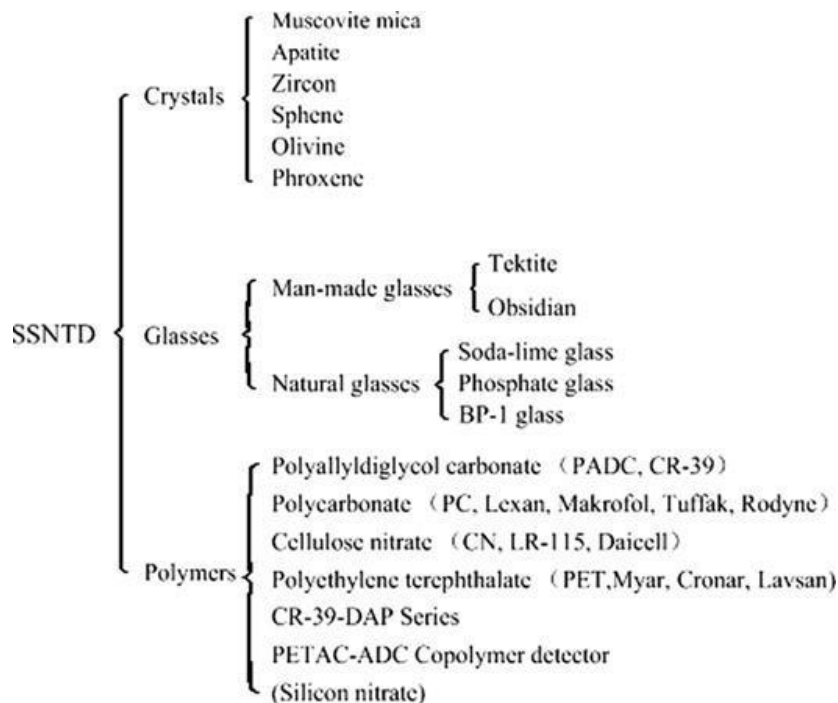
Kasnije je pokazano da visoke doze ovih zračenja menjaju karakteristike nuklearnih trag detektora. Ovim istraživanjima započeo je razvoj ove naučne oblasti i publikovan je veliki broj radova i nekoliko knjiga na tu temu.

Primena ove tehnike se u praksi zasniva na detekciji alfa čestica iz raspada radona i njegovih potomaka u dielektričnom detektoru. Prolazeći kroz čvrstu neprovodnu sredinu, teške naelektrisane čestice proizvode defekte (tragove) u kristalnoj strukturi. Ti defekti se razlikuju od nečistoća i nepravilnosti u dielektričnom materijalu i oni se nakon određenog hemijskog tretmana mogu videti optičkim mikroskopom. [28]

5. Čvrsti nuklearni trag detektori (SSNTD)

Čvrsti nuklearni trag detektori (SSNTD – *Solid State Nuclear Track Detector*) su poseban tip detektora radioaktivnog zračenja, koji daju informaciju o koncentraciji teških naelektrisanih čestica ($Z > 1$) na mestu observacije. [30]

Važno je istaći osnovni princip rada čvrstih trag detektora koji se zasniva na detekciji alfa čestica iz raspada radona i njegovih potomaka u dielektričnom detektoru. Prolazeći kroz čvrstu neprovodnu sredinu, teške naelektrisane čestice proizvode defekte (tragove) u kristalnoj strukturi. Osim dielektričnih materijala, i drugi materijali mogu biti korišteni u ove svrhe.



Slika 5.1. Materijali koji mogu biti korišteni kao čvrsti trag detektori

5.1. CR-39

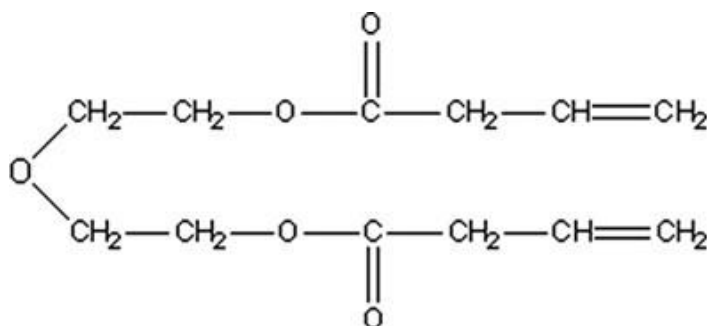
Alil diglikol karbonat (komercijalni naziv – CR-39= Colombia Resign #39) je jedinstven detektor, vrlo visoke rezolucije. Ubraja se u čvrste nuklearne trag detektore. Konkretno, CR-39 predstavlja pločicu ili list proizveden od monomera CR-39 sa određenim količinama primesa (koje se dodaju radi uglačavanja same površine detektora, kako bi trag bio uočljiviji). Kinoshita i Price su otkrili da se kao najadekvatnija primesa može dodavati takozvani IPP (di- izopropil peroksidikarbonat). Druge alternativne primese su DOP (dioktil ftalat), koji smanjuje grubost nakon nagrizanja.



Slika 5.2. Izgled CR-39 pločica

Nakon razvoja svesti o upotrebi ovog detektora, mnoge kompanije su otpočele njegovu proizvodnju. Najuspešnije kompanije u proizvodnji CR-39 detektora su *Intercast Europe* u Italiji, *Page Molding* u Velikoj Britaniji, *American Acrylic* i *Plastics* u SAD-u, i druge. [30]

Hemijska struktura monomera CR-39 je $C_{12}H_{18}O_7$ sa molekulskom težinom 274.27 g/mol. Molekulska struktura je data na sledećoj slici:



Slika 5.3. Strukturna formula monomera CR-39

Monomer poseduje lančanu strukturu koja je generalno osetljivija na radijaciju od dugih tipova struktura, na primer, benzenovog prstena u sastavu

polikarbonata.

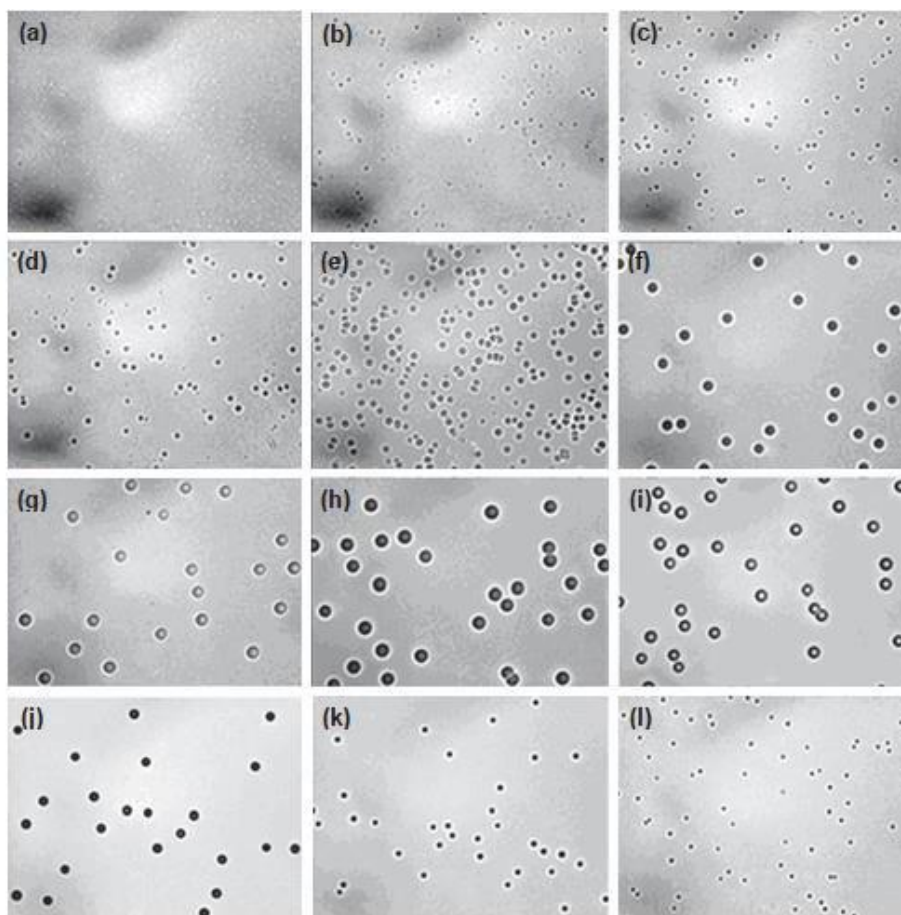
Gustina CR-39 je 1.32 g/cm^3 , indeks prelamanja mu je $n=1.504$, odnos $A/Z=1.877$, a jonizacioni potencijal je $I=70.2 \text{ eV}$.

Kako rade CR-39 detektori? Pločica beleži alfa čestice koje potiču od izvora. Prolaskom čestice kroz detektorski materijal, nastaju oštećenja, koji za nas predstavljaju tragove. Tragovi se mogu izbrojati i analizirati, kako bi se dobile informacije o zračenju koje pada na taj materijal. Ovaj efekat je posebno naglašen kod detektora sa polimerima. Osim što se sastoji od dugih molekula, detektorski materijal mora biti i dielektrik, jer ako se radi o provodnicima i poluprovodnicima, tragovi nisu stabilni, zbog procesa rekombinacije.

Teorija koja detaljno opisuje nastanak tragova u polimerima, nije u potpunosti dovršena. Opšte je prihvaćeno mišljenje da prolazak čestice kroz polimer uzrokuje kidanje dugih polimernih lanaca. Detaljan princip rada je sledeći: čestica koja padne na pločicu, prolaskom kroz materijal uzrokuje jonizaciju ili ekscitaciju u materijalu. Primarna jonizacija će pokrenuti niz hemijskih reakcija. Čestica koja pada na površinu, deluje Kulonovom silom sa drugim česticama u materijalu (elektronima i jezgrima), od kojih su najznačajnija međudelovanja koja se događaju najbliže putanji upadne čestice. Zbog mnogo veće mase alfa čestice u odnosu na druge čestice, njena putanja se može aproksimirati pravom linijom. Međutim, ako upadna čestica ima manju energiju, i međudeluje sa drugim jezgrima, njena putanja može biti značajno otklonjena u odnosu na upadni smer. Prva faza u kojoj čestica predaje energiju atomima materijala, traje kratko (reda veličine nekoliko pikosekundi), i elektroni koji se oslobađaju u tom procesu usporavaju se kroz niz jonizacija i ekscitacija, u kojima će nastati dodatni slobodni elektroni. Ako neki od njih imaju dovoljno veliku energiju, oni će se udaljiti od mesta nastanka i tako stvoriti delta zrake. Dakle, duž putanje posmatrane alfa čestice, nastaje hemijski reaktivno područje sa slobodnim elektronima i slobodnim radikalima koje se naziva latentni trag. [32]

Ako se materijal sa latentnim tragovima izloži hemijski agresivnim rastvorima (NaOH, KOH), hemijska reakcija će biti intenzivnija duž latentnog traga. Takvi bazni rastvori će većom brzinom prodirati duž latentnog traga što će uklanjati površinske slojeve detektora. Ovaj proces uklanjanja površinskog sloja detektora i povećanja oštećenih područja, naziva se nagrivanje. Nagrivanjem će od latentnih tragova nastati

stvarni tragovi na detektoru koji su vidljivi pod optičkim mikroskopom. [32]



Slika 5.4. Izgled tragova detekcije protona na CR-39 detektoru: (a) 20, (b) 40, (c) 60, (d) 80, (e) 100, (f) 220, (g) 320, (h) 420, (i) 520, (j) 620, (k) 820 keV, (l) 1.2 MeV, nagrizanih u rastvoru NaOH koncentracije 6 mol/L, na 70°C, 9 sati.

Minimalna detektibilna energija je 20keV [31]

Detektor CR-39 osim energije alfa čestica koje detektuje, može da snimi broj alfa događaja (broj tragova), poziciju (koordinate) tragova, smer (azimutni ugao, zenitni ugao), naelektrisanje, i masu, zahvaljujući parametrima tragova. Ovaj detektor je najrasprostranjeniji čvrsti detektor. [30]

5.2. Detekcija alfa čestica CR-39 detektorom

Osim alfa čestica, CR-39 detektor ima sposobnost da vidi i protone, nege egzotične elementarne čestice, da se u skladu s tim primenjuje u astrofizici, fizici materijala (moguće je videti neke defekte u kristalnoj strukturi monomera), i td. Ovde će primarno biti razmatrana detekcija alfa događaja pomoću pomenutog detektora. Alfa čestice su teška jezgra He koja poseduju kinetičku energiju. Nastaju raspadom izotopa radijuma koji je predek radona, pokazano u jednačini (3.1). Široka je primena detekcije alfa čestica, a jedna od najznačajnijih je u pronalaženju prekursorskog signala (povećane koncentracije radona) u cilju predikcije seizmičkih aktivnosti.

Detekcija alfa čestica (radona) predstavlja odista široko rasprostranjen naučni trend jer je relativno jeftina (sve što je potrebno je jedan CR-39 detektor, optički mikroskop, rastvor za nagrizanje kao i hemikalije), a obezbeđuje vrlo relevantne rezultate primenjive u nauci i životu. [30]

Zašto CR-39? Upravo zbog toga jer je najosetljiviji, zbog toga i najpopularniji za snimanje alfa čestica. Posедуje jako širok opseg energija u pogledu osetljivosti – od 0.1 do 20 MeV. Još jedna od ogromnih prednosti je činjenica da ispitivani uzorak ne utiče na rezultat detekcije. To znači da CR-39 može biti primenjen za gasovite, tečne i čvrste uzorke, što ga čini idealnim u pronalaženju prekursorskog signala u cilju predikcije zemljotresa.

5.2.1. Merenje intenziteta alfa čestica

Intenzitet alfa čestice definisan je kao broj alfa čestica emitovanih od strane izvora u jedinici vremena. Izvori alfa čestica mogu se naći u prirodi u sva tri agregatna stanja. Postoje i takozvani veštački izvori alfa čestica, koji se najčešće koriste u laboratorijama. Radon u zemljištu, vodi i atmosferi, predstavlja gasni izvor emisije alfa čestica. Kao takav, pogodan je za detekciju pomoću CR-39 metode.

Postoje dve metode merenja intenziteta alfa čestice pomoću CR-39 detektora:

- Metoda malih prostornih uglova
- 2π geometrijska merenja

Metoda malih prostornih uglova daje najtačnija merenja intenziteta alfa čestica. Zasnovana je na sledećem principu: izvor alfa čestica i površina detektora CR-39 su postavljeni jedan nasuprot drugom, tako da su im površine paralelne i da se nalaze na zajedničkoj osi, na međusobnoj udaljenosti 10-30 cm. Izvor i detektor se nalaze u vakuumskoj cevi. Dok je poklopac na detektorskoj površini otvoren, snimanje je u toku. Jednom kad se zatvori poklopac, snimanje prestaje. Disk detektora se potom nagriza u rastvoru NaOH i događaji se broje pod mikroskopom. Intenzitet izvora alfa čestica može se izračunati pomoću jednačine:

$$I = \frac{N_T}{g\epsilon t} \quad (5.1)$$

gde je N_T broj događaja na CR-39 disku, t je vreme ekspozicije izraženo u sekundama, g je faktor koji zavisi od geometrije detektorskog sistema, a ϵ je efikasnost detektora.

2π geometrijsko merenje je jednostavna metoda određivanja intenziteta alfa čestica koje potiču od čvrstih izvora. Ova merenja su relativna, dakle vrše se u odnosu na već poznatu referentnu vrednost intenziteta. Dakle, potreban je standardan izvor alfa zračenja u obliku ravne površine, čiji standardan intenzitet treba odrediti. Kad znamo standardan intenzitet, standardni izvor se prekriva CR-39 detektorom (odatle 2π geometrijska merenja) i tako prekriven se ostavi neko vreme. Nakon nagrivanja, takvog detektora u rastvoru NaOH, broje se alfa događaji pod mikroskopom. Nakon toga nepoznat alfa emiter se prekriva istim detektorom i tako prekriven stoji isto vreme, kao i standard. Na isti način se prebrojavaju događaji. I dobija se da je intenzitet nepoznatog izvora dat sa:

$$I = \frac{N_T t_s}{N_{T_s} t} I_s \quad (5.2)$$

gde su N_T, N_{T_s} broj događaja na CR-39 disku, i broj događaja na standardnom disku, respektivno, a t_s i t vremena ekspozicije uzorka i standarda. I_s je intenzitet standarda.
[31]

6. Sistematika eksperimentalnih merenja

U ovom poglavlju odabrani su reprezentativni eksperimentalni rezultati kontinuiranog praćenja koncentracije radona na različitim lokacijama širom sveta. Praćenje koncentracije vršeno je mahom upotrebom čvrstih nuklearnih trag detektora CR-39 uz izuztno dug period vršenja eksperimentalnih merenja, kako bi se izveli i dobili rezultati potencijalnih korelacija povećane koncentracije radona u zemljitu i zemljotresa. Cilj ovog poglavlja je da pokaže da je metoda detekcije radonskog signala validna, pouzdana i da je u skladu sa današnjim naučnim dostignućima i mogućnostima. Važno je takođe pokazati da je metoda pogodna za kontinuirano praćenje koncentracije radona u zemljištu i to korelisati sa seizmičkim aktivnostima na lokacijama na kojima su vršena merenja.

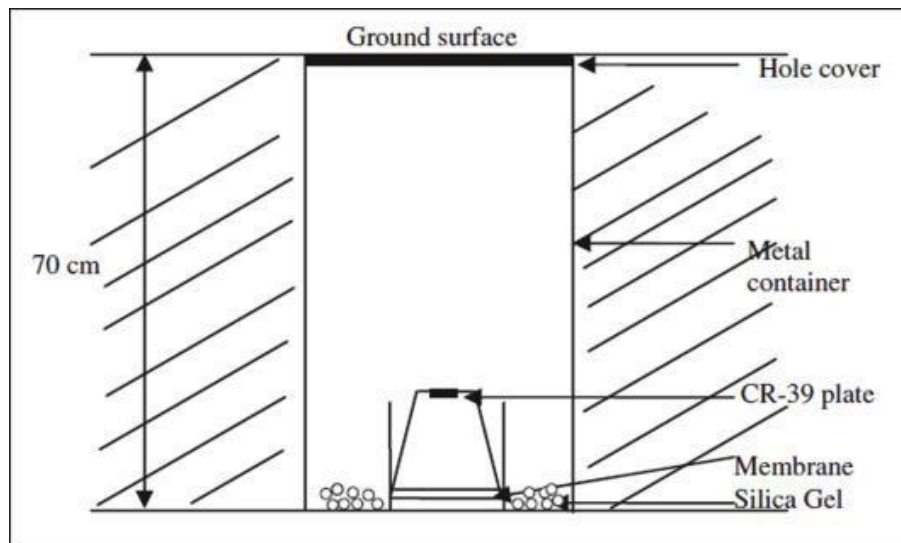
Reprezentativni rezultati su preuzeti iz naučnih radova. Precizno će biti naveden svaki rad, njegovi autori, kao i cilj rada, te dobijeni rezultati.

6.1. Monitoring of soil radon by SSNTD in Eastern India in search of possible earthquake precursors [18]

U ovom radu praćena je koncentracija radona u zemljištu na dve lokacije u okolini univerzitetskog kampusa Jadavpur u gradu Kolkata u Indiji s ciljem pronalaženja potencijalne veze između radonskih anomalija i zemljotresa koji su česti u radijusu od nekoliko stotina kilometara od lokacija merenja. Merenja su vršena kontinuirano, dakle u periodu od avgusta 2012. do decembra 2013. godine. Za praćenje koncentracije korištena je metoda čvrstih trag detektora CR-39, kao i relacije (3.5) i (3.6) koje daju vezu između maksimalne udaljenosti lokacije merenja od epicentra i magnitude.

Za detekciju radona korištena je tanka kvadratna pločica CR-39 dimenzija 1cm x 1 cm. Pločica je pre postavljanja na željenu lokaciju zaštićena da bi se smanjio uticaj spoljašnjih faktora. Zaštita se sastoji od membrane sačinjene od lateksa, koja je permeabilna za radon, dok drugi elementi poput kratkoživećih radonovih

potomaka koji nemaju značajan uticaj na formiranje tragova, ne mogu da prođu kroz membranu. Takođe, na ovakav detektorski sistem, primenjena je spoljnjia zaštita u vidu plastične čaše unutar koje je smeštena sama pločica. Ovakavom vidu zaštite pribegava se radi smanjenja uticaja meteoroloških faktora na praćenje koncentracije radona. Radi smanjenja vlage u okolini tačke merenja, koristi se silika gel koji je dobar adsorbent vlage koja utiče na migraciju radona, stoga je pogodan za dobijanje tačnijih rezultata. Pločica detektora obavijena membranom i pričvršćena



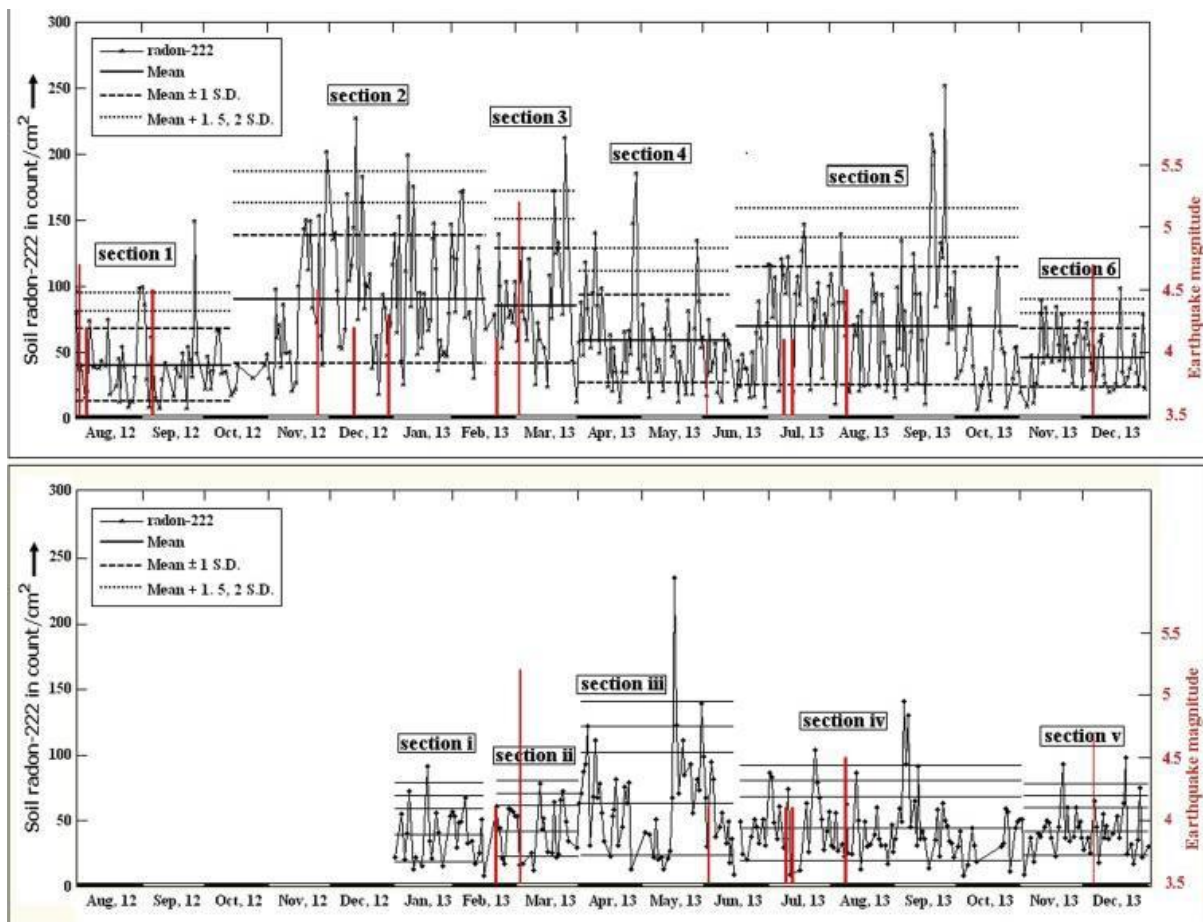
za plastičnu čašu, pokriva se metalnim cilindrom i tako podešen detektorski sistem ukopava se u zemljište na dubinu od oko 70 cm.

Slika 6.1. Izgled detektorskog sistema

Nakon predviđenog vremena ekspozicije, menja se pločica (najčešće je to period od 24 časa). Tokom vremena ekspozicije, alfa čestice emitovane od strane radona iz zemljišta ostavljaju latentne tragove na pločici, nakon čega se pribegava procesu nagrivanja u 6 M rastvoru KOH, pri određenim uslovima. Nakon ovog procesa, dobijeni su pravi tragovi, čijim se prebrajanjem pod optičkim mikroskopom došlo do koncentracije radona na lokaciji merenja.

Dobijena koncentracija radona na dve lokacije (lokacija A i lokacija B), izražena u odbroj/cm², prikazana je na *Slici 6.2*.

Na prvom grafiku prikazane su fluktuacije koncentracije radona na lokaciji A u navedenom periodu, dok su na drugom grafiku prikazane fluktuacije radonske koncentracije na lokaciji B u nešto kraćem vremenskom intervalu. Jasno se očitava značajnije povećanje koncentracije na lokaciji A u periodu od novembra 2012. pa sve do marta 2013, kao i u septembru 2013. Na lokaciji B, došlo je do povećanja koncentracije u maju i julu 2013. godine.



Slika 6.2. Prikaz kontinuiranog praćenja koncentracije radona u periodu od avgusta 2012. do decembra 2013. [18]

S ciljem da se uspostavi veza između rezultata merenja koncentracije radona i barem 13 zemljotresa magnitude jače od 4.0 M, sa epicentralnom udaljenošću od lokacije merenja, koja iznosi 500 km, preuzeti su podaci o zemljotresima i magnitudama od Nacionalnog seizmološkog informacionog centra (USGS) i uvršteni u *Tabelu 1*. Odavde se vidi sledeće: zemljotresu koji se desio 6. septembra 2012. godine, prethodila je anomalija radona detektovana 4 dana pre toga. Zemljotresi numerisani sa 5 i 6 u *Tabeli 1*, takođe su usledili nakon što su snimljene dve fluktuacije u koncentraciji radona, 13 i 16 dana pre zemljotresa, respektivno.

Anomalije snimljene 4. februara 2013. na obe lokacije, predvidele su zemljotres 7 sa prekursorskim vremenom od 15 dana. Izmerena je značajna anomalija 29. maja 2013. koja je ispraćena zemljotresom magnitude 4.1, samo tri dana kasnije. Zemljotres se desio svega 11 km od tačke merenja.

Tabela 1. Detalji o zemljotresima u periodu merenja koncentracije radona [18]

| R. br. | Datum dešavanja zemljotresa | Magnituda (M) | Dubina (km) | Epicentralna udaljenost (km) | Datum snimljene Rn anomalije* | Prekursorsko vreme (dan) |
|--------|-----------------------------|---------------|-------------|------------------------------|-------------------------------|--------------------------|
| 1. | 02. avg. 2012. | 4.7 | 10 | 364 | - | - |
| 2. | 05. avg. 2012. | 4.2 | 56.8 | 428 | - | - |
| 3. | 06. sep. 2012 | 4.5 | 45 | 431 | 02. sep. 2012 (A) | 4 |
| 4. | 25. nov. 2012. | 4.5 | 15 | 344 | - | - |
| 5. | 13. dec. 2012. | 4.2 | 10 | 435 | 30. nov. 2012 (A) | 13 |
| 6. | 30. dec. 2012. | 4.3 | 22.5 | 393 | 14. dec. 2012 (A) | 16 |
| 7. | 19. feb. 2013. | 4.1 | 11.8 | 323 | 04. feb. 2013 (A,B) | 15 |
| 8. | 02. mar. 2013. | 5.2 | 38.7 | 457 | - | - |
| 9. | 01. jun 2013. | 4.1 | 10 | 65 | 29. maj 2013 (A,B) | 3 |
| 10. | 08. jul 2013. | 4.1 | 10.1 | 353 | - | - |
| 11. | 12. jul 2013. | 4.1 | 48.2 | 474 | - | - |
| 12. | 06. aug. 2013. | 4.5 | 35.88 | 84 | 23. jul 2013 (B) | - |
| 13. | 04. dec. 2013. | 4.7 | 13.6 | 464 | - | - |

*U zagradi je naznačeno na kojoj lokaciji je snimljena anomalija

6.2. Radon as an earthquake precursor [33]

U ovom radu merena je koncentracija radona upotrebom čvrstog trag detektora LR- 115, koji radi po identičnom principu kao CR-39, osim što je kao detektorska pločica upotrebljen drugačiji polimer (celuloza nitrat). Koncentracija radona praćena je u periodu od 4 godine na tri lokacije: lokacija A u Osijeku, lokacija B u Valpovu i lokacija C u Zagrebu, Hrvatska. Detektor se sastoji od pločice LR-115 dimenzija 2 cm x 3 cm koja je od spoljašnjih uticaja zaštićena filter hartijom, plastičnom čašom i fiksirana je unutar metalnog cilindra. Ovako podešen detektorski sistem ukopan je u zemljište na dubinama od 0.5 do 1 m, u zavisnosti od lokacije. Detektorska pločica menjana je jednom u sedam dana. Nakon prikupljanja latentnih tragova u periodu ekspozicije, pravi tragovi dobijeni su nagrivanjem u 10% rastvoru NaOH pri određenim uslovima, nakon čega su vizuelno prebrojani pod optičkim

mikroskopom.

Poznavajući kalibracione parametre detektorskog sistema, detektovane pozadinske alfa događaje kao i niskoenergetske detektovane čestice koje nisu od interesa za istraživanje, moguće je izvući određene zaključke.

U cilju uspostavljanja veze sa seizmičkom aktivnošću na području na kom je vršen monitoring, podaci o zemljotresima preuzeti su iz Seizmološke stanice Medvednica u Zagrebu, kao i iz baze podataka Nacionalnog seizmološkog informacionog centra (USGS). U obzir je uzet i uticaj meteoroloških faktora.

Rezultati su sledeći: zemljotresi koji su prepoznati i dovedeni u korelaciju sa povećanom koncentracijom radona su u *Tabeli 2.* označeni masnim slovima. Izvršeno je poređenje uticaja povećane koncentracije neposredno pre i nakon dešavanja zemljotresa. U obzir je uzet i uticaj meteoroloških faktora. Ustanovljena je razlika u koncentraciji radona u toku nekoliko meseci u godini i primećeno je da ukoliko je ta razlika veća od dvostruke standardne devijacije (preračunate nakon fitovanja krivih koncentracije), promena koncentracije može se smatrati radonskom anomalijom u intervalu poverenja od 95.5%. Ukoliko je povećanje koncentracije veće od jednostruke standardne devijacije, pretpostavlja se uticaj meteoroloških faktora. U razmatranjima korelacije meteoroloških parametara i povećanja radonske koncentracije, izvršena je matematička analiza kojom je uticaj meteoroloških faktora sveden na minimum.

Monitoring koncentracije radona vršen je u periodu od četiri godine, pri čemu su posmatrani i meteorološki faktori koji podrazumevaju atmosferski pritisak, količinu padavina i temperaturu vazduha. Tokom perioda merenja koncentracije radona, prikupljeni su podaci o 26 zemljotresa koji su se desili u radijusu od 70 do 330 km od mesta merenja, sa magnitudom od 2.5 do 4.5.

Izvršena je matematička analiza uticaja meteoroloških uticaja i određena je linearna jednačina višestruke regresije, pri čemu je smanjen uticaj meteoroloških faktora na povećanje koncentracije radona. Zaključeno je da se radonske anomalije mogu dovesti u prekursorsku vezu sa svakim zemljotresom magnitude veće od 3, koji se desio u radijusu manjem od 200 km od tačke posmatranja.

Tabela 2. Podaci o zemljotresima prikupljeni od strane SS Medvednica i USGS magnitude jače od 2.5 i oni koji su se desili u radijusu manjem od 330 km od mesta merenja

| R br. | Datum dešavanja zemljotresa | Magnituda (M) | Epicentralna udaljenost (km) | Lokacija | Efikasnost |
|-------|-----------------------------|---------------|------------------------------|-------------------|----------------------|
| 1. | 25. jun 1998. | 2.8 | 70 | Modriča | $8.2 \cdot 10^{-11}$ |
| 2. | 27. nov. 1998 | 2.7 | 200 | Medvednica | $2.6 \cdot 10^{-12}$ |
| 3. | 07. jul 1999. | 3.3 | 95 | Milanovac | $1.4 \cdot 10^{-10}$ |
| 4. | 12. jan. 2000. | 2.7 | 280 | Senj | $9.5 \cdot 10^{-13}$ |
| 5. | 18. feb. 2000. | 3.8 | 275 | Split | $2.7 \cdot 10^{-11}$ |
| 6. | 20. mar.2000. | 3.5 | 320 | Dubrovnik | $6.9 \cdot 10^{-12}$ |
| 7. | 16. jun 2000. | 3.8 | 200 | Zagreb | $7.0 \cdot 10^{-11}$ |
| 8. | 09. sep. 2000. | 2.8 | 300 | Zadar | $1.0 \cdot 10^{-12}$ |
| 9. | 22. sep. 2000. | 2.8 | 200 | Zagreb | $3.5 \cdot 10^{-12}$ |
| 10. | 08. okt. 2000. | 4.1 | 260 | Sinj | $7.8 \cdot 10^{-11}$ |
| 11. | 09. nov. 2000. | 4.5 | 300 | Zadar | $1.6 \cdot 10^{-10}$ |
| 12. | 28. dec. 2000. | 3.3 | 155 | Popovača | $3.3 \cdot 10^{-11}$ |
| 13. | 05. apr. 2001. | 3.5 | 320 | Dubrovnik | $6.9 \cdot 10^{-12}$ |
| 14. | 26. apr. 2001. | 3.7 | 80 | Požega | $8.1 \cdot 10^{-10}$ |
| 15. | 03. jun 2001. | 3.2 | 320 | Rijeka | $2.8 \cdot 10^{-12}$ |
| 16. | 07. jun 2001. | 2.7 | 320 | Rijeka | $6.3 \cdot 10^{-13}$ |
| 17. | 13. avg. 2001. | 2.8 | 260 | Imotski | $1.6 \cdot 10^{-12}$ |
| 18. | 29. avg. 2001. | 3.0 | 180 | Sisak | $8.7 \cdot 10^{-12}$ |
| 19. | 22. sep. 2001. | 4.1 | 300 | Senj | $5.1 \cdot 10^{-11}$ |
| 20. | 11. okt. 2001. | 2.7 | 230 | Jaska | $1.7 \cdot 10^{-12}$ |
| 21. | 25. nov. 2001. | 3.0 | 315 | Dubrovnik | $1.6 \cdot 10^{-12}$ |
| 22. | 31. dec. 2001. | 4.1 | 284 | Otočac | $6.8 \cdot 10^{-11}$ |
| 23. | 20. mar. 2002. | 3.2 | 200 | Zagreb | $1.1 \cdot 10^{-11}$ |
| 24. | 26. maj 2002. | 3.6 | 250 | Troglav | $4.8 \cdot 10^{-11}$ |
| 25. | 01. jun 2002. | 3.9 | 330 | Rijeka | $8.5 \cdot 10^{-12}$ |

6.3. Anomalous radon emission as precursor of earthquake [34]

Ovaj rad sadrži sažetak eksperimentalnih ispitivanja koncentracije radona upotrebom čvrstih trag detektora CR-39 i LR-115 i njihovu korelaciju sa seizmičkim aktivnostima na nekoliko lokacija sveta. Zahvaljujući eksperimentalnim metodama koje su upotrebljene tokom svih navedenih istraživanja, pružena je mogućnost dovođenja u vezu epicentralne udaljenosti, magnitude zemljotresa, kao i prekursorskog vremena.

6.3.1. Turska

H. Friedmann (Friedmann et. al. 1988) i njegova grupa ispitivali su koncentraciju radona u zemljištu na pet stanica u radijusu od 200 km u oblasti severne Anadolije u Turskoj. Posmatrali su ponašanje koncentracije tokom zemljotresa Biga jačine 5.7, koji se desio 5. jula 1983. i pronašli su porast koncentracije radona.

M. Inceoz (Inceoz et. al. 2006) sa svojim saradnicima upotrebio je na istom ovom geografskom području, metodu čvrstih detektora CR-39. U svojim istraživanjima zaključili su da postoji pozitivna korelacija između anomalija koje su detektovali i zemljotresa koji se desio u to vreme.

6.3.2. Meksiko

N. Segovia (Segovia et. al. 1993) zajedno sa svojim saradnicima izvršio je dugoročnu studiju koncentracije radona duž meksičke pacifičke obale pre, tokom i nakon bilo koje seizmičke aktivnosti koja se desila na tom području. Korištena je metoda CR-39. Uočena je slaba anomalija tokom zemljotresa magnitude 4.7 tokom devedesetih godina (1990-1991), međutim, nešto kasnije (1992-1994), uočena je značajna anomalija koja je dovedena u vezu sa zemljotresom jačine 5.5. Na bazi dugoročnog ispitivanja, zaključeno je da anomalije mogu da se dovedu u prekursorsku vezu sa zemljotresima koji su se desili. Takođe, Segovia je objasnio i blaga povćanja koncentracije uticajem meteoroloških faktora.

6.3.3. Tajland

Wattananikon (Wattananikorn et. al. 1998) je izvršio sistematsku studiju koncentracije radona u zemljištu u sjevernom Tajlandu u periodu od 40 nedelja. Detekcija radona je izvršena upotrebom čvrstih detektora LR-115 na dubini od 50 do 100 cm ispod površine zemlje, kako bi se što bolje detektovale promene u koncentraciji radona. U periodu dok je istraživanje trajalo, desilo se nekoliko zemljotresa, od kojih je svaki pozitivno korelisan sa detektovanom radnoskom anomalijom.

6.3.4. Kalifornija, SAD

King (King 1978, King 1980), je izvršio ispitivanje koncentracije radona u centralnoj Kaliforniji. Detektorski sistem, podrazumevao je metodu čvrstih detektora CR-39. King je ispitivao aktivnost radona na 60 različitih lokacija i našao je sukcesivne promene u koncentraciji radona, tokom dva snažna zemljotresa magnitude 4.3 i 4.0. Tokom leta 1978. uočljivo povećanje koncentracije radona pozitivno je korelisano sa zemljotresima jačine 4.0 i 4.2, koji su se desili u to vreme. Značajno je pomenuti da su američki naučnici prvi put upotreblili zaštitnu membranu na CR-39 pločici. Nakon što je ova zaštitna membrana prvi put predstavljena, pokazano je da ipak doprinosi „čistijem“ tragu na pločici, stoga se ona upotrebljava i danas.

7. Zaključak

Cilj rada je bio ispitati mogućnosti uspostavljanja pozitivne korelacije između radonskih anomalija koje su posledica spontanog procesa raspadanja atomskih jezgara iz prirodnih radioaktivnih nizova i pojave zemljotresa na mestima merenja. Pozitivna korelacija trebalo bi da se uspostavi upotrebom detekcijske metode opisane u radu.

Na osnovu priloženih rezultata iz poglavlja 6, može se zaključiti da su radonske anomalije izmerene na navedenim lokalitetima pozitivno korelisane sa većim brojem zemljotresa koji su zabeleženi od strane Nacionalnog seizmološkog informacionog centra, uz veća ili manja odstupanja u broju dana predviđanja.

Prilikom izvršavanja merenja radonskih anomalija, svuda je u obzir uzet i uticaj meteoroloških faktora poput temperatura, vlažnosti vazduha, pritiska, pri čemu se zaključuje da njihov uticaj na pojavu zemljotresa nije zanemarljiv, te je matematičkim proračunima znatno smanjen.

U većem broju slučajeva, radonske anomalije mogu se dovesti u prekursorsku vezu sa pojavom zemljotresa čija je magnituda veća od 3, a koji su se desili u radijusu manjem od 200 metara od tačke merenja.

Problem lažnih signala smanjuje pouzdanost tako da je sama metoda i dalje predmet istraživanja i stalnog ispitivanja ne samo pouzdanosti već i same funkcionalnosti. Seizmološka stručna zajednica nije uverena u pretskazivanje seizmičkih događaja jer se sama seizmologija razvila i razvija na pojavama a posteriori. Naravno, zbog ugrađenih svojstava haosa u samom zemljotresu nije moguće biti siguran koliko će se energije osloboditi u započetom procesu tako da sama haotičnost dodatno komplikuje samo razumevanje pojave pa time i mogućnost predviđanja budućih događaja.

Reference

- [1] B. A. Bolt, Earthquakes, University of California, Berkley, New York, 1999
- [2] B. A. Bolt, Earthquake and geology, Encyclopaedia Britannica, Dec. 2018
- [3] M. Krmar, Uvod u nuklearnu fiziku, Prirodno-matematički fakultet, Departman za fiziku, Novi Sad, avgust 2013
- [4] L. Marinkov, Osnovi nuklearne fizike, Prirodno-matematički fakultet, Departman za fiziku, Novi Sad, 2010
- [5] M. S. Khan, Radon: Its properties and applications, Department of Applied Physics, Aligarh Muslim University, Aligarh, India.
- [6] J. Knežević, Metode merenja ^{222}Rn u vodi, master rad, Monografska dokumentacija, 2017
- [7] J. Wiegand, A guideline for the evaluation of the soil radon potential based on geogenic and antropogenic parameters, Environmental geology, 2001
- [8] UNSCEAR, United Nations Scientific Committee on the effect of atomic radiation: Sources and effects of ionizing radiation, United Nations, New York, 2011
- [9] UNSCEAR, United Nations Scientific Committee on the effect of atomic radiation: Sources and biological effects of ionizing radiation, United Nations, New York, 1994
- [10] G. S. Gusain, G. Prasad, Y. Prasad, R. C. Ramola, Radiation measurement, 2009
- [11] S. Šipka, Metod određivanja koncentracije radona, pomoću čvrstih trag detektora CR39, Diplomski rad, Monografska dokumentacija, 2003
- [12] D. Nikezić, Radon, glavni radioaktivni kontaminant čovekove okoline, Jonizujuća zračenja iz prirode (monografija), Beograd, 1995
- [13] G. Majević, Radon – glavni kontaminant čovekove okoline, Diplomski rad, Monografska dokumentacija
- [14] <https://mrnatural.ca/services/air-testing/radon-testing-monitoring/>
- [15] [https://chem.libretexts.org/Bookshelves/General_Chemistry/A_Principles_of_Modern_Chemistry_\(Oxtoby_et_al.\)/UNIT_A_RATES_OF_CHEMICAL_AND_PHYSICAL_PROCESSES/A_Nuclear_Chemistry/A_Radiation_in_Biology_and_Medicine](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/General_Chemistry/A_Principles_of_Modern_Chemistry_(Oxtoby_et_al.)/UNIT_A_RATES_OF_CHEMICAL_AND_PHYSICAL_PROCESSES/A_Nuclear_Chemistry/A_Radiation_in_Biology_and_Medicine)

- [16] G. Vogiannis, D. Nikolopoulos, Radon sources and associated risk in terms of exposure and dose, *Front. Public Health*, 05 January 2015
- [17] https://en.wikipedia.org/wiki/DiffusionFick's_law_and_equations
- [18] A. Deb, M. Gazi, J. Ghosh, S. Chowdhury, C. Barman, Monitoring of soil radon by SSNTD in Eastern India in search of possible earthquake precursors, *Journal of environmental radioactivity*, 2018
- [19] D. Ghosh, A. Deb, R. Senegupta, Anomalous radon emission as precursor of earthquake, *Journal of Applied Geophysics*, Kolkata, India, 2009
- [20] C.Y. King, W. Zhang, B.S. King, Radon anomalies on three kinds of faults in California, *Pure Applied Geophysics*, 1993
- [21] R. Lakatoš, Primena i razvoj metoda za određivanje radona i torona u vazduhu, Doktorska disertacija, Monografska dokumentacija, 2019
- [22] Durrige Company Inc, Rad 7 Radon Detector, Owner's Manual, Bedford, 2000
- [23] Y. Ishimori, K. Lange, P. Martin, Y.S. Mayya, M. Phareuf, Measurement and Calculation of Radon Releases from NORM Residues, Technical reports series No 474, IAEA, Vienna, 2013
- [24] D. M. Petrović, S. R. Lukić-Petrović, Eksperimentalna fizika kondenzovane materije, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad, 2000
- [25] S. Usman, H. Spity, S. Lee, Analysis of electret ion chamber radon detector response to ^{222}Rn and interference from background gamma radiation, *Health Physics*, 1999
- [26] EPA, Addendum to the EERF Standard Radon-222 Measurement Using Charcoal Canisters, United States Environmental Protection Agency, 1989
- [27] M. Živanović, Optimizacija merenja koncentracije radona u zatvorenom prostoru metodom ugljenih filtera, Doktorska disertacija, Monografska dokumentacija
- [28] D. A. Young, *Nature*, 1958.
- [29] R.L. Fleischer, P.B. Pirce, R.M. Walker, *Nuclear Tracks in Solids, Principles and Applications*, University of California Press, Berkeley, 1975

- [30] S.L. Guo, B.L. Chen, Solid-State Nuclear Track Detectors, China Insitute of AtomicEnergy, Beijing, China, 2012
- [31] Duan, Xiao-Jiao, Tan, Zhi-Xin, Lan, Xiao-Fei, Huang, Yong-Sheng, Guo, Shi-Lun, Yang, Da-Wei, Xiu-Zhang, Wang, Nai-Yan, Callibration of Solid State Nuclear Track Detector CR-39 with monogeneric protons, Acta Physica Sinica, 2010
- [32] Ivković A, *Modeliranje i mjerenje neutronske doznog ekvivalenta oko medicinskih linearnih akceleratora elektrona*, Doktorski rad, Prirodoslovno-matematički fakultet, Fizički odsjek, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2019
- [33] Planinić A, Radolić V, Vuković B, Radon as an Earthquake precursor, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Septembar 2004
- [34] Ghosh D, Deb A, Sengupta R, Anomalous radon emission as a precursor of earthquake, Journal of Applied Geophysics, October 2009

8. Biografija

Dušan Dubajić rođen je 07.08.1996. u Prijedoru. Osnovnu školu i opšti smer Gimnazije „Petar Kočić“ završio je u Novom Gradu kao učenik generacije i nosilac Vukove diplome. Tokom gimnazijskog školovanja, učestvovao je na regionalnim i republičkim takmičenjima iz fizike i matematike, gde je ostvario zapažene rezultate.

Godine 2015. upisuje prvi ciklus studija na Departmanu za fiziku Prirodno-matematičkog fakulteta, Univerziteta u Novom Sadu, smer fizičar istraživač. Tokom studija bio je višegodišnji učesnik naučnih manifestacija „Noć istraživača“ i „Festival nauke“. Autor je i realizator dva naučno popularna predavanja iz oblasti astronomije i nuklearne fizike na teme „Razvoj svesti o astronomskim pojavama“ i „Manipulacija i odlaganje nuklearnog otpada“.

Dve godine je bio zaposlen na poziciji nastavnika fizike u osnovnim školama „Petefi Šandor“ u Novom Sadu i „22. avgust“ u Bukovcu, gde je zapažen po inovativnom načinu realizacije nastave fizike. Trenutno živi u Pragu gde je polaznik preparatornog kursa češkog jezika u organizaciji Karlovog univerziteta. Drugi stepen studija planira da upiše na Matematičko-fizičkom fakultetu Karlovog univerziteta u Pragu, smer profesor fizike i matematike. Tečno govori engleski i češki jezik.



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

Redni broj:

RBR

Identifikacioni broj:

IBR

Tip dokumentacije:

Monografska dokumentacija

TD

Tip zapisa:

Tekstualni štampani materijal

TZ

Vrsta rada:

Diplomski rad

VR

Autor:

Dušan Dubajić

AU

Mentori:

dr Jovana Nikolov
dr Vanja Radolić

MN

Naslov rada:

Mogućnosti predviđanja seizmičkih aktivnosti
kontinuiranim praćenjem koncentracije radona

NR

Jezik publikacije:

srpski (latinica)

JP

Jezik izvoda:

srpski/engleski

JI

Zemlja publikovanja:

Republika Srbija

ZP

Uže geografsko područje

Vojvodina

UGP:

Godina:

2022

GO

Izdavač:

Autorski reprint

IZ

Mesto i adresa:
MA Novi Sad, PMF, Departman za fiziku
Trg Dositeja Obradovića 3

Fizički opis rada:
FO Broj poglavlja/strana/tabela/slika/referenci:
9/44/2/12/34

Naučna oblast:
NO Fizika

Naučna disciplina:
ND Nuklearna fizika

Ključne reči:
KR Radon, zemljotres, detekcija, čvrsti trag detektori

Čuva se:
ČU Novi Sad, PMF, Departman za fiziku,
Trg Dositeja Obradovića 3

Važna napomena:
VN Nema

Izvod:
IZ Glavni cilj rada je pokazati valjanost metode
detekcije radona u zemljištu upotrebom čvrstih
detektora (CR-9) i pronaći pozitivnu korelaciju
sa seizmičkim aktivnostima na lokalitetima
merenja.

Datum prihvatanja teme od strane NN veća:
DP 12.08.2021.

Datum odbrane:
DO 24.02.2022.

Članovi komisije:
ČK Predsednik: Dr Nikola Jovančević, docent
Član: Dr Jovana Nikolov, vanredni profesor
Član: Dr Vanja Radolić, vanredni profesor
Član: Dr Dušan Zorica, redovni profesor

**UNIVERSITY OF NOVI SAD
FACULTY OF SCIENCE AND MATHEMATICS
DEPARTMENT OF PHYSICS
KEY WORDS DOCUMENTATION**

Accession number:

ANO

Identification number:

INO

Document type:

Monograph publication

DT

Type of records:

Textual material printed

TR

Contents code:

Diploma thesis

CC

Author:

Dušan Dubajić

AU

Menthor(s):

dr Jovana Nikolov
dr Vanja Radolić

MN

Title:

Possibilities of prediction seismic activity by
continuous monitoring of radon concentration

TI

Language of text:

Serbian

LT

Language of abstract:

Serbian/English

LA

Country of publication:

Republic of Serbia

CP

Locality of publication:

Vojvodina

LP

Publication year:

2022

PY

Publisher:

Author's reprint

PU

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

Physical description: 9/44/2/12/34
PD

Scientific field: Physics
SF

Scientific discipline: Nuclear physics
SD

Subject/key words: Radon, earthquakes, detection, solid state nuclear
SKW track detectors

Holding data: Novi Sad, Faculty of Science and Mathematics,
HD Department of Physics
Trg Dositeja Obradovića 4

Note: No
N

Abstract: In this thesis, an attempt is made to argue the fact
AB that the method of radon detection in the soil using
SSNTD (CR-39) can show a positive correlation
with the occurrence of seismic activity at
measurement sites.

Accepted by the Scientific board on: 12.08.2021.
ASB

Defended: 24.02.2022.
DE

Thesis defending board: President: PhD Nikola Jovančević, docent
DB Member: PhD Jovana Nikolov, associate professor
Member: PhD Vanja Radolić, associate professor
Member: PhD Dušan Zorica, full professor