

Radon kao prekursor potresa

Mesarek, Anamaria

Undergraduate thesis / Završni rad

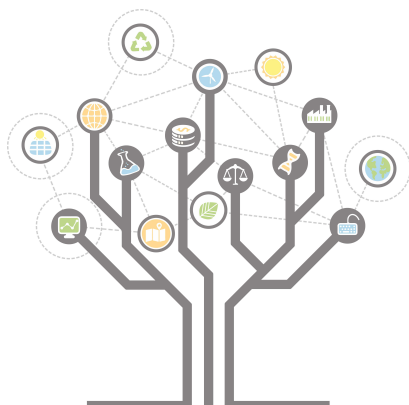
2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Geotechnical Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:130:133435>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-25**



Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Geotechnical Engineering - Theses and Dissertations](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GEOTEHNIČKI FAKULTET

ANAMARIA MESAREK

RADON KAO PREKURSOR POTRESA

ZAVRŠNI RAD

VARAŽDIN, 2020.

Sazivam članove ispitnog povjerenstva za
_____u _____ sati.

Obranu ovog rada kandidat će vršiti i pred ispitnim
povjerenstvom u Varaždinu.

Varaždin, _____.

Predsjednik ispitnog
povjerenstva:
Izv.prof.dr.sc. Igor Petrović

Članovi povjerenstva

- | | | |
|----|---|-------|
| 1) | Izv. prof. dr. sc. Anita Ptiček Siročić | _____ |
| 2) | Dr. sc. Davor Stanko | _____ |
| 3) | Izv. prof. dr. sc. Nikola Sakač | _____ |

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GEOTENIČKI FAKULTET

ZAVRŠNI RAD

RADON KAO PREKURSOR POTRESA

KANDIDAT:

ANAMARIA MESAREK

MENTOR:

izv. prof. dr. sc. ANITA PTIČEK SIROČIĆ

KOMENTOR: dr. sc. DAVOR STANKO

VARAŽDIN, 2020.



Sveučilište u Zagrebu
Geotehnički fakultet



ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Pristupnica: ANAMARIA MESAREK

Matični broj: 2770 - 2017./2018.

NASLOV ZAVRŠNOG RADA:

RADON KAO PREKURSOR POTRESA

Rad treba sadržati: 1. Uvod

2. Radon

3. Potresi

4. Radon kao prekursor potresa

5. Primjeri – anomalije radona i potresi

6. Zaključak

Pristupnica je dužna predati mentoru jedan uvezen primjerak završnog rada sa sažetkom. Vrijeme izrade završnog rada je od 45 do 90 dana.

Zadatak zadan: 18.03.2020.

Rok predaje: 03.07.2020.

Mentor:

Izv.prof.dr.sc. Anita Ptiček Siročić

Drugi mentor/komentor:

Dr.sc. Davor Stanko

Predsjednik Odbora za nastavu:

Izv.prof.dr.sc. Igor Petrović



IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je završni rad pod naslovom:

Radon kao prekursor potresa

rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na istraživanjima te objavljenoj i citiranoj literaturi te je izrađen pod mentorstvom izv. prof. dr. sc. Anite Ptiček Siročić i komentorstvom dr. sc. Davora Stanka.

Izjavljujem da nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, odnosno da je prepisan iz necitiranog rada te da nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem također, da nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

U Varaždinu, 25.6.2020.

Anamaria Mesarek

(Ime i prezime)

Mesarek

(Vlastoručni potpis)

IZJAVA MENTORA O POSTOTKU SLIČNOSTI ZAVRŠNOG RADA S VEĆ OBJAVLJENIM RADOVIMA

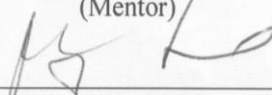
Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je završni rad pod naslovom:

Radon kao prekursor potresa

pregledan anti-plagijat programskim paketom PlagScan te da postotak sličnosti cjelovitog završnog rada, s već objavljenim radovima, ne prelazi 20%, kao i da pojedinačni postotak sličnosti završnog rada sa svakom literaturnom referencom pojedinačno ne prelazi 5%.

U Varaždinu, 25.6.2020.

izv. prof. dr. sc. Anita Ptíček Siročić
(Mentor)


(Vlastoručni potpis)

SAŽETAK

Radon (^{222}Rn) je prirodni plemeniti plin koji nastaje radioaktivnim raspadom elementa radija i nalazi se posvuda u Zemljinoj kori. Nevidljiv je plin, bez okusa i mirisa, pokretljiv, a na njega vrlo malo utječu kemijski procesi pa često može poslužiti za potencijalno predviđanje potresa. Zbog tih svojstava teže ga je uočiti i otkriti te se za njegovu detekciju i određivanje koncentracije koriste specifični uređaji. Koncentracije radona u tlu i podzemnim vodama veće su uz aktivne rasjede. Anomalije koncentracije radona moguće je uočiti nekoliko tjedana ili čak nekoliko mjeseci neposredno prije potresa.

Potencijalno predviđanje potresa temelji se na promatranju prekursorskih pojava, no teško je povezati potres s bilo kojim prekursorom. Tijekom mjerenja anomalija hlapljenja helija, radona, vodika i ugljičnog dioksida u nekim područjima svijeta, koja su sklona potresima, radon je od svih plinova najlakše otkriveno pa se smatra najpoželjnijim potencijalnim prekursorom potresa. Anomalije radona, tj. povećane koncentracije radona, prije potresa bile su uočene u Japanu, Italiji, Tajvanu, Sloveniji i Indiji.

Anomalije koncentracija radona prije potresa ukazuju da se mjerenje radona može smatrati kao potencijalni prekursor potresa, ali još uvijek nije utvrđena točna povezanost anomalija radona sa seizmičkim aktivnostima.

Ključne riječi: radon, koncentracije radona, potresi, prekursori potresi, anomalije radona

ABSTRACT

Radon (^{222}Rn) is a natural noble gas formed by the radioactive decay of the element radium and it is found everywhere in the Earth's crust. Radon is an invisible gas which is tasteless, odourless and mobile. Since it is barely affected by chemical processes, it can be often used for potential earthquake prediction. Due to these properties, radon is difficult to detect and specific devices are used for its detection and concentration. Radon concentrations in soil and groundwater are higher along active faults and radon concentration abnormalities can be observed several weeks or even months before an earthquake.

A potential earthquake prediction is based on the observation of precursor phenomena, but it is difficult to relate an earthquake to any of them. During the measurement of evaporation anomalies of helium, radon, hydrogen and carbon dioxide in some areas of the world that are prone to earthquakes, of all gases radon is the easiest to detect and it is considered the most desirable potential earthquake precursor. Radon anomalies, i.e. increased radon concentrations, were observed in the following countries before an earthquake: Japan, Italy, Taiwan, Slovenia and India.

Radon anomalies before an earthquake indicate that radon measurement can be considered a potential earthquake precursor, but the exact association of radon anomalies with seismic activity has not been established yet.

Keywords: Radon, radon concentrations, earthquakes, earthquake precursors, radon anomalies

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. RADON.....	2
2.1. Radioaktivnost	2
2.1.1 α – raspad	3
2.1.2. β – raspad.....	4
2.1.3. Elektronski uhvat	5
2.1.4. γ - raspad	5
2.2. Zakon radioaktivnog raspada.....	6
2.3. Svojstva radona	8
2.4. Izvori radona	12
2.5. Mjerenje koncentracije radona.....	13
3. POTRESI	18
3.1. Uzroci i mjesto nastanka potresa	18
3.2. Seizmički valovi.....	19
3.3. Mjera potresa: intenzitet i magnituda.....	21
4. RADON KAO PREKURSOR POTRESA.....	25
4.1. Prekursori potresa.....	25
4.2. Anomalije radona	25
4.3. Oblici anomalije radona	26
4.4. Podrijetlo anomalija i predviđanje potresa	27
5. PRIMJERI – ANOMALIJE RADONA I POTRESI	30
5.1. Japan.....	30
5.2. Tajvan.....	32
5.4. Slovenija	36
5.5. Italija.....	38
5.6. L'Aquila (Italija).....	40
6. ZAKLJUČAK.....	42
7. LITERATURA	42
8. POPIS SLIKA.....	48
9. POPIS TABLICA	49

1. UVOD

Potresi se ne mogu predvidjeti, no njihovo potencijalno predviđanje temelji se na promatranju prekursora. Dugi niz godina pokušava se uspostaviti veza radona i potresa za mogućnost predviđanja potresa. Samostalno praćenje koncentracije radona još uvijek nije pouzdana metoda kod predviđanja potresa, no postupnim mjerenjem koncentracija radona u vodi ili u tlu razna su istraživanja pokazala da se visoka koncentracija radona može povezati s tektonskim poremećajima u Zemljinoj kori. Jedno od istraživanja u kojem se samostalno pratila koncentracija radona bilo je i u talijanskom gradu L'Aquila [1].

Radon (^{222}Rn) je prirodni plemeniti plin koji nastaje zbog radioaktivnog raspada elementa radija i nalazi se posvuda u Zemljinoj kori [2]. U Zemljinoj kori nalazi se uranij-238 (^{238}U) čijim raspadom nastaje radij (^{226}Ra), a alfa raspadom radija nastaje radon, koji zbog velike pokretljivosti izlazi iz stijena i tla, izbija na površinu Zemlje i odlazi u atmosferu. Radon je jedini izotop s dugim vremenom poluraspada od $t_{1/2} = 3,82$ dana i zbog toga može prijeći velike udaljenosti prije nego dođe do raspada i sakupljanja u povećanim koncentracijama u tlu, zraku ili vodi [2]. Radon, radij i dva druga prirodna izotopa, aktinon i toron, prisutni su u bilo kojem procesu stvaranja stijena u tlu, podzemlju i u atmosferi. Imaju kratko vrijeme poluraspada pa njihov doprinos nije od velike važnosti kod predviđanja potresa. Radon je nevidljiv plin, bez okusa i mirisa pa je za njegovo detektiranje i mjerenje potrebna posebna oprema. Na radon vrlo malo utječu kemijski procesi pa često može poslužiti za potencijalno predviđanje potresa. Razlog tome je velika pokretljivost radona, visoka prirodna koncentracija i prilično niske cijene opreme za praćenje koncentracije radona. Praćenje koncentracije radona se u većini slučajeva provodi u podzemnim vodama, bunarima ili zemnom plinu, a u počecima je mjeren i na površini tla. Jedno od važnijih razloga zašto se radon koristi kao prekursor potresa je to da se prvenstveno primjenjuje zbog svoje raspodjele u tlu i vodi što je povezano s geološkom strukturom, lomom i prirodom stijena [1]. Iako neki rezultati istraživanja impliciraju da postoji veza između promjena koncentracija radona i potresa, zbog složenosti prijenosnih mehanizama njihovu povezanost potrebno je jasno utvrditi [1].

Stoga, cilj ovog rada bio je prikazati na koji je način moguće potencijalno predviđanje potresa pomoću radona kao prekursora, koji se u zraku, tlu i podzemlju nalazi u koncentracijama većim od uobičajenih.

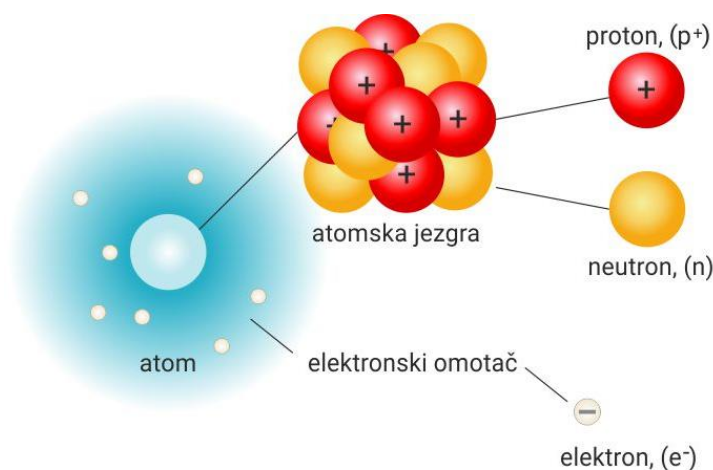
2. RADON

2.1. Radioaktivnost

Radioaktivnost ili radioaktivni raspad je prirodni i spontani proces u kojem se atom nekog elementa raspada ili razgrađuje, tvoreći drugi element pri čemu gubi čestice atoma. Zračenja koja nastaju raspadom elementa zovu se radioaktivna zračenja [3].

Prilikom radioaktivnosti dolazi do spontanog emitiranja alfa-čestica i beta-čestica iz tvari. Radioaktivnost je često uzrokovana i emisijom gama-elektromagnetskih valova prilikom čega kemijski element prelazi iz jednog u drugi te se oslobađa energija [4].

Svaki atom sastoji se od jezgre koja se nalazi u središtu i negativno nabijenih elektrona koji kruže oko jezgre (Slika 1.). Jezgra je sastavljena od pozitivno nabijenih protona i neutralnih neutrona koje zajedno drže privlačne nuklearne, odnosno jake sile. Atom sadrži jednak broj elektrona i protona te je zbog toga električno neutralan. Atomski broj je ujedno i protonski i redni broj nekog atoma protona pomoću kojeg su određena kemijska svojstva elemenata. Atomi koji imaju veliki atomski broj su nestabilni i zbog toga dolazi do njihovog raspada. Broj protona i neutrona kod lakših atoma većinom je jednak, a kod težih atoma se razlikuje. Atomi koji imaju jednak broj protona, a različit broj neutrona nazivaju se izotopi. Zbog promjena u jezgri, dolazi do promjene broja protona i neutrona prilikom čega jezgre ispuštaju radioaktivne alfa-čestice, beta-čestice i gama-zrake [5].



Slika 1. Građa atoma [6]

Jezgre koje su radioaktivne nazivaju se radionuklidima, a emitirane čestice (alfa, beta) zovu se radioaktivna zračenja. Radioaktivno zračenje je ionizirajuće pa dolazi do

izbijanja elektrona iz atoma molekula te u tvarima nastaju pozitivno i negativno nabijene čestice [7].

2.1.1 α -raspad

Jedan od radioaktivnih raspada je α -raspad čija nestabilna atomska jezgra, nastala prirodno ili umjetno, može emitirati γ -zračenje i čestice poput elektrona ili pozitrona praćeni neutronima te jezgre helija (α -zračenje). α -čestice su pozitivne jezgre elementa helija, ${}^4_2\text{He}$. Zbog promjene atomske jezgre dolazi do α -raspada prilikom čega jezgra emitira α -česticu, točnije jezgru helija. Maseni broj se smanjuje za 4, a atomski za 2.

Primjerice kod α -raspada ${}^{238}_{92}\text{U}$ nastaju ${}^{234}_{90}\text{Th}$ i α -čestica:

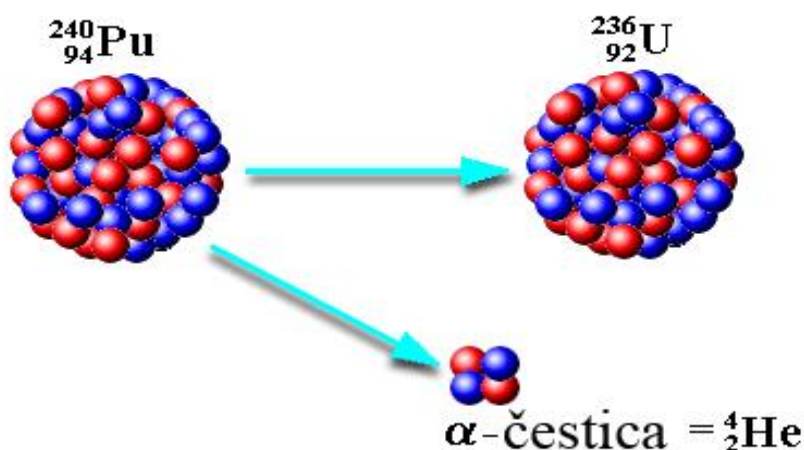


α -raspadom broj protona u jezgri određuje kemijski element pa uran nakon emisije α -čestice postaje drugi kemijski element, torij.

Općenito, nuklearna reakcija radioaktivnog α -raspada nuklida može se zapisati:



Kod procesa α -radioaktivnosti ili α -raspada dolazi do spontanog emitiranja dvaju protona i dvaju neutrona u obliku jezgre ${}^4_2\text{He}$ (Slika 2.) [8].



Slika 2. α -raspad [9]

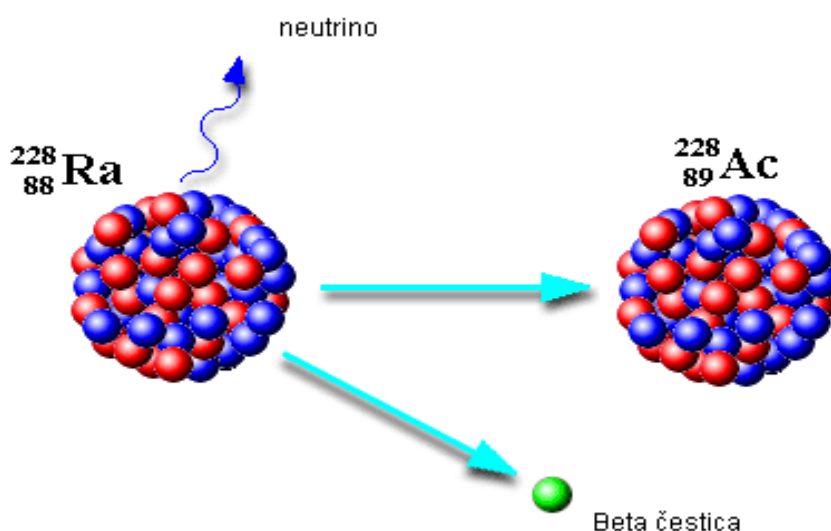
α -čestice su velikih dimenzija i mase, nose dvostruki pozitivan naboj i u zraku imaju domet veličine nekoliko centimetara. α -radioaktivni izvori ne predstavljaju veliku

opasnost poput vanjskih radioaktivnih izvora, no prilikom ulaska u ljudsko tkivo mogu uzrokovati velika oštećenja zbog velike energije i velike snage ionizacije [7].

2.1.2. β -raspad

β -raspadom dolazi do spontane promjene jezgre prilikom čega dolazi do emisije, odnosno apsorpcije elektrona ili pozitrona te antineutrina ili neutrina. Neutrini su subatomske čestice koje su slične elektronu. Nemaju električni naboj i imaju malu masu koja može biti jednaka nuli. Antineutrini su čestice neutrina koje nemaju električni naboj i imaju malu masu [8, 10, 11].

Prilikom β -raspada maseni broj se ne mijenja, već se redni broj atoma promijeni za jedan i dolazi do pretvorbe jednog neutrona u jedan proton ili obrnuto (Slika 3.). Jezgre kod kojih dolazi do spontane promjene u njihovoj građi nazivaju se β -radioaktivnim jezgrama [9].



Slika 3. β -raspad [9]

Postoje β^- i β^+ raspad. β^- raspad je emisija elektrona iz jezgre, a β^+ emisija pozitrona iz jezgre. U prirodnim radioaktivnim nizovima, β^- raspadu, jedan neutron u jezgri se raspada na elektron, antineutrino i proton, a atomski broj tj. broj protona se povećava za jedan.

β^- raspad se može zapisati kao:



Primjerice, β -raspadom ^{234}Th nastaju ^{234}Pa , β^- -čestica i antineutrino:



Kod umjetno izazvane radioaktivnosti može doći i do β^+ raspada, tj. emisije pozitrona i neutrina pri čemu maseni broj atoma ostaje isti, a atomski broj se smanji za jedan. Uzrok raspada pozitrona je raspad protona. β^+ raspad općenito se može zapisati kao:



Primjer β^+ raspada:



Pozitron koji nastaje prilikom ovog raspada ima jednaku masu kao i elektron, ali mu je električni naboj suprotan, tj. jednak je naboju protona [8, 9].

2.1.3. Elektronski uhvat

Elektronski uhvat je jedna vrsta β -zračenja, a nastaje kada jezgra zahvati jedan elektron unutrašnje ljuske atoma u atomskoj jezgri te dolazi do pretvorbe protona u neutron i neutrino [12].



Primjer elektronskog uhvata:

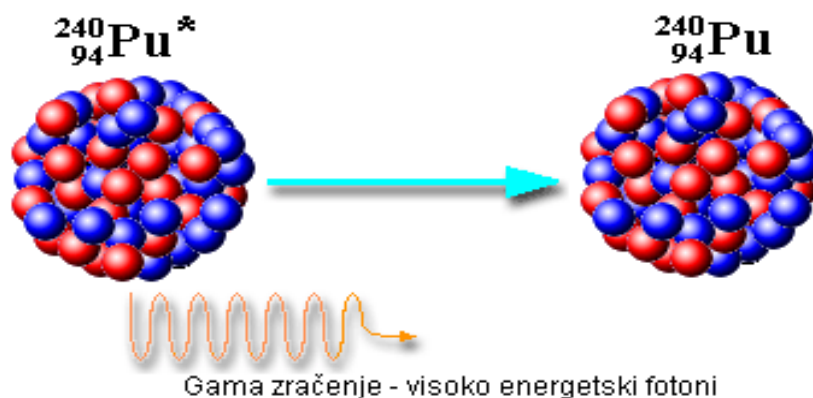


Udaljeni elektroni popunjavaju ispražnjena mjesta prilikom kojeg se emitira rendgensko zračenje [8].

2.1.4. γ -raspad

Elektromagnetsko zračenje visoke frekvencije koje emitiraju atomske jezgre zove se γ -zračenje. Proces kod kojeg atomske jezgre emitiraju γ -zračenje naziva se radioaktivnim γ -raspadom (Slika 4.). Do γ -radioaktivnosti dolazi prilikom prijelaza stanja više pobuđenosti atomske jezgre u stanje niže pobuđenosti ili u osnovno stanje [9].





Slika 4. Slika 4. γ -raspad [9]

γ -zračenje je jako prodorno zračenje zbog svoje velike energije te može oštetiti elektronske omotače atoma i molekula. Prilikom γ -raspada maseni broj i redni broj jezgre se ne mijenja. γ -zračenje je opasno kao vanjski i unutarnji izvor zračenja. Zračenja mogu putovati dugo u ljudskom tkivu, prilikom čega ne izazivaju velika oštećenja, ali mogu uzrokovati oštećenja unutarnjih organa [9].

2.2. Zakon radioaktivnog raspada

Zakon radioaktivnog raspada opisuje koliko će se radioaktivnih atomskih jezgara raspasti u nekom uzorku radioaktivne tvari u određenom vremenskom intervalu [8].

Prema zakonu radioaktivnog raspada, konstanta raspada predstavlja prosječnu vjerojatnost raspadanja nuklida po vremenu. Uzima se vjerojatnost raspadanja po nuklidu tako da se ta vjerojatnost množi s brojem prisutnih nuklida da bi se dobila brzina emisije čestica. Matematički se to može izraziti:

$$-\frac{dN}{dt} \propto N \quad (10)$$

$$\frac{dN}{N} = -\lambda N \quad (11)$$

pri čemu N predstavlja broj radioaktivnih nuklida prisutnih u vremenu t [8].

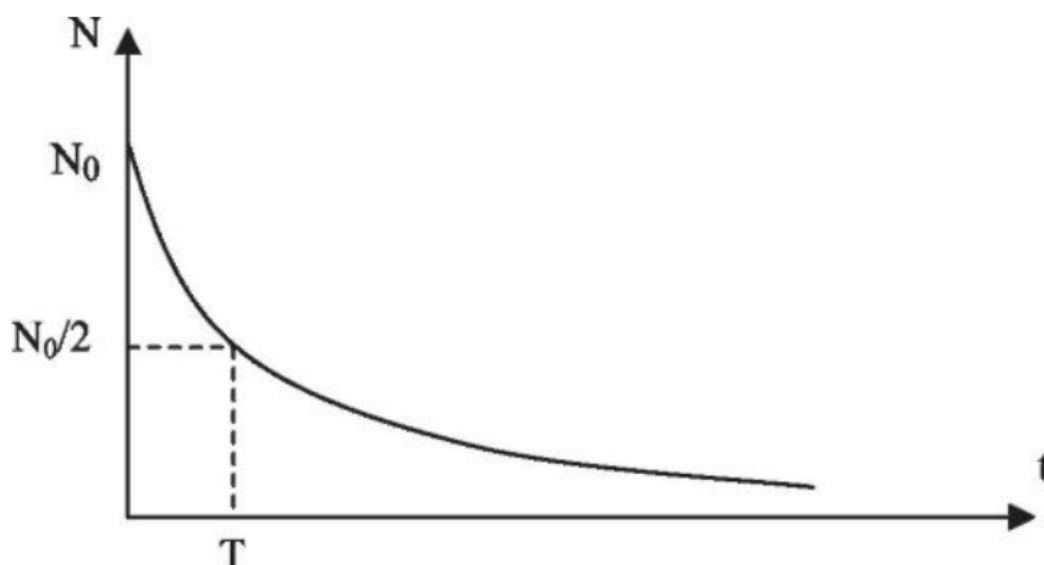
Kako je promjena dN broja atoma proporcionalna broju atoma nekog radioaktivnih nuklida N i vremenu dt uz pretpostavljenu konstantnu raspada, jednačbe (10) i (11) mogu se zapisati kao jedna:

$$dN = -\lambda N dt \quad (12)$$

Za pretpostaviti je da u nekom početnom trenutku $t = 0$ postoji N_0 prisutnih neraspadnutih nuklida čiji se broj nakon nekog vremena smanji. Tada se dobiva jednačba zakona radioaktivnog raspada:

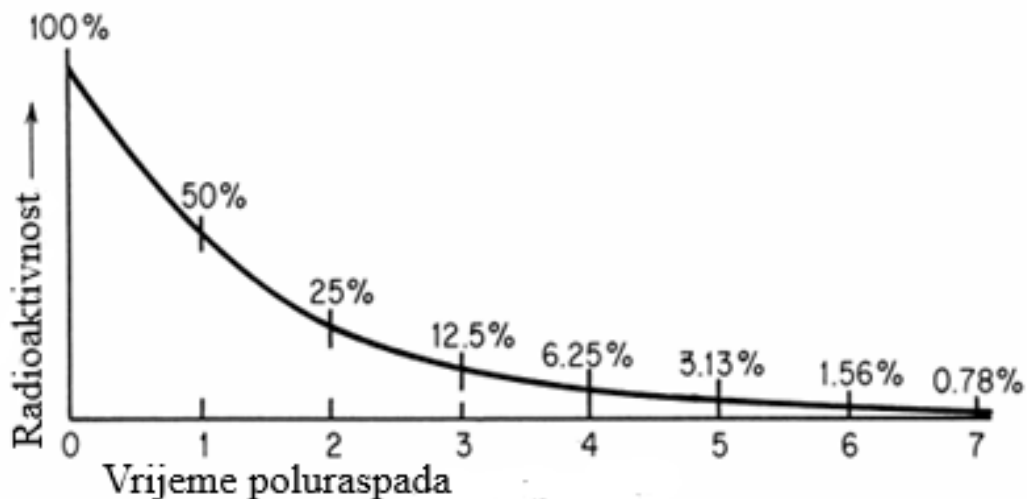
$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (13)$$

Jednačba zakona radioaktivnog raspada zapisana je u eksponencijalnom obliku jednačbe (13). Broj neraspadnutih jezgri nekog radioaktivnog elementa eksplicitno se smanjuje s vremenom (Slika 5.). λ je konstanta raspada koja je karakteristična za pojedini nuklid. Konstanta raspada je različita za različite jezgre i vrste raspada, a jedinica u kojoj se mjeri je s^{-1} . Ako je konstanta raspada veća, tada se nuklid brže raspada, a ako je manja, dolazi do sporijeg raspada nuklida [8, 13].



Slika 5. Graf funkcije radioaktivnog raspada [14]

Vrijeme poluraspada ($t_{1/2}$) je konstanta raspada. Vrijeme poluraspada radionuklida je vrijeme potrebno da se raspadne polovica nestabilnih atomskih jezgara. Nakon poluraspada 50 % početne aktivnosti ostaje. Nakon dva poluraspada ostaje 25 % početne aktivnosti, dok nakon tri poluživota ostaje 12,5 %, itd. (Slika 6.).



Slika 6. Odnos vremena poluraspada [15]

Vrijeme poluraspada može se izračunati pomoću jednadžbe:

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda} \quad (14)$$

Recipročna vrijednost konstante raspada $\tau = \frac{1}{\lambda}$ naziva se srednjim vremenom života nekog radioaktivnog elementa. $\frac{1}{\lambda}$ može se definirati kao prosječno vrijeme između raspadanja i srednjeg vremena života i po vrijednosti se ne razlikuje od vremena poluraspada. Jednadžba raspada se tada može zapisati kao:

$$N = N_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (15)$$

Vrijeme poluraspada za različite nuklide kreće se u rasponu manjem od $10^{-6} s$ sve do $10^{10} god$. Vrijeme poluraspada radionuklida zapravo je definirano kao razdoblje u kojem dolazi do raspada polovice početnog broja radioaktivnih jezgri. Mjerna jedinica za radioaktivnost materijala je bekerel (Bq), koja označava količinu raspada u jednoj sekundi ($1Bq = 1 \text{ raspad} / 1 \text{ sekunda}$) [15].

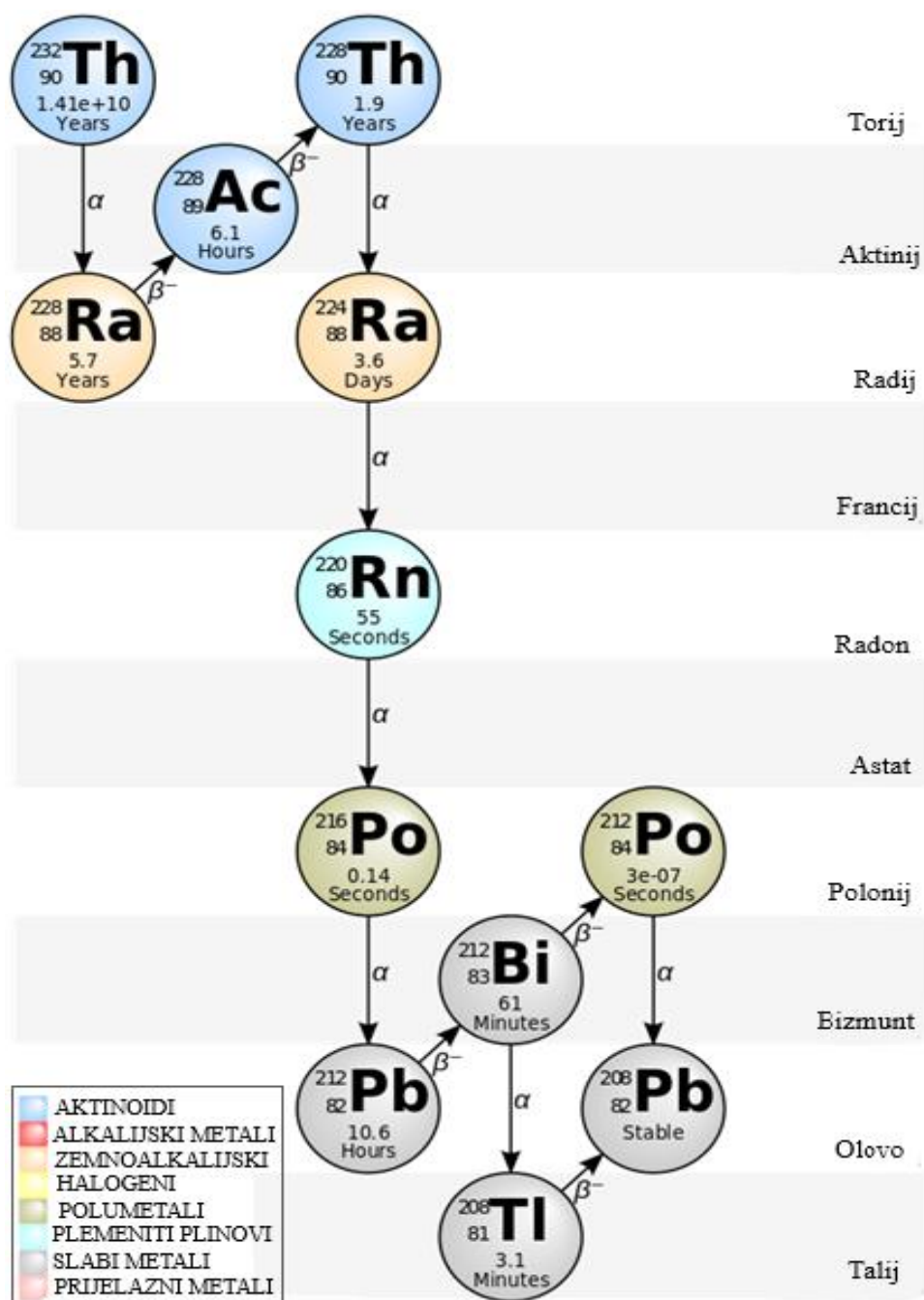
2.3. Svojstva radona

Radon je kemijski element atomskog ili rednog broja 86 i atomske mase 222. Radon nastaje raspadom radija (^{226}Ra) koji je inertan, radioaktivni plin, bez boje, mirisa, okusa i nevidljiv. Vrelište radona je -71°C , a talište -62°C . Pri sobnoj temperaturi je

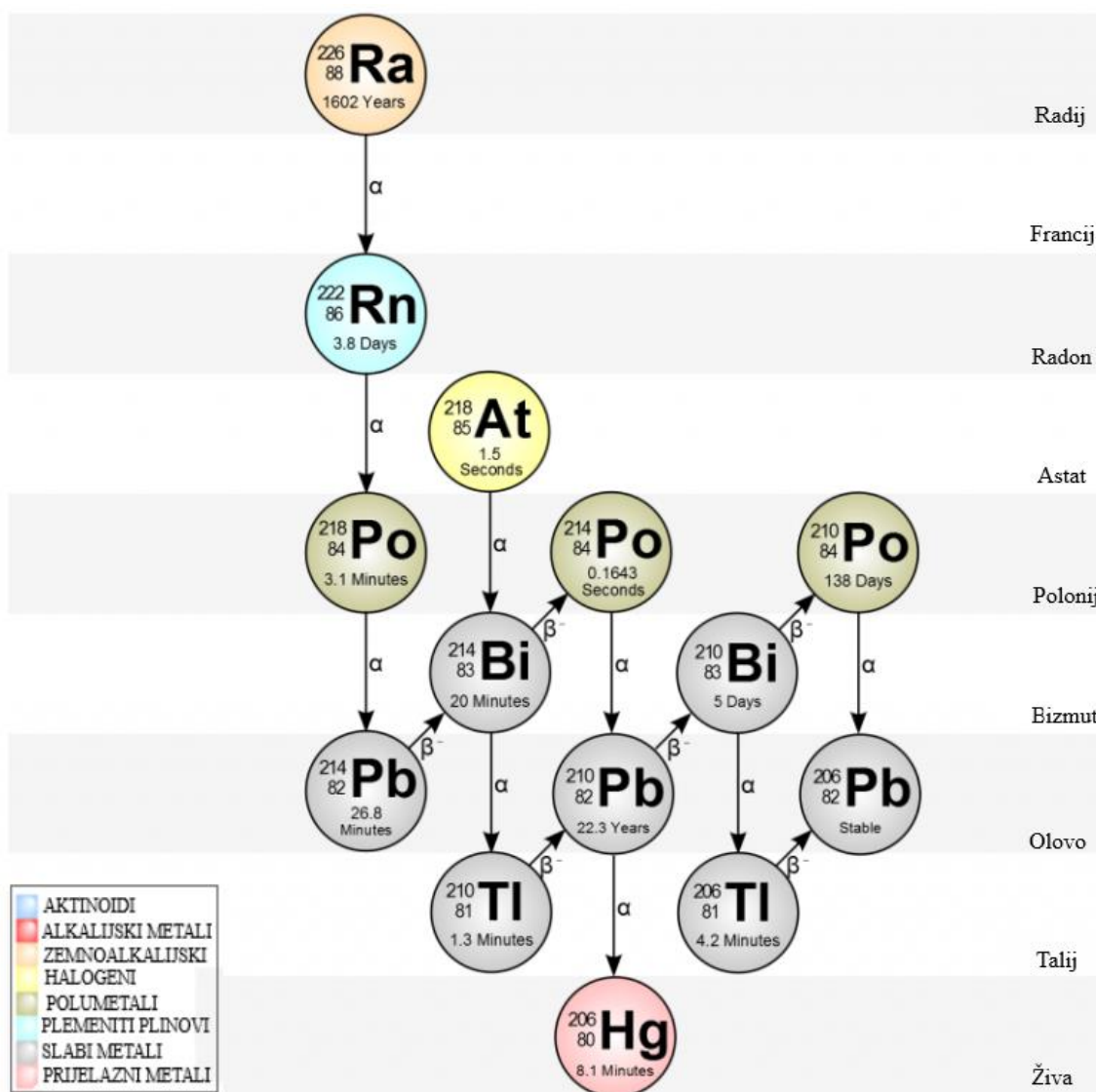
otprilike 8 puta gušći od zraka. Kada se nalazi u čvrstom stanju, svijetli intenzivnom žutom bojom koja postupnim hlađenjem prelazi u narančastocrvenu boju [16].

U prirodi se nalaze tri izotopa radona, radon (^{222}Rn), toron (^{220}Rn) i aktinon (^{219}Rn). Svi izotopi su radioaktivni i članovi su radioaktivnih nizova torija, uranija i aktinija. Na Slici 7. prikazan je lanac radioaktivnog raspada torija te su vidljivi izotopi radona. Izotopu aktinonu je vrijeme poluraspada $t_{1/2} = 3,92 \text{ s}$, a nastaje raspadom aktinija. Izotop torona nastaje raspadom torija, a vrijeme poluraspada je $t_{1/2} = 54,5 \text{ s}$. Radon nastaje alfa-raspadom izotopa radija ^{226}Ra i on je najdulje živi izotop s vremenom poluraspada $t_{1/2} = 3,82 \text{ dana}$ i emitira $5,48 \text{ MeV}$ α -čestice. Na Slici 8. prikazan je lanac radioaktivnog raspada ^{226}Ra . ^{226}Ra pripada lancu raspadanja $4n + 2$ ^{238}U , a taj lanac se zove „serija urana“. Serija radioaktivnog raspada ^{226}Ra završava stabilnim elementom olova ^{206}Pb [16].

Radon ima stabilnu elektronsku konfiguraciju pa je zbog toga kemijski inertan, ne gori i daje mali broj spojeva. Uz plutonij, radon je najrjeđi element na Zemlji koji u tragovima prati sve druge radioaktivne elemente [16].



Slika 7. Lanac radioaktivnog raspada torija [17]



Slika 8. Lanac radioaktivnog raspada ^{226}Ra [17]

Proizvodi raspada radona su radioaktivni izotopi polonija, bizmuta, olova i talija i imaju kratki životni vijek. Polonij je α -radioaktivni izotop, a bizmut i olovo su β i γ radioaktivni. U Tablici 1. prikazan je raspad ^{222}Rn , a u Tablici 2. raspad ^{220}Rn . Svaka tablica prikazuje pripadajuće energije emitiranih čestica tijekom radioaktivnog raspada [19].

Tablica 1. Raspad ^{222}Rn [20]

Radionuklid	vrijeme poluraspada	zračenje	E (MeV)
^{222}Rn	3,82 dana	α	5,5
^{218}Po	3,09 min	α	6,0

²¹⁴Pb	26,8 min	β, γ	
²¹⁴Bi	19,9 min	β, γ	
²¹⁴Po	162 μ s	α	7,7
²¹⁰Pb	22,2 godina	β, γ	

Tablica 2. Raspad ²²⁰Rn [20]

Radionuklid	vrijeme poluraspada	zračenje	E (MeV)
²²⁰Rn	55,8 s	α	6,3
²¹⁶Po	0,15 s	α	6,8
²¹²Pb	10,6 min	β, γ	
²¹²Bi	60,5 min	β, γ	
²¹²Po	0,3 μ s	α	8,8
²⁰⁸Pb	stabilni		

Koncentracija radona prikazuje broj radioaktivnih raspada atoma radona u jedinici vremena i volumena, a izražava se u bekerelima po kubnom metru (Bq m⁻³) [2].

2.4. Izvori radona

Budući da je radon plin, njegova pokretljivost je veća od urana i radija koji se nalaze u stijenama i tlu. Radon iz stijena i tla izlazi kroz pukotine, otvore stijena te pora tla. Plin može prijeći veliku udaljenost prije nego što dođe do radioaktivnog raspada. Uoči raspada, može se naći u visokim koncentracijama i zadržati na nekom mjestu, primjerice u podrumu kuća i prizemlju uslijed izravnog dodira s temeljnim tlom [21].

Visoke koncentracije radona u podzemlju i tlu nalaze se na mjestu gdje radon ima mogućnost napuštanja kristalne rešetke. Tijekom napuštanja kristalne rešetke, gdje se nalazi sve do radioaktivnog raspada, vođen različitim prijenosnim mehanizmima, prolazi put iz unutrašnjosti na površinu Zemlje. U tlu se radon giba difuzijom i konvekcijskim prijenosom uz pomoć plinova kao što su ugljikov dioksid (CO₂) i metan (CH₄) ili vode u tlu [2].

Radon se brže kreće kroz propusna tla kao što su pijesak i šljunak, a teže kroz nepropusna tla poput gline. Umjereno je topljiv u vodi, a topljivost radona ovisi o temperaturi vode: topljivost je veća što je voda hladnija. Mjera topljivosti radona u vodi dana je koeficijentom topljivosti, koji je definiran kao omjer koncentracije radona u vodi i zraku. Na 20 °C koeficijent topljivosti iznosi 0,25 što znači da se radon više distribuira u zraku nego u vodi [21].

U zraku koncentracije radona variraju između 5 i 15 Bqm⁻³, a unutar objekata može iznositi od 10 do 10 000 Bqm⁻³. Najveće koncentracije radona izmjerene su u rudnicima, spiljama i postrojenjima za tretiranje vode [22].

Ako dođe do povećanja koncentracije radona unutar objekata, izvori tog povećanja mogu biti različiti. Najviše koncentracije radona može biti u tlu neposredno ispod objekata (85 – 90 %), u građevinskom materijalu (5 – 10 %), u podzemnoj vodi (5 %) i zemnom plinu (> 1 %). Na koncentracije radona unutar objekata mogu utjecati prirodni i tehnološki parametri. Prirodni parametri uključuju strukturu tla, geološki sastav tla, klimatske i meteorološke parametre. Tehnološki parametri uključuju način gradnje objekta, broj i veličinu mikropukotina u objektu koji su u izravnom kontaktu s tlom te životne navike ljudi kao što su način zagrijavanja, provjetravanja prostorija i slično [2].

2.5. Mjerenje koncentracije radona

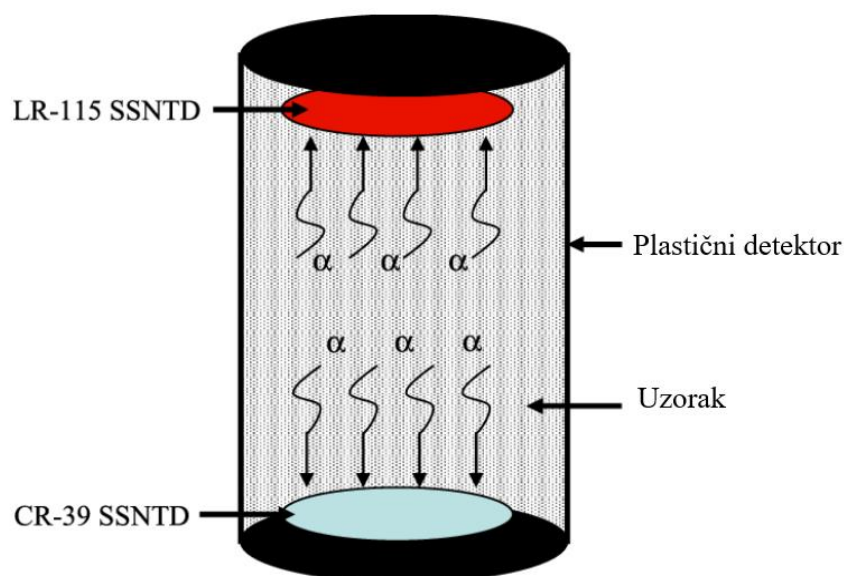
Zbog svojstava radona, teško ga je uočiti i otkriti bez specifičnih uređaja. Postoje razni uređaji pomoću kojima se može detektirati radon, a takvi uređaji se većinom temelje na detekciji α -čestica. Koncentracije radona mogu se mjeriti kontinuirano, integrirano ili diskretno. Također, mogu se mjeriti i pasivnim uređajima kojima je potrebna električna energija. To mjerenje se izvršava tako da radon ulazi u sustav detekcije difuzijom ili tzv. aktivnom tehnikom [3].

Mjerenje koncentracije radona ima značajnu ulogu za potencijalno predviđanje potresa, vulkanske aktivnosti ili kod istraživanja pronalaženja ruda ili geotermalnih izvora [22].

Neki od poznatih uređaja za mjerenja koncentracije radona u tlu su:

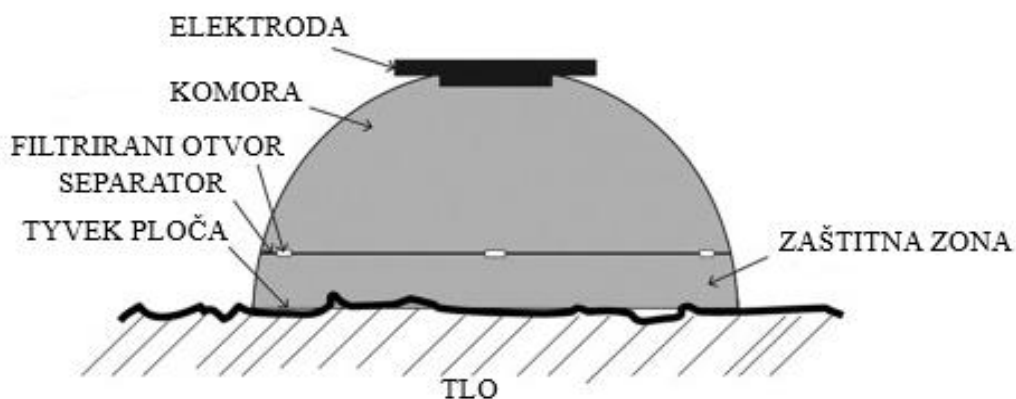
- detektori nuklearnih tragova
- detektor elektrode
- detektor na principu aktivnog ugljena
- termoluminiscentni dozimetar
- scintilacijski detektor

Detektori nuklearnih tragova (*Solid state nuclear track detectors, SSNTD*) su detektori čija metoda mjerenja radona je jedna od najraširenijih metoda koja koristi integralno mjerenje razine aktivnosti. Nekoliko je vrsta detektora nuklearnih tragova, a Cr-39 i LR-115 se najčešće koriste. To su pasivni uređaji koji nisu osjetljivi na β -čestice i γ -zračenje jer za stvaranje traga na filmu detektora potrebna je viša energija. Takvi detektori su osjetljivi samo na α -čestice koje prolaze kroz korito prilikom čega čestice stvaraju tragove koji su vidljivi u optičkom mikroskopu nakon kemijskog jetkanja. Plastični detektor (Slika 9.) je ukopan u tlo najmanje 30 dana poslije čega se uzima i zamjenjuje novim plastičnim detektorom. U tih 30 dana detektor učita kontinuiran integracijski signal kojeg je proizveo radon. Prilikom ulaska radona u detektor kroz filtrirani otvor, detektor se raspadne, a emitirane α -čestice udaraju u film i stvaraju tragove na filmu. Da bi se utvrdila koncentracija radona potrebno je izmjeriti tragove. Broj snimljenih tragova odgovara integriranoj koncentraciji radona. Nakon toga rezultati se statistički obrađuju kako bi se odredile anomalije radona. SSNTD ima razne prednosti, a neke od njih su: jeftin detektor kojem nije potrebna električna struja, relativno je malih dimenzija, osjetljiv je samo na alfa čestice te na njega ne utječu vlaga, niska temperatura, umjetno zagrijavanje ni svjetlost. Ovakav se detektor može koristiti duže vrijeme i omogućuje vremensko nadgledanje velikog broja lokacija, ali ne može razlikovati kratkoročne promjene. SSNTD detektori nisu previše učinkoviti u mjerenju visokih koncentracija radona [3, 19].



Slika 9. Prikaz plastičnog detektora nuklearnih tragova [23]

Detektor elektrode (*Electret detector*) je integrirani uređaj, ima elektrodu koja je izolator te konstantni električni naboj. Na Slici 10. prikazana je shema elektronske komore za mjerenje protoka radona iz tla. U ovakvoj komori radon protječe kroz Tyvek ploču u zaštitnu zonu pa u komoru. Aktivnost radona je u ovom slučaju proporcionalna potencijalnom padu jer dolazi do raspada radona na pozitivno nabijenoj elektrodi koja se nalazi na vrhu komore. Kod detektora elektrode čestice nastale raspadom radona stvaraju ione koje u uređaju određuju promjenu ukupnog naboja elektroda. Uređaj ima nekoliko prednosti kao što su mogućnost pohrane podataka tijekom relativno dugog razdoblja, ne smeta mu vlaga i dobiveni rezultati se lako očitaju. Nedostaci uređaja su da učitana krivulja ne pokriva učinkovitost visokih i niskih koncentracija γ -zračenja i njezine osjetljivosti na njih [3, 19].



Slika 10. Elektronska komora [24]

Detektor na principu aktivnog ugljena pasivan je uređaj koji se za svoj rad ne koristi električnom energijom. Sadrži kanistar u kojem se nalazi aktivni ugljen u zrnu (Slika 11.). Detektor se temelji na mogućnosti ugljena da adsorbira radon koji ulazi u kanistar. Nakon nekog perioda ugljen se analizira pomoću gama spektrometrije produkata radona. Ovakav uređaj koristi se kod kratkotrajnog mjerenja, može mjeriti koncentracije radona od 3 do 5 dana te se većinom koristi za utvrđivanje dozvoljene koncentracije radona unutar objekata. Na dobivene rezultate detektora na principu aktivnog ugljena može utjecati vlaga jer može doći do zasićenja ugljena [19].



Slika 11. Prikaz kanistra s aktivnim ugljenom za detekciju radona [25]

U termoluminiscentnom dozimetru smještena je metalna ploča koja je u većini slučajeva električno nabijena zbog učinkovitijeg očitavanja radona. Radon služi za skladištenje energije u uređaju, a pohranjen je na metalnoj ploči [19].

Scintilacijski detektor je uređaj koji se koristi jednom od najstarijih i najviše korištenih metoda za uzimanje uzoraka radona i produkte raspadanja. To je detektor ionizirajućeg zračenja kod kojeg se najčešće koristi cinkov sulfid (ZnS) koji je premazan po plastičnoj scintilacijskoj ćeliji koja služi za uzimanje uzoraka. Scintilacijske ćelije su veličine 0,1 – 3,0 l i većinom su napravljene od metala, stakla ili plastike premazanom ZnS. Scintilacijski detektor je standardni detektor γ -zračenja. Takvi detektori se koriste svojstva scintilatora kako bi prilikom prolaska nabijene čestice proizveli mali svjetlosni bljesak, scintilaciju. Sastoje se od metalne posude unutar koje postoji sloj cinkova sulfida koji je aktiviran srebrom. Otkrivaju se svjetlosni fotoni koji nastaju uslijed interakcije α -čestica prilikom raspada radona. Kako bi se izbrojili svjetlosni fotoni, scintilacijska ćelija je povezana fotomultiplikacijskom cijevi koja služi za pretvaranje svjetlosnog pulsa u

električni puls i njegovo pojačavanje. Cijevi su neposredno ili preko svjetlovoda povezane na scintilator. Jedan od scintilacijskih detektora je detektor koji ima scintilacijsku ćeliju zvanu Lukasova ćelija (Slika 12.). Prednost kod korištenja scintilacijskih ćelija je da ćelije eliminiraju potrebu uzorka da se prijenosi prije prebrojavanja svjetlosnih fotona. Ovim se detektorom može koristiti godinama, samo ga je potrebno pravilno održavati, a to uključuje čišćenje inertnim plinom (dušični plin) [3, 19].



Slika 12. Industrijski detektor sa Lukasovom ćelijom [26]

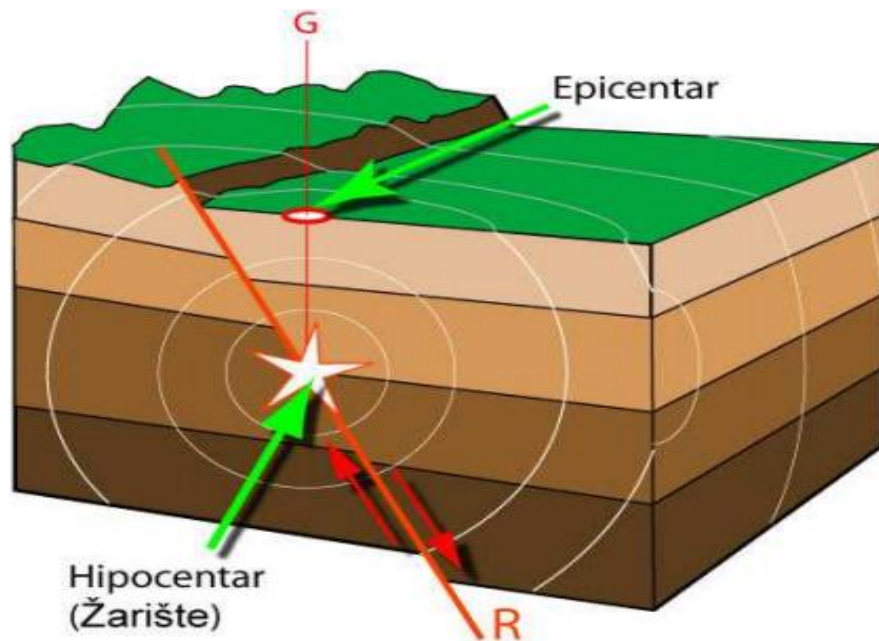
Posljednjih nekoliko godina aktivni uređaji se koriste za konstantno mjerenje radona u tlu. Većinom se koriste uređaji poput ionizacijske komore ili silikonski detektori. Takvi uređaji imaju postavljenu sondu koja se nalazi na određenoj dubini u tlu pa radon ulazi u detekcijsku komoru ili se može staviti unutar tla pa radon ulazi u komoru prirodnom difuzijom. Za ovakva mjerenja potrebna je električna struja koja u većini slučajeva nije prisutna na aktivnim rasjedima i zbog toga se posljednjih nekoliko godina koriste solarne ploče. Aktivni uređaji mogu kontinuirano mjeriti i očitavati rezultate putem interneta daljinskim prijenosom i omogućuju praćenje koncentracije radona ovisno o vremenu.

Sve češće se koriste i prijenosni instrumenti koji rade na baterije. To su i pasivni i aktivni uređaji čiji se intervali mjerenja kreću od najmanje 1 do 15 minuta pa sve do 48 sati. Takvi detektori u većini slučajeva rade neprekidno, a prednost im je da daju podatke o koncentraciji radona u stvarnom vremenu i mogu raditi na principu modema ili satelita. Osim toga, mogu mjeriti i koncentracije radona u vodi [3, 19]

3. POTRESI

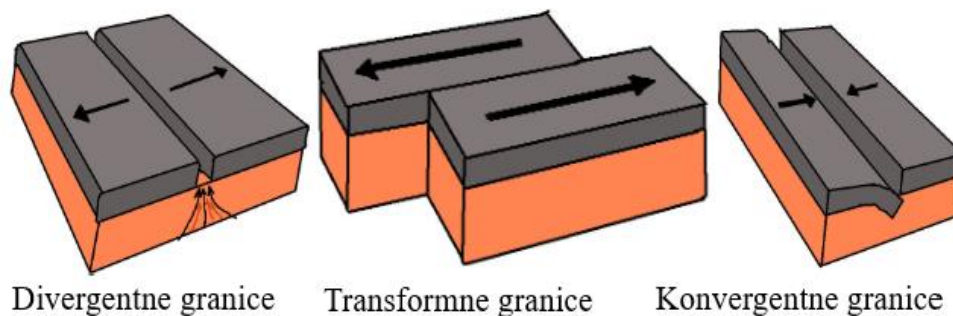
3.1. Uzroci i mjesto nastanka potresa

Potresi su kratkotrajni, iznenadni i snažni pokreti dijelova Zemljine kore. Do vibracija tla dolazi zbog magmatske aktivnosti, urušavanja stijena ili tektonskih poremećaja u litosferi i dijelom u Zemljinu plaštu [27]. Mjesto nastanka potresa u Zemlji naziva se hipocentar ili žarište potresa. Hipocentar može biti točno ispod Zemljine površine pa sve do dubine od 750 km. Potres je najsnažniji u epicentru, tj. u točki na površini Zemlje koja se nalazi neposredno iznad hipocentra (Slika 13.) [27].



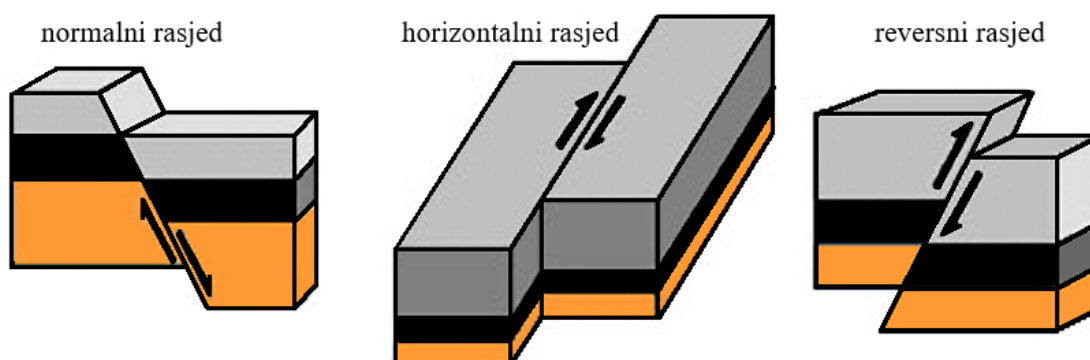
Slika 13. Prikaz epicentra i hipocentra potresa [28]

Prema postanku potresi se dijele na tektonske, vulkanske, urušne i antropogene. Tektonski su uzrokovani tektonikom ploča ili rasjedanjem pa zbog toga zahvaćaju veća područja. To su jači potresi dubokih žarišta i obuhvaćaju 90 % svih potresa na Zemlji. Postoje tri tipa granica između ploča: divergentne, transformne i konvergentne (Slika 14.). Kod divergentnih granica dolazi do udaljšavanja ploča i takve granice su specifične za potrese plitkih žarišta. Kod transformnih granica ploče se pomiču i klize jedna uz drugu te ne dolazi do uništavanja kore. Kod ovih granica stvaraju se transformni rasjedi i oni su specifični za plitke potrese. Konvergentne granice su mjesta gdje se ploče sudaraju [29, 30].



Slika 14. Tipovi granica [30]

Rasjedi su strukturni elementi litosfere koji nastaju zbog pucanja i pomicanja dijelova litosfere duž rasjedne plohe čija je uloga razdvajanja rasjedna krila [31]. Tijekom nastajanja rasjeda dolazi do stvaranja dva stijenskih bloka, krovinsko i podinsko krilo koji se pomiču duž rasjedne ravnine. Ovisno o pomicanju podinskog i krovinskog krila rasjedi se dijele na normalne, horizontalne i reversne (Slika 15.) [31].



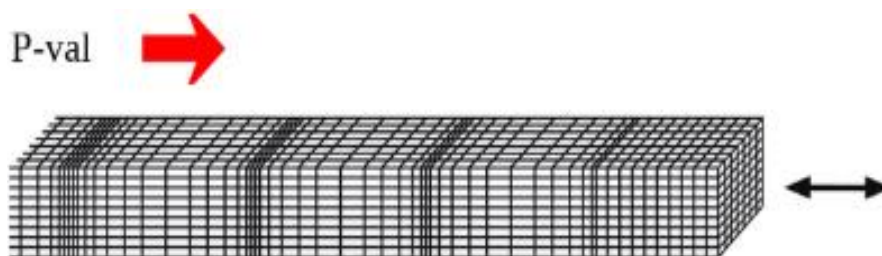
Slika 15. Vrste rasjeda [32]

Vulkanski potresi izazvani su vulkanskom aktivnošću, male su jačine i obuhvaćaju otprilike 7 % potresa na Zemlji. Urušni potresi uzrokuju urušavanja stijenske mase u podzemlju i tu spada oko 3 % potresa na Zemlji. Potresi uzrokovani nuklearnim eksplozijama ili nekom drugom ljudskom aktivnošću su antropogeni potresi i oni su vrlo rijetki [29, 33].

3.2. Seizmički valovi

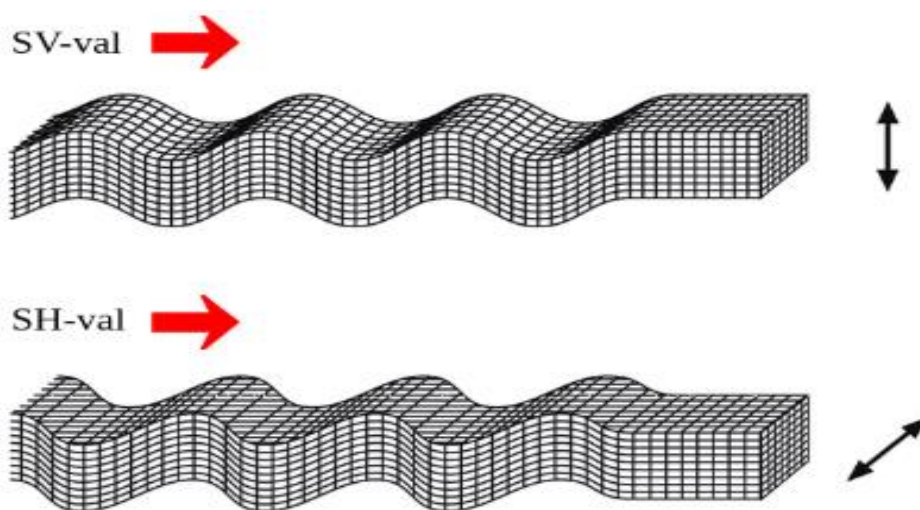
Potresne vibracije šire se od hipocentra sa svih strana, poput zvuka. Potresni valovi su seizmički valovi koji nastaju na površini loma [33]. Pojavljuju se u dva oblika: kao prostorni i površinski valovi. Prostorni valovi šire se kroz čitavu Zemljinu unutrašnjost, površinski valovi se površinom šire od epicentra kružno, a šire se samo

litosferom. Najbrži prostorni valovi su primarni ili longitudinalni valovi ili P-valovi. P-valovi vibriraju u smjeru širenja potresnog udarca, izazivaju stezanje i rastezanje stijenske mase te im brzina raste s dubinom (Slika 16.). U pravilu na prijemnik najprije dolazi P-val, pa za njime S-val [29].



Slika 16. P-val [33]

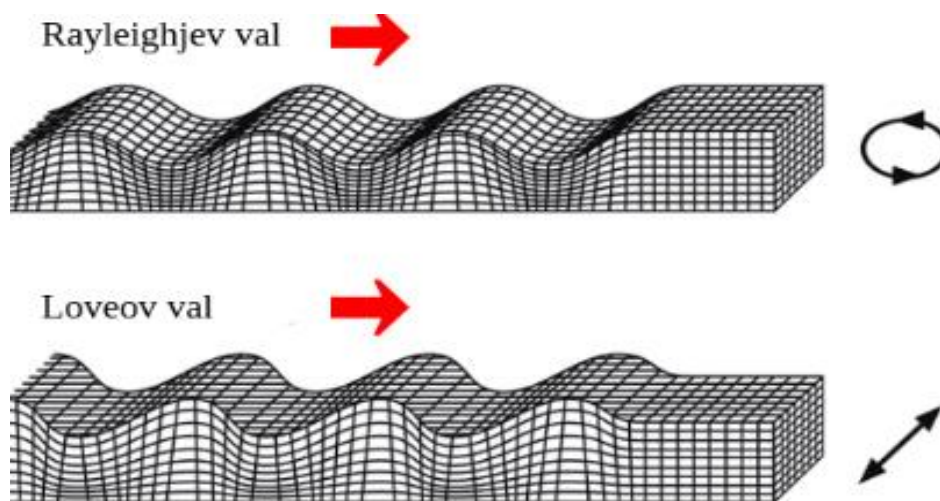
Sekundarni ili transverzalni valovi ili S-valovi su sporiji od P-valova oko 1,7 puta. S-valovi vibriraju u smjeru širenja i ne šire se kroz fluide jer je Zemljina vanjska jezgra tekuća, a ne kruta [29]. Postoje dvije vrste S-valova s obzirom na geometrijsku orijentaciju oscilacija u prostoru: SH-valovi koji su polarizirani u vodoravnoj ravnini (Slika 17.) i SV-valovi koji su polarizirani u okomitoj ravnini (Slika 17.) [33].



Slika 17. SV-val i SH-val [33]

Površinski valovi rasprostiru se brzinom manjom od brzine rasprostiranja S-valova i okarakterizirani su velikim valnim duljinama i malim frekvencijama te uzrokuju najveće štete. Površinski valovi se pojavljuju kao Love-ovi i Rayleigh-ovi valovi (Slika 18.). Love-ovi su transverzalni valovi koji se gibaju okomito na smjer pružanja vala, a titraju lijevo-desno. Moguće ih je uočiti samo na horizontalnim komponentima

seizmograma. Rayleigh-ovi valovi su također transversalni valovi, a za razliku od Love-ovih valova oni titraju gore-dolje. Njihova površina se giba eliptično pa su sporiji, ali i vrlo destruktivni za građevine [29, 33].



Slika 18. Rayleigh-jev i Love-ov val [32-33]

3.3. Mjera potresa: intenzitet i magnituda

Intenzitet potresa mjeri se seizmometrom koji radi na principu njihala i detektira seizmičke valove, a njihov ispis se naziva seizmogram. Seizmograf je mjerni instrument kojim se mjere i bilježe pomaci tla tijekom potresa. Pomoću analize seizmograma može se odrediti kada se potres dogodio, položaj hipocentra, jakost potresa (magnituda) i parametre rasjedanja poput pružanje, nagib i pomak na rasjedu [29]. Da bi se predočila jakost i utjecaj potresa na površini Zemlje, koriste se više parametra kao što je makroseizmički intenzitet. Makroseizmički intenzitet opisuje utjecaj seizmičkog izvora koji ovisi o udaljenosti i jakosti potresa te lokalnim svojstvima tla. Pomoću podjele makroseizmičkih intenziteta može se odrediti intenzitet u izvoru, tj. epicentru te dubinu žarišta potresa [33].

Postoje razne ljestvice pomoću kojih se može odrediti makroseizmički intenzitet. Danas su u upotrebi Mercalli-Cancani-Siebergova ljestvica ili MCS ljestvica iz 1917. godine, a ima 12 stupnjeva. Modificirana Mercallijeva ili MM ljestvica iz 1931. godine također ima 12 stupnjeva. Japanska ljestvica iz 1950. godine ima 7 stupnjeva, a Medvedev-Sponheuer-Karnikova ili MSK-64 ljestvica iz 1964. godine ima 12 stupnjeva te polazi od vrste objekata, vrste i količine oštećenja nastalog potresom određenog

stupnja. U Tablici 3. prikazani su stupnjevi Mercallijeve skale sa pripadajućim odražavanjem potresa na prostor [29].

Tablica 3. Intenzitet potresa prema Mercallijevoj ljestvici [29]

stupnjevi	
Mercallijeve skale	Odražavanje potresa na prostor
I	Ljudi ga ne primjećuju, ali instrumenti da, životinje su uznemirene.
II	Može se osjetiti na višim katovima zgrada.
III	Osjeća se unutar zgrada kao brze vibracije, viseći predmeti mogu se zanjihati.
IV	Osjeća se unutar zgrada, može ga se osjetiti i vani. Vozila se tresu dok nisu u pokretu, posude i prozori zveče.
V	Osjeća se na otvorenom, zgrade podrhtavaju, manji predmeti se prevrću, vrata se njišu.
VI	Svi ga ljudi osjećaju, drveće se trese, manja zvona zvone, posude puca, slike i knjige padaju.
VII	Ljudi jedva stoje, dimnjaci i zidovi pucaju, žbuka otpada.
VIII	Poteškoće u vožnji, velike štete na zgradama, padaju dimnjaci, lome se grane na drveću.
IX	U zemlji se stvaraju velike pukotine, zgrade se mogu urušiti.
X	Voda se izlijeva iz rijeka, podzemne instalacije pucaju, većina zgrada je srušena.
XI	Samo poneka zgrada je još uspravna, mostovi su urušeni, željezničke tračnice su iskrivljene, otvaraju se velika klizišta.
XII	Gotovo sve konstrukcije su srušene, uočavaju se valovi po zemlji, rijeke mijenjaju tokove.

Jačina potresa u hipocentru određuje se magnitudom potresa koja se označava decimalnim brojem. Predložio ju je američki seizmolog Charles Francis Richter 1935. godine pa je kasnije veličina nazvana Richterova magnituda. Richterova magnituda mjeri snagu potresa računajući oslobođenu energiju. Do kolike oslobođene energije dolazi ovisi o jačini potresa – jači i veći potresi oslobađaju više energije nego manji potresi. Prilikom

proučavanja zapisa potresa na seizmogramima zaključeno je da jakost nekog potresa mora biti proporcionalna maksimalnoj amplitudi očitanoj sa zapisa tog potresa na seizmogramu i njegovoj epicentralnoj udaljenosti. Istraživanjem efekata potresa i iznosa njihovih magnituda, ustanovljeno je da najslabiji potres koji se može osjetiti ima magnitudu 1,5. Slabi lokalni potresi mogu imati magnitudu 3 u području približno 20 km oko epicentra. Razornom potresu odgovara 6, a najjači potres instrumentalno zapisan, bio je magnitude 9,5. U Tablici 4. prikazana je magnituda potresa prema Richerovoj skali s pripadajućom manifestacijom u prostoru te pripadajućom oslobođenom energijom [34].

Veza između energije i snage potresa je logaritamska, što znači da porast od 1 odgovara povećanju amplitude valova za 10. Logaritamski izraz se može koristiti za procjenu oslobođene energije potresa, a zove se Gutenberg-Richter relacija:

$$\log E = 1,5 * R + 4,8 \quad (16)$$

$$\text{ili } E = 10^{1,5*R+4,8} \quad (17)$$

gdje je E oslobođena energija potresa [J], R radijus Zemlje ($R = 6371$ km) [35].

Tablica 4. Magnituda potresa prema Richerovoj skali [29, 35]

Magnituda prema		
Richerovoj skali	Odražavanje potresa na prostor	Energija [J]
1	primjećuju ga instrumenti	$2,0*10^6$
2	ljudi ga jedva primjećuju	$6,3*10^7$
3	ljudi ga jedva primjećuju	$2,0*10^9$
4	primjećuje se u krugu 32 km od epicentra moguća su blaga razaranja na manjem području	$6,3*10^{10}$
5	primjećuje se u krugu 32 km od epicentra moguća su blaga razaranja na manjem području	$2,0*10^{12}$
6	prilično razoran potres	$6,3*10^{13}$
7	jak potres	$2,0*10^{15}$
8	vrlo razoran potres	$6,3*10^{16}$
9	vrlo razoran potres	$2,0*10^{18}$

Trajanje potresa varira, no većina potresa traje manje od jedne minute. Potresi se pojavljuju i prije glavnog potresa te nakon glavnog potresa i do nekoliko minuta. Svake

godine događa se otprilike 30 000 potresa koje čovjek osjeti, ali neki se potresi ni ne osjete pa se smatra da ih ima više od milijun godišnje [29].

„Preshock“ je potres kojem prethodi „foreshock“. „Foreshocks“ su potresi koji prethode većim potresima na istoj lokaciji. Kako glavni potresi ne moraju imati male potrese, potres nije moguće identificirati kao „foreshock“ ili potres sve dok se na istom području ne dogodi veći potres. „Aftershocks“ su manji potresi koji se događaju na istom području narednih nekoliko dana, tjedana, mjeseci ili čak godina nakon većeg potresa ili „mainshock“. Takvi potresi su manje magnitude nego glavni potresi i uglavnom se pojave pored rasjeda zbog kojeg je došlo do potresa. Učestalost „aftershocka“ se smanjuje s vremenom. „Mainshock“ su glavni potresi koji su najveći u nizu potresa. Neka mu prethodi jedan ili više „foreshock“, ali su uvijek praćeni sa više „aftershocks“. Na primjer potres u Zagrebu koji se dogodio 22. ožujka 2020. godine $M = 5,5$ imao je znatan broj „aftershock-a“ do 14. travnja 2020. Manji potresi su bili znatno manje magnitude nego glavni potres [36, 37]. Omorijev zakon daje odnos učestalosti pojavljivanja naknadnih potresa s vremenom [38]. Omorijev zakon kazuje da će potresi padati s vremenom po potencijskoj krivulji, a trajanje ovisi o magnitudi glavnog potresa. [38].

4. RADON KAO PREKURSOR POTRESA

4.1. Prekursori potresa

Potencijalno predviđanje prekursora većinom se temelji na promatranju prekursorskih pojava. Većina jačih potresa praćena je prethodnim uočavanjem specifičnih prirodnih prekursora. Seizmički prekursori su pojave koje se događaju neposredno prije pojave potresa. Oni se obično pojavljuju nekoliko sati prije potresa. Razlozi pojavljivanja raznih geofizičkih i geoloških prekursora netom prije nadolazećeg potresa vezani su za proces akumuliranja naponskog polja najčešće kao posljedice bočnih tektonskih pritisaka u Zemljinoj kori. Pod pojmom seizmičkih prekursora smatraju se deformacije tla, promjena razine mora, plima i oseka, anomalija seizmičnosti, promjena u mehanizmu potresa, u hipocentralnoj migraciji, u kori kretanja, promjene brzine seizmičkih valova, u geomagnetskom polju, u koncentraciji radona, u razini podzemnih voda i dr. Nabrojani prekursori pružaju osnovu za potencijalno predviđanje tri glavna parametra potresa: mjesto i vrijeme pojave i magnitudu potresa [39].

Općenito, vrlo je teško povezati potres s bilo kojim prekursorom, a najveći problem svih prekursora potresa je poteškoća razlikovanja signala od buke. Potrebno je nekoliko prekursora da bi se signal razlikovao od buke. Zbog ispravne procjene prekursora i mogućnosti njihovog korištenja u svrhu predviđanja potrebno je razumjeti fizičke procese koji ih uzrokuju. Fizički procesi potresa i prekursora nisu u potpunosti shvaćeni jer čimbenici i uvjeti u kojima se nalaze vrlo su komplicirani.

U posljednjih nekoliko desetljeća započeta su mjerenja anomalije hlapljenja helija, radona, vodika i ugljičnog dioksida u nekim područjima svijeta koje su sklone potresima. Od svih plinova radon je bilo najlakše otkriti pa se zbog toga smatra kao najpoželjniji potencijalni prekursor potresa [19]

4.2. Anomalije radona

Anomalija radona predstavlja pozitivno odstupanje koncentracije radona koje je veće od srednje razine njegove koncentracije. Podrijetlo anomalije radona i odnos sa seizmičkim događajem još se uvijek istražuju i predmet su debate među znanstvenicima već desetljećima. Pojave anomalija povezane s potresima istražene su kako bi se utvrdilo postoji li šansa da pomognu u predviđanju velikih potresa. Dakle, radon kao prekursor nema smisla kod malih potresa pa je zbog toga u Republici Hrvatskoj ova metoda

praktički neupotrebljiva. Istraživanja koja su bila provedena u Japanu, prije potresa Kobe i Tōnankai, smatraju se početkom korištenja anomalije radona kao prekursora potresa. Mjerenja su bila provedena na aktivnoj rasjednoj zoni pri čemu su bile vidljive promjene u koncentraciji radona netom prije potresa i nakon potresa [19].

1953. godine Hatuda je opazio da su koncentracije zemnih plinova u tlu i podzemnim vodama anomalijski veće uz aktivne rasjede što objašnjava zašto rasjedi pružaju najmanji otpor kod otplinjavanja. Mehanički procesi prilikom predviđanja potresa uvijek su praćeni deformacijama, nakon čega se mogu pojaviti složeni kratkoročni i dugoročni prekursori. Anomalije koncentracije radona moguće je uočiti nekoliko tjedana ili čak nekoliko mjeseci neposredno prije potresa. Smatra se da anomalije radona nastaju u podzemlju. Ukoliko se anomalije događaju lokalno, onda radon odlazi u ostale međuprostorne fluide čije gibanje pokreću geodinamički događaji. Oba slučaja su detaljno istražena, ali se pretpostavlja da su pouzdanije anomalije radona koje se događaju lokalno [19].

Do problema koji su vezani s identifikacijom anomalija dolazi zbog identifikacije najveće udaljenosti između epicentra i mjesta gdje se opažaju anomalije radona, identifikacije vremena između anomalije radona i pojave potresa te važnosti tektonske strukture. Problemi identifikacije anomalija dovode i do problema zašto radon baš i nije pouzdani prekursor potresa [19].

4.3. Oblici anomalije radona

Koncentracije radona mogu se mjeriti raznim pasivnim ili aktivnim uređajima. Anomalije se u većini slučajeva očitavaju prilikom očitavanja signala u pasivnim detektorima. Pomoću pasivnih detektora poput detektora nuklearnih tragova anomalije se mjere kontinuirano, a za mjerenja radona i u tlu i vodi koriste se i aktivni uređaji kao što su ionizacijske komore ili silikonski detektori [21].

Prilikom kontinuiranog mjerenja razine radona tijekom dužeg perioda i s vremenskim odstupanjem najmanje od sat vremena, moguće je klasificirati uočene anomalije radona. Kako bi se anomalije lakše raspoznaile, 1991. godine znanstvenici su klasificirali anomalije u A i B grupe, koje se razlikuju po fizičkim procesima [21].

- **Grupa A** pokazuje vrlo sporo povećanje ili čak smanjenje koncentracija radona. Anomalije grupe A mogu se povezati sa stalnim porastom naprežanja pa sve do loma stijene. Takva vrsta anomalije može se nastaviti tijekom nekoliko godina [21].
- **Grupu B** karakterizira brzo povećanje, a može uslijediti sporo povećanje ili smanjenje koncentracije radona. Anomaliju tipa B može okarakterizirati i kratki skok anomalija koji traje nekoliko sati do nekoliko dana. Takvi skokovi mogu biti pozitivni ili negativni, a često su praćeni potresom u roku od desetak dana. Brzo povećanje anomalija prethodi konstantnoj koncentraciji radona. Takve vrste anomalija u grupi B mogu biti povezane s različitim fizičkim procesima ili s različitim vremenskim intervalima. Anomalije grupe B mogu se dogoditi zbog lokalnih učinaka, a sve ovisi o određenim lokalnim parametrima ili se mogu dogoditi zbog epicentralnih učinaka. Kad se dogode zbog epicentralnih učinaka, treba pretpostaviti da epicentralnim područjem protječe brza promjena naprežanja. Za skok anomalija maksimalna brzina promjene koncentracije radona V može se izračunati pomoću formule:

$$V = \frac{1}{\sigma C} \left(\frac{dC_{Rn}}{dt} \right)_{max} \geq \frac{1}{\tau} \quad (18)$$

gdje je C_{Rn} koncentracija radona, σC razlika koncentracije radona prije i poslije brze promjene, d epicentralna udaljenost, τ vrijeme brze promjene (u satima).

Pomoću podataka maksimalne brzine V , promjene koncentracije radona i epicentralne udaljenosti d može se dobiti gruba korelacija za $d \geq 70$ km pomoću formule:

$$\log(V) = -2 \log(d) + 4[V] = \text{sati}^{-1}, [d] = \text{km} \quad (19)$$

Pomoću maksimalne brzine promatrane anomalije može se napraviti gruba procjena udaljenosti od epicentra [19, 21].

4.4. Podrijetlo anomalija i predviđanje potresa

Za potencijalno predviđanje potresa, potrebno je predvidjeti mjesto, vrijeme i jačinu potresa. Maksimalne udaljenosti između epicentra potresa i mjesta uočene anomalije radona bile su promatrane kako bi se mogao utvrditi njihov odnos. Sve formule koje se spominju izvedene su za specifične regije [19].

Nakon raznih istraživanja i analiziranja radona i potresa s $M < 3$, Rikitake je 1976. godine predložio empirijski odnos između vremenskog intervala t i anomalije radona te pojave potresa i magnitude potresa M :

$$\text{Log } t = 0,76M - 1,83 \quad (20)$$

gdje je t vrijeme od pojave anomalije radona do potresa, a M magnituda dolazećeg potresa [19].

Kasnije se odnos (20) modificirao ovisno o vremenskom intervalu:

$$\text{Log } t = M - 2,16 \text{ za } 0,1 < t < 7 \text{ dana} \quad (21)$$

$$\text{Log } t = 0,62M - 1,0 \text{ za } t > 7 \text{ dana} \quad (22)$$

Kasnije su se razvile razne matematičke formule koje se koriste kod izračuna pojedinih veličina pomoću kojih se može odrediti veličina anomalije radona promatranog područja [19].

Fenomeni prekursora mogu se promatrati i izvan udaljenosti D [km]. Ta udaljenost predstavlja polumjer učinkovite zone manifestiranja prekursora. Da bi se približno mogla procijeniti veličina te zone može se koristiti formula:

$$D = ae^M \quad (23)$$

gdje je M magnituda potresa, parametar a ima vrijednosti ≥ 1 što ovisi o strukturi kore ispitanog područja [40].

Vrijeme prekursora T [dani], epicentralna udaljenost D [km] i magnituda M mogu se empirijski povezati u jednu formulu:

$$\log(DT) = 0,63M + b \quad (24)$$

pri čemu je b parametar koji za plinovite geoseizmičke prekursore potresa iznosi $\pm 0,15$ [40].

Pomoću podataka o potresima i anomalije radona zaključeno je da vrhunac anomalije može poslužiti kao potencijalni dijagnostički parametar za nadolazeće seizmičke događaje [40]. Matematički se mogu povezati amplituda, trajanje anomalije radona i magnitude očekivanog potresa te izraziti kao:

$$M = k\sqrt{S} \quad (25)$$

gdje je k korekcijski faktor, S površina gdje je uočen vrhunac anomalije [40].

Parametar učinkovitosti potresa ε može poslužiti kako bi se dokazao potencijal otkrivanja seizmičkih događaja na mjestu mjerenja anomalije radona:

$$\varepsilon = 10^{(1,3M-8,19)} D^{-3} \quad (26)$$

gdje je D epicentralna udaljenost [km].

Tijekom promatranja anomalija radona tektonski poremećaji trebali bi se promatrati i bilježiti uslijed promjena kod anomalije drugih plinova kao što su helij, vodik, ugljični dioksid te metan u podzemnoj vodi i zemnom plinu [40].

Mjerenja radona u tlu i u podzemnim vodama provedena su kako bi se pokazalo da prostorne i vremenske varijacije mogu pružiti informacije o geodinamičkim događajima. Najprije je potrebno definirati anomalije radona i njezine parametre kao što su amplituda, trajanje, epicentralna udaljenost i vrijeme prekursora. Velik dio analiziranih podataka je dokazao da vrijeme i trajanje prekursora imaju poveznicu s porastom magnitude. Vrijeme prekursora smanjuje se s porastom udaljenosti od epicentra, a vrijeme trajanja opada s malim udaljenostima. Amplituda je neovisna o veličini magnitude i epicentralne udaljenosti [21].

Od 1927. godine sve do danas provedena su razna istraživanja, no još uvijek nije pronađena točna povezanost anomalija radona i seizmičke aktivnosti [21].

5. PRIMJERI – ANOMALIJE RADONA I POTRESI

Nakon potresa u Italiji u gradu L'Aquili 2009. godine ($M = 6,3$), radon se počeo smatrati kao jedan od važnih prekursora potresa. Prva mjerenja radona u podzemnim vodama provedena su 1927. i 1947. godine u Japanu, a prva mjerenja u tlu provedena su 1953. godine uz aktivnu rasjednu zonu. U Japanu 1944. godine koncentracije i anomalije radona u tlu su bile izmjerene netom prije jakog potresa Tōnankai magnitude 8. Prilikom potresa Okabe 1956. godine koncentracije radona u zraku i na površini tla naglo su porasla. Spomenuta istraživanja u Japanu bila su jedna od prvih u vrijeme kada nije bilo modernih uređaja pa su sva mjerenja bila izvršena na površini tla. Nakon istraživanja u Japanu, mjerenje koncentracija radona se počelo sve više koristiti kao jedan od potencijalnih prekursora potresa [21]. Prvi dokazi radona u podzemnim vodama kao potencijalni prekursor potresa bili su opaženi u Taškentu, Uzbekistanu (1966.). Tijekom mjerenja koncentracije radona, zapaženo je da na izvoru blizu Taškenta, koncentracija radona se povećala netom prije potres $M = 5,2$ (15. travanj 1966.) Italija je jedna od država gdje znanstvenici nisu utvrdili povezanost između koncentracije radona i seizmičke aktivnosti [21].

5.1. Japan

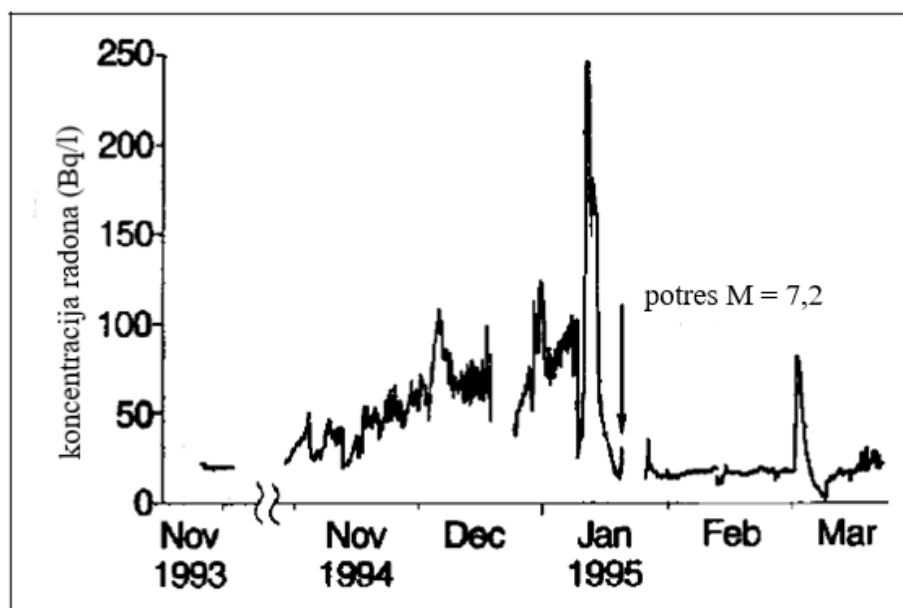
Jedno od prvih mjerenja koncentracije radona bilo je provedeno na aktivnoj rasjednoj zoni. Prije potresa Tōnankai ($M = 8$) koji je bio u prosincu 1944. godine, bile su uočene velike koncentracije radona [3].

Sljedeće značajno mjerenje radona je bilo u rujnu 1984. kad su anomalije bile zabilježene prije potresa $M = 6,8$ u gradu Nagano. Znanstvenici su promatrali postupno povećanje koncentracije radona tri mjeseca prije potresa i značajno povećanje koncentracije radona dva tjedna prije potresa. Lokacija za mjerenje je bila otprilike 65 km udaljena od epicentra, na Atotsugawa rasjedu [3, 19].

14. siječnja 1978. godine promjene koncentracije radona u podzemnoj vodi uočene su 5 dana prije Izu-Oshima-kinkai potresa $M = 7$. Koncentracije radona mjerene su u bunaru od 350 m dubine. Udaljenost od epicentra do stanice za kontinuirani nadzor radona iznosila je otprilike 25 km. Uočeno je da je došlo do značajnog i naglog pada te kasnije povećanja koncentracije radona zabilježene 9. siječnja 1978. godine. Promjene u

koncentraciji radona su bile oko 15 %, a nakon potresa je došlo do još većeg povećanja koncentracije radona [3, 19, 41].

Od 1993. do 1995. godine Sveučilište u Tokiju i Geološki odsjek u Japanu su provodili mjerenje koncentracije radona u podzemnim vodama u svrhu predviđanja potresa u istočnom Japanu. Znanstvenici su radili analize koncentracije radona u bunaru dubokom 17 m i 30 km udaljenog od epicentra. Tijekom tog praćenja uočene su normalne koncentracije radona od 20 kBq/m³ krajem 1993. godine. Od listopada 1994. došlo je do postupnog povećanja koncentracije radona. U listopadu koncentracije su iznosile 60 kBq/m³ što je tri puta veće nego na početku mjerenja. 7 dana prije potresa Kobe M = 7,2, točnije 10. siječnja 1995. nakon povećanja dolazi i do naglog smanjenja koncentracije radona. Nakon potresa, koncentracija radona je opet iznosila 60 kBq/m³. Do anomalije radona je došlo zbog geodinamičkih evolucija promatranog područja. Potres Kobe često se uzima kao primjer neuspjeha prethodnog predviđanja. Na Slici 19. prikazani su podaci praćenja koncentracije radona i vidljiv je nagli porast koncentracije radona u siječnju netom prije potresa [21]. Prije potresa Kobe zabilježene su anomalije radona u vodi, ali kako potresa nije bilo neko vrijeme zabilježene anomalije nisu bile snimljene. Nagli porast koncentracije radona može biti posljedica stvaranja mikropukotina u vodonosnicima, a do smanjenja koncentracije radona može doći zbog brtvljenja pukotina [3].



Slika 19. Koncentracije radona tijekom potresa Kobe [19]

U Yugano na poluotoku Izu, u svibnju 1995. godine provedeno je opsežno istraživanje o anomalijama radona u podzemnim vodama, a ispitivala se priroda anomalije radona koja se dogodila tijekom tri potresa magnitude veće od 6,5 [3].

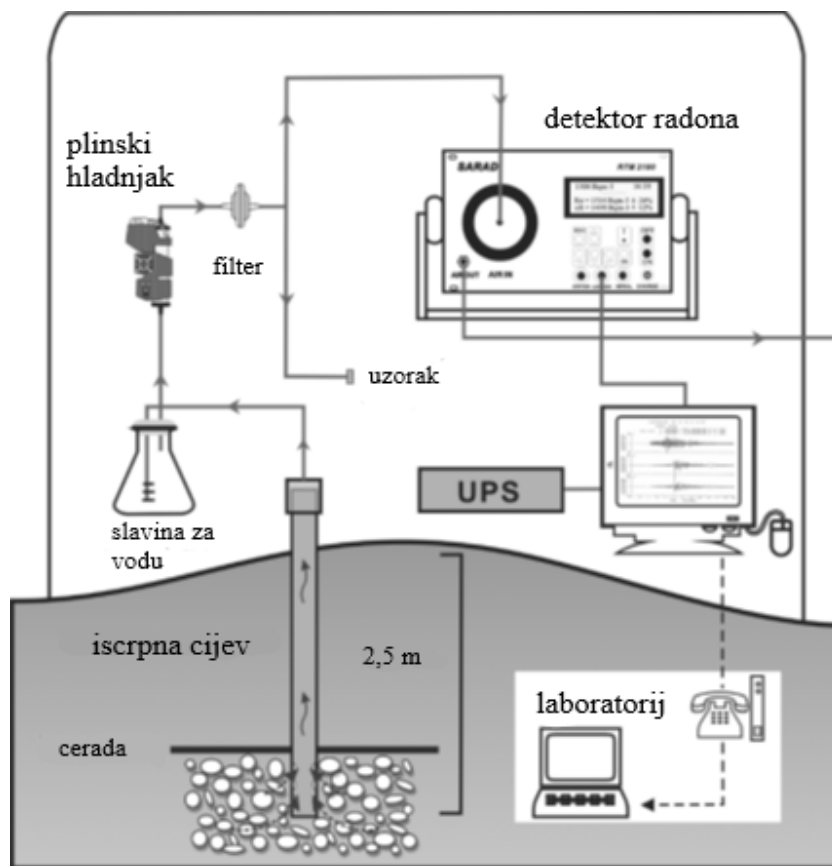
Tijekom najvećeg potresa Tōhoku koji je bio 11. ožujka 2011. godine došlo je i do velikog tsunamija sa valovima od 38 metara. Tōhoku ($M = 9$) smatra se najjačim potresom zabilježenim u Japanu od početaka snimanja potresa seizmografom. Potres je trajao 3-5 minuta, a umrlo je i nestalo otprilike 20 000 ljudi, a više od 90 % smrti uzrokovao je tsunami [42].

5.2. Tajvan

Na aktivnoj rasjednoj zoni u zapadnom Tajvanu 6. veljače 2016. godine dogodio se Meinong potres ($M = 6,6$) u gradu Kaohsiung. Dva tjedna prije potresa Meinong zapažena su značajno velike koncentracije radona u tlu na postajama: Chunglun-T1 (CL-T1), Hsinhua (HH), Pingtung (PT) i Chihshan (CS). Postaje su bile smještene na aktivnim zonama rasjeda i smatrale su se pogodnima za istraživanje potencijalnih prekursora potresa. Tijekom istraživanja znanstvenici su analizirali i uspoređivali koncentracije radona s vremenom promatranja. Neke se anomalije jasno povezuju sa Meinong potresom i nadolazećim „aftershocks“. Tijekom ovog kontinuiranog praćenja koncentracije radona u tlu bilo je vidljivo da se anomalije javljaju nekoliko dana prije potresa. Također, prilikom ovog istraživanja provedene su i statističke analize podataka kako bi se utvrdile sigurne anomalije radona u tlu. Zasigurno se može reći da je ovo jedno od uspješnih praćenja radona kao prekursora potresa. Povezane anomalije radona koje su trajale dulje vrijeme na južnim stanicama (PT i CL-T1) povezuju se kao reprezentativni prekursorski signali za Meinong potres [43].

Svaka nadzorna stanica je izgrađena tako da se iskopala rupa od dubine 2,5 m, a u rupe su se stavljale poli (vinil-kloridne) (PVC) cijevi. Na dnu PVC cijevi bila je pričvršćena mreža koja služi da neželjeni materijali ne ulaze u cijev. Oko 1 m sa svih strana dna PVC cijevi nalazi se PVC lim koji ne dozvoljava da padaline uđu u rupu. Na dno se stavlja šljunak kako bi se smanjili meteorološki učinci. Na Slici 20. prikazana je skica uspostavljenih stanica za kontinuirano praćenje koncentracije radona. Zemljin plin je nakon prolaska kroz vodu i plinski hladnjak prebačen u alfa spektroskopiju pomoću pumpe za mjerenje radona. Svakih 15 min izračunate su korigirane vrijednosti

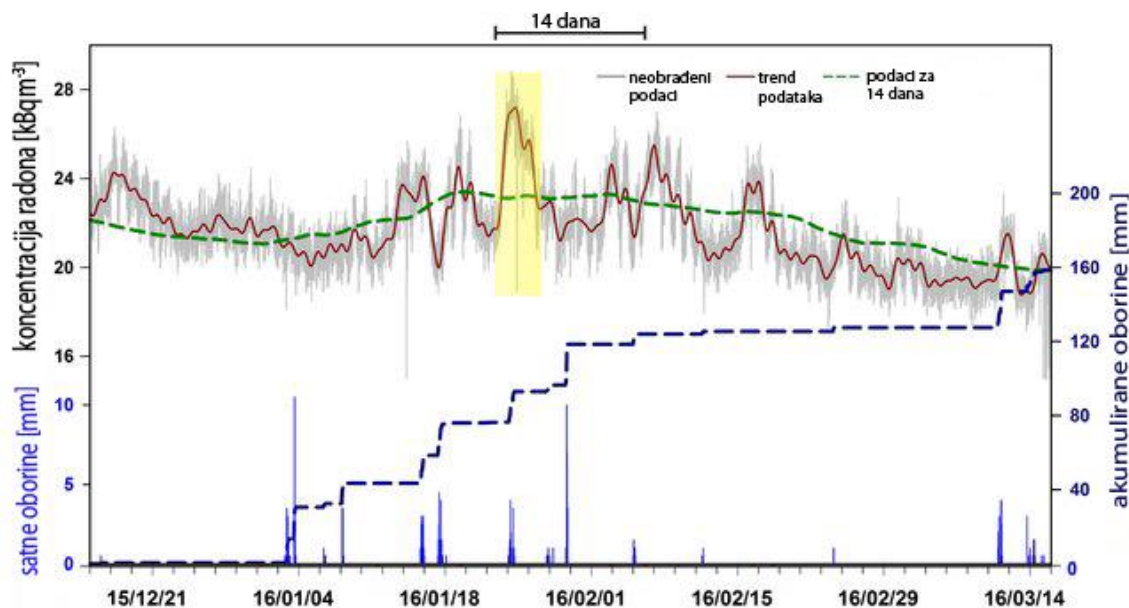
koncentracije radona. Svaka mjerna stanica je opremljena sa seizmografima, a podaci sa svih postaja provjeravaju se u stvarnom vremenu kako bi se procijenili potencijalni prekursori potresa [43].



Slika 20. Shematski prikaz mjerne stanice [43]

Kod Pingtung stanice (PT) utvrđeno je da se varijacije plina na sjevernoj stanici praćenja događaju zbog promjena naprezanja rasjeda duž Okinawa korita i Ryukyu korita. U slučaju južnog dijela Tajvana, promjene tla i plina povezane su s tektonskim aktivnostima duž Luzonskog prolaza. Uočeno je da nisu pronađeni prekursorski signali na sjevernim mjernim stanicama tijekom praćenja Meinong potresa. Većina južnih mjernih stanica je pokazala prekursorske signale prije Meinong potresa. Južna stanica za praćenje je smještena 31 km od epicentra Meinong potresa (PT stanica). Koncentracije radona su bile praćene od 15. prosinca 2015. do 15. ožujka 2016. (Slika 21.) Iz podataka je vidljivo da se u normalnim uvjetima vrijednosti koncentracije radona nalaze u intervalu $15 - 20 \text{ kBq m}^{-3}$. Vrijednosti radona počele su se povećavati 23. siječnja 2016., 14 dana prije potresa. 12 dana prije Meinong potresa, 25. siječnja, vrijednosti su se približile maksimalnim. Na Slici 23. prikazani su podaci vremenskog niza radona i podaci o

padalinama po satu. Siva linija na slici predstavlja neobrađene podatke radona, smeđa i zelena označavaju trend podataka i prosječnu koncentraciju radona od 14 dana. Žuta sijena označava trajanje anomalije radona u tlu za vrijeme Meinong potresa [43].



Slika 21. Prikaz koncentracije radona na PT stanici [43]

Stanica Hsinhua (HH) je postavljena duž istoimenog rasjeda. Nalazi se u području Tainan i mjerenje se kontinuirano provodi od studenog 2006. godine. Nadzorna stanica se nalazi otprilike 26 km od epicentra Meinong potresa što je ujedno čini najbližom stanicom epicentra. Praćenja koncentracije radona provedena su od 15. prosinca 2015. do 15. ožujka 2016. godine. Porast koncentracije radona je započeo 3. siječnja 2016. nakon što su dnevne akumulirane padaline na stanici i u blizini stanice bile veće od 20 i 70 mm. Znanstvenici su tada zaključili da postoji moguća veza između porasta pora i potresa, no ovakav slučaj nije nužan za Tajvan. Tajfun Marakot je 2009. godine donio prekomjerne količine oborina u južnom Tajvanu (3000 mm u tri dana), no nakon ovih padalina nije došlo do potresa. Svaka promjena u koncentraciji radona zbog padalina traje približno 7 do 10 dana. 6. siječnja došlo je do povećanja koncentracije radona što znanstvenici prepisuju nakupljanju naprezanja na praćenom području [43].

Na stanici Chunglun-T1 (CL-T1) praćenje radona provodilo se od 5. prosinca do 15. ožujka, a stanica je smještena oko 51 km od epicentra Meinong. Isto kao i na HH stanici povećane koncentracije radona se prepisuju obilnim kišama. Nakon ovog razdoblja visokog utjecaja oborina, porast koncentracije radona uočen je 23. siječnja 2016. godine – 14 dana prije Meinong potresa što je poprilično slično rezultatima PT

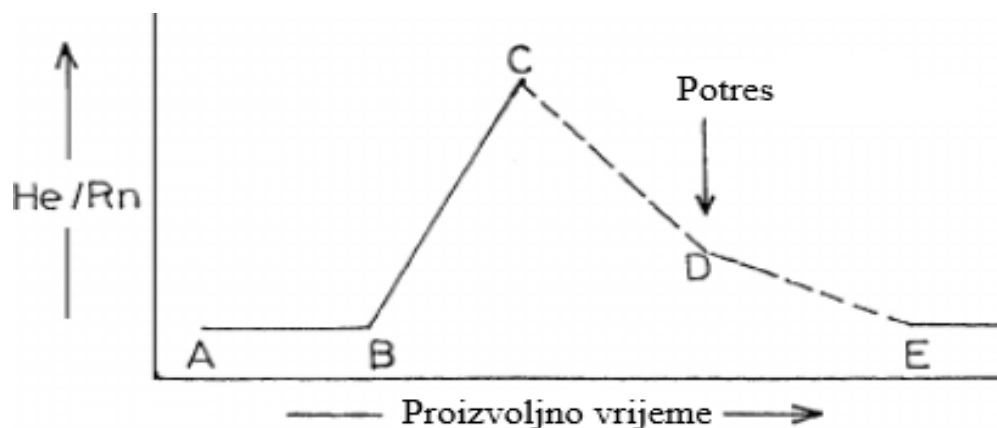
stanice. Vrijednosti koncentracije radona na svim južnim stanicama su se vratile u normalu nekoliko dana nakon potresa, kada su se „aftershocks“ počeli smanjivati [43].

CS stanica se nalazi 75 km od epicentra Meinong potresa. Mjerenje koncentracije radona na CS stanici vršilo se od 15. prosinca do 15. ožujka 2016. godine. Rast koncentracije radona je započeo 23. siječnja, a zabilježeni maksimum je bio 8 dana prije Meinong potresa, 30. siječnja 2016. Kasnije znatno povećanje koncentracije radona ukazuje na činjenicu da je raspodjela naprezanja za ovaj potres bila više na zapadnoj strani [43].

5.3. Indija

Prva značajna mjerenja koncentracije radona u Indiji provedena su u veljači 1982. godine. 14. siječnja dogodio se potres $M = 3,5$ i došlo je do povećanja koncentracije radona u tlu zbog visoke seizmičke aktivnosti. U saveznoj državi Maharashtra pojavili su se veliki potresi tijekom kolovoza 1983. i u srpnju 1984. godine. Tijekom ožujka i travnja 1984. mjerila se koncentracija radona, a tijekom tog vremena seizmičnost je naglo porasla [21].

U Palampur su mjerenja radona u tlu i podzemnim vodama provedena 1989. godine pomoću aktivnih uređaja sa scintilacijskom ćelijom. Anomalije radona u podzemnim vodama i u tlu su bile izmjerene istovremeno. Tjedni podaci su pokazali neuobičajeno ponašanje radona tijekom prvog tjedna u listopadu 1991. godine na različitim stanicama. Zabilježene anomalije bile su u korelaciji s potresom $M = 6,5$ u području Uttarakashija u listopadu 1991. U ožujku 1999. prethodio je potres Chamdi $M = 6,8$. Dva dana prije potresa Chamdi izmjerene su promjene koncentracije radona u vodi i tlu. Na Slici 22. od točke A do točke B prikazana je koncentracija helija i radona u normalnim okolnostima. Od točke B do točke C prikazan je porast koncentracije radona i helija. Od točke C do točke D prikazan je pad koncentracije radona i helija tijekom potresa, a od točke D do točke E prikazan je ponovni pad koncentracije radona i helija nakon potresa [3, 44].



Slika 22. Ovisnost koncentracije radona i helija o vremenu [44]

5.4. Slovenija

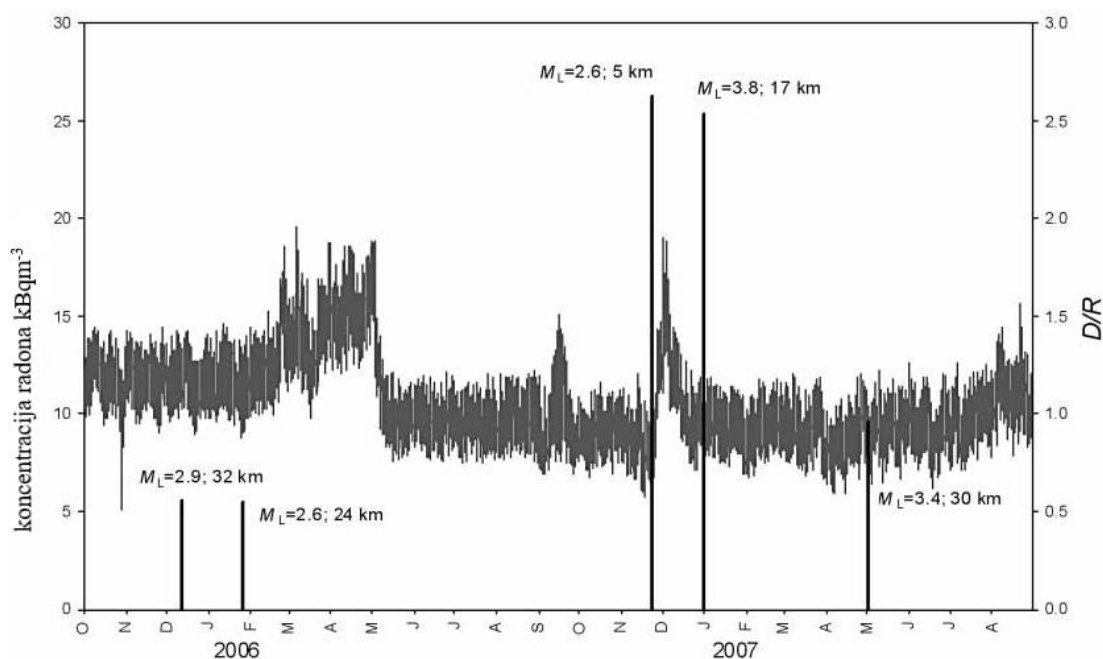
Praćenje radona u Sloveniji bilo je provedeno u termalnim i podzemnim vodama. Istraživanja su provedena 1998. godine kao nastavak prethodnog praćenja koncentracije radona povezano sa seizmičkim aktivnostima u termalnim vodama 1981. i 1982. godine. Mjerenja iz 1998. godine bila su provedena na tektonskom aktivnom području rijeke Soče gdje su istraživači kontinuirano mjerili koncentracije radona, električnu vodljivost i temperaturu na Bledu, Zatočniku i Podplatu blizu Rogaške Slatine [45].

Od 2003. do 2007. godine u selu Hotavlje 30 km južno od Bleda započela su mjerenja koncentracije radona. Koncentracije radona u vodi izmjerene su pomoću Barasolo sonde, koja prikazuje koncentracije radona pomoću alfa spektrometrije raspada radona. Osim koncentracije radona, sonda bilježi i temperaturu i tlak. Vrijednosti izmjerenih parametara pohrane se u unutarnje memorije, a zbog procjena moraju se prenijeti na računala [45].

Na Slici 23. prikazane su koncentracije radona u termalnoj vodi na Bledu i D/R omjer (omjer između radijusa naprežanja i epicentralne udaljenosti) za lokalne potrese u razdoblju od listopada 2005. do rujna 2007. godine. Vertikalne linije prikazuju potrese sa pripadajućom magnitudom (M_L) i udaljenost između nadzorne stanice i epicentra [45]. Prosječna koncentracija radona u termalnoj vodi na Bledu od listopada 2005. do rujna 2007. godine iznosi $10,5 \pm 2,1 \text{ kBq m}^{-3}$. Tijekom ovog razdoblja bilo je pet potresa u blizini Bleda. Najveći potres $M = 3,8$ dogodio se 1. siječnja 2007. godine 17 km od Bleda. Potres koji je bio najbliže Bledu (5 km), dogodio se 24. studenog 2006., a imao je

$M = 2,6$. Tijekom ovog razdoblja promatranja uočene su četiri anomalije u koncentraciji radona [45].

Prve anomalije radona na Bledu su vidljive odmah na početku mjerenja u listopadu 2005. Nakon tri dana koncentracija radona koja je iznosila $11,7 \text{ kBqm}^{-3}$ smanjila se na $5,2 \text{ kBqm}^{-3}$, što je čak 2,5 ispod prosječne vrijednosti. Ove uočene anomalije bile su 45 dana prije prvog potresa. Veće anomalije bile su uočene od veljače do svibnja 2006., a posljednje dvije uočene anomalije bile su dva mjeseca prije potresa i mjesec dana prije potresa [45].

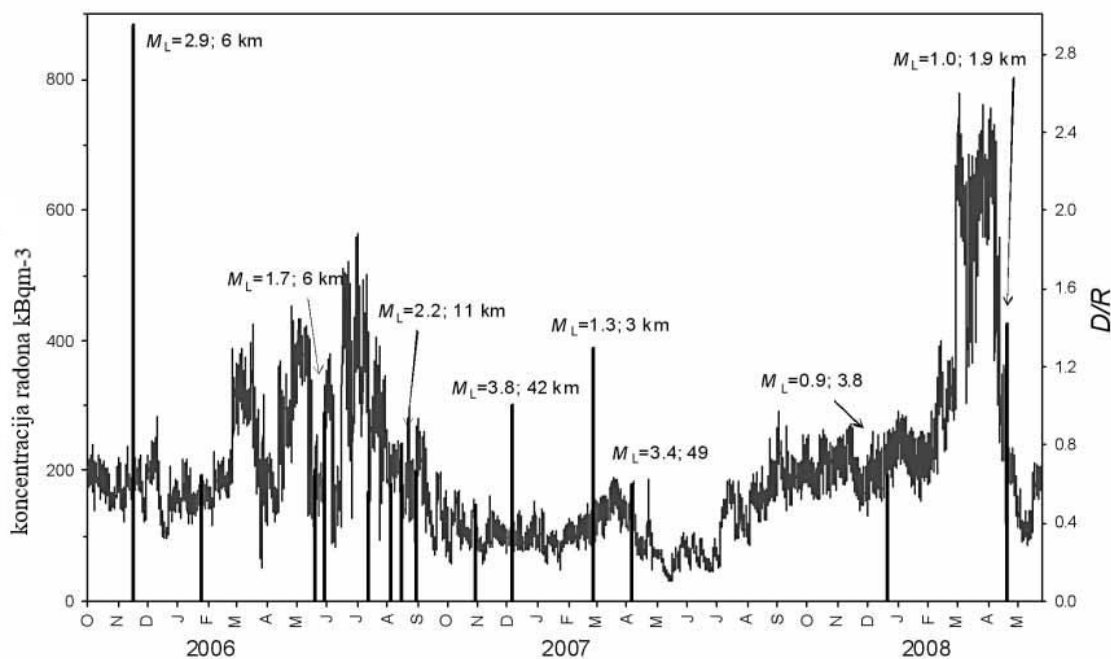


Slika 23. Koncentracije radona na Bledu [45]

Na Slici 24. prikazane su koncentracije radona u termalnoj vodi u Hotavlju i D/R omjer za lokalne potrese u razdoblju od listopada 2005. do lipnja 2007. godine. Vertikalne linije prikazuju potrese s pripadajućom magnitudom (M_L) i udaljenost između nadzorne stanice i epicentra [45]. Prosječna koncentracija radona u vodi u Hotavlju od listopada 2005. do lipnja 2006. iznosila je $197 \pm 121 \text{ kBqm}^{-3}$. Tijekom ovog razdoblja dogodila su se čak 14 potresa u blizini Hotavlja. Najveći potres, koji je bio 1. siječnja 2007. imao je $M = 3,8$, a dogodio se 42 km od Hotavlja. Najbliži potres koji je bio udaljen 1,9 km od Hotavlja bio je 17. svibnja 2008. sa $M = 1,0$ [45].

U Hotavlju od listopada 2005. do lipnja 2008. uočene su tri značajne anomalije radona. Prije prvog potresa (12. prosinca 2005.) nije bilo anomalija u koncentraciji

radona. U travnju 2006. došlo je do prvog porasta koncentracije radona, a prva anomalija radona bila je opažena u lipnju 2006. godine. Nakon tih anomalija u periodu od lipnja do rujna dogodila su se šest potresa. Druga anomalija bila je uočena u srpnju 2006. godina, pet mjeseci prije najjačeg potresa. Najveća uočena anomalija radona bila je u travnju 2008., mjesec dana prije nego se dogodio potres. Nekoliko dana nakon potresa koncentracija radona se ponovno vratila na prosječnu vrijednost [45].

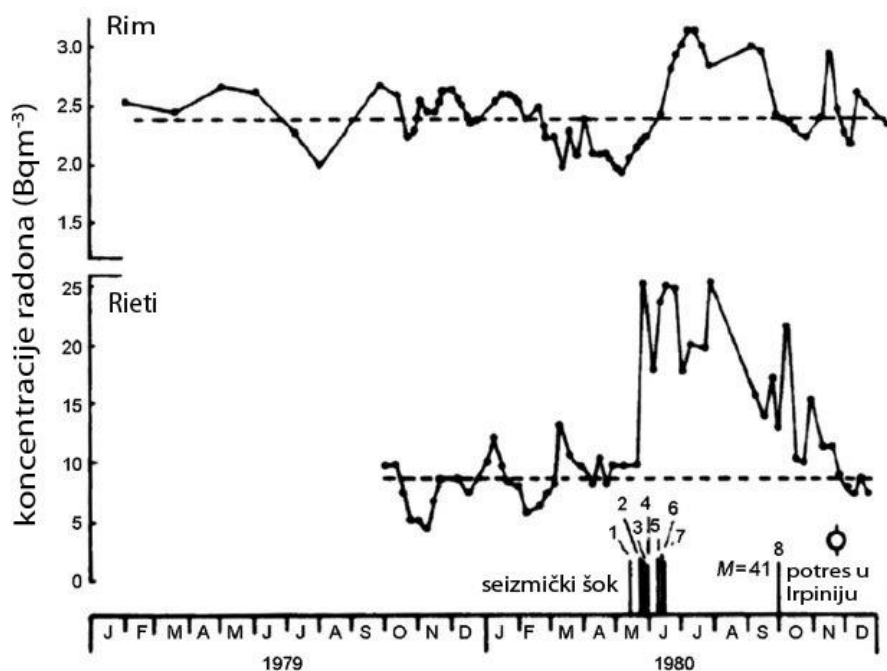


Slika 24. Koncentracije radona u Hotavlju [45]

5.5. Italija

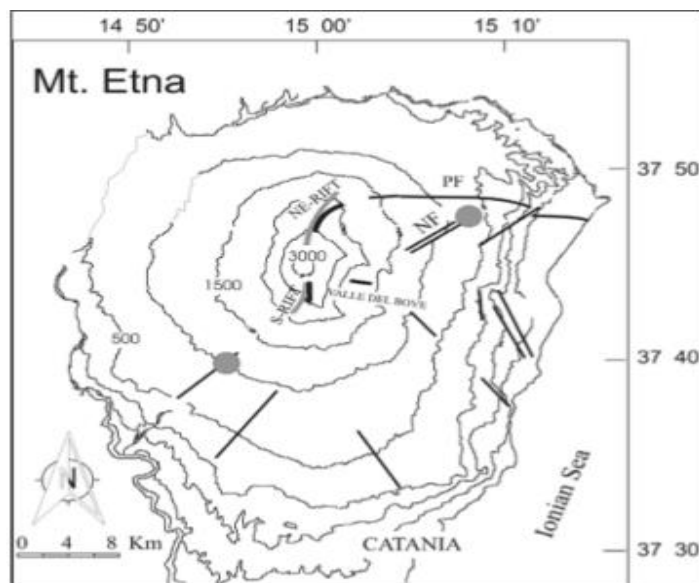
Od 1979. do 1980. godine provodila su se prva mjerenja koja su analizirala seizmičke prekursore u Italiji. Istraživanja Instituta za fiziku i Instituta geologije Sveučilišta u Rimu temeljila su se na mjerenju nagiba i razine radona u podzemnim vodama na lokacijama u središnjoj Italiji. Na početku mjerenja uočene su neobične promjene u koncentraciji radona u Rimu i Rieti (Slika 25.). Gornja krivulja prikazuje koncentraciju radona u podzemnoj vodi kod Rieta, a donja krivulja kod Rima. Vertikalne linije prikazuju seizmički šok, a njihova dužina proporcionalna je magnitudi. Kasnije, 250 km od Rima i Rietija u Irpiniju (23. studenog 1980. godine) dogodio se snažni potres $M = 6.5$. Pozitivne anomalije radona bile su zabilježene u tekućoj fazi nekih vulkana od blata, od nekoliko potresa koji su bili 1986. i 1987. na sjevernim Apeninima.

Analiziranjem podataka znanstvenici su dokazali da može postojati povezanost između velikih anomalija radona i lokalnih potresa magnituda većih od 2,5 [3].



Slika 25. Prikaz koncentracije radona u Rimu i Rieti [3]

Od 2001. godine sustavno se proučava radon kao prekursor geofizičkih događaja na Etni, na istočnoj obali Sicilije. Istražena su dva mjesta na diskontinuitetima koji leže kroz vulkan u smjeru sjeveroistoka i jugozapada. Biancavilla se nalazi na jugozapadnom boku, a Vena na sjeveroistočnom. Na Slici 26. vide se krugovi koji prikazuju mjesta gdje su bili postavljeni detektori za mjerenje radona u tlu. Kontinuirano praćenje bilo je izvedeno pomoću aktivnih uređaja u vremenskom intervalu od 10 minuta. Kako bi se smanjio utjecaj meteoroloških parametara, sonde su bile postavljene na dubini od jednog metra [3].



Slika 26. Karta Etne [21]

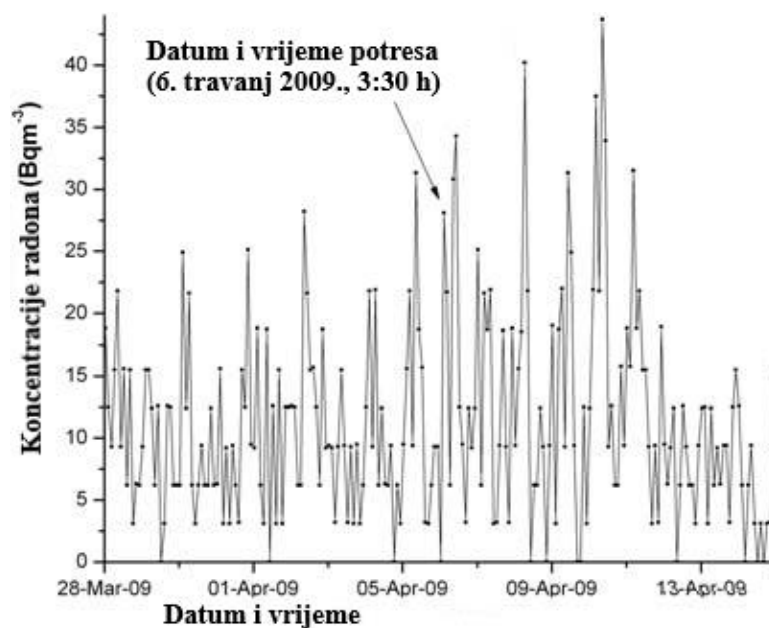
Područje Etne karakterizira velik broj potresa. Etna je jedan od najaktivnijih vulkana na svijetu i gotovo konstantno tinja. Svaki dan se dogode otprilike tisuće potresa čija magnituda rijetko prelazi magnitudu 4. Zbog tektonske i vulkanske pojave, Etna ima složenu strukturu. Tijekom istraživanja uočeno je da su koncentracije radona povezane s vulkanskom aktivnošću. 27. listopada 2002. godine prilikom praćenja koncentracije radona primijećeno je da je koncentracija radona naglo porasla. 1. studenog 2002. koncentracija radona dosegla je svoj maksimum, a tri dana kasnije razina koncentracije radona je bila na minimalnoj vrijednosti. Tijekom tog razdoblja dogodilo se nekoliko potresa magnitude veće od 3. Prilikom promatranja koncentracija radona, primijećeno je kako se koncentracije radona povećavaju kako se povećavaju i dnevni potresi koji odgovaraju početku erupcije vulkana. U listopadu su bile viđene pukotine u tlu koje su bile povezane s anomalijama radona, a takve anomalije radona su bile zabilježene kilometar od epicentra pa sve do Vena [21].

5.6. L'Aquila (Italija)

Najznačajniji potres koji povezuje radon s prekursorom potresa je potres L'Aquila koji se dogodio 2009. godine ($M = 6,3$). Tijekom potresa poginulo je otprilike 300 ljudi, tisuće ih je bilo ozlijeđeno, a više od tisuće ostalo bez domova. Nekoliko mjeseci prije potresa zabilježeno je nekoliko stotina manjih podrhtavanja pa su znanstvenici zaključili da dolazi do oslobađanja energije na rasjedima. Seizmolozi su tvrdili da oslobađanje puno

malih potresa oslobađa nakupljenu tektonsku energiju i da neće doći do potresa. Također, pojasnili su da se na temelju tih potresa ne može sa sigurnošću reći hoće li doći do velikog potres, ali da je vjerojatnost za jaki potres mala [46, 47].

Znanstvenik Giampaolo Giuliani sa Instituta za nuklearnu fiziku, mjesec dana prije potresa javno je objavljivao prognoze potresa koje je dobio tijekom mjerenja koncentracije radona. Od 27. ožujka Giuliani je pratio svoje četiri radometarske stanice koje su bile smještene u L'Aquili i oko nje. Tih dana prikazivale su se visoke i rastuće koncentracije radona. Na Slici 27. prikazane su varijacije koncentracije radona za vrijeme potresa. Vidljivo je da su od 28. ožujka koncentracije radona počele rasti, a nakon potresa došlo je do znatnog porasta radona nakon čega su se koncentracije radona naglo počele smanjivati. Giuliani je 5. travnja bio uvjeren da će u sljedećih 24 sata doći do potresa. Počeo je upozoravati ljude da dolazi do velikoga potresa te da se evakuiira područje L'Aquile. Znanstvenici iz Nacionalnog instituta za geofiziku i vulkanologiju su zabranili širenje nepouzdana informacije jer metoda mjerenja koncentracije radona ne pruža točnu mogućnost predviđanja potresa. Nakon potresa, znanstvenike je tužilo 29 obitelji te su bili proglašeni krivima. Naime, do promjena u koncentraciji radona bilo u tlu ili u vodi može doći zbog poremećaja u okolišu kao što su crpljenje podzemne vode ili promjene u vremenu poput obilnih kiša. Većina geologa i seizmologa će se složiti da ne postoji ni jedan pouzdan pokazatelj prekursor potresa, no to ne znači da takva istraživanja i iskustva nisu korisna za daljnje spoznaje [46, 47, 48].



Slika 27. Koncentracije radona tijekom potresa L'Aquila [49]

6. ZAKLJUČAK

Mjerenja koncentracije radona provode se na aktivnim zonama rasjeda u vodi ili u tlu sa svrhom dokazivanja da prostorne i vremenske varijacije mogu pružiti informacije o geodinamičkim događajima. Prva mjerenja radona kao seizmičkog prekursora datiraju iz 1927. godine, a prvo mjerenje koncentracije radona u podzemnoj vodi, koje je potaknulo kasnija istraživanja, bilo je 1966. godine, prije potresa u Taškentu u Uzbekistanu. Mjerenja koncentracije radona pokazala su da se visoke koncentracije radona mogu povezati s tektonskim poremećajima u Zemljinoj kori. Velik dio analiziranih podataka ukazuje na činjenicu da vrijeme i trajanje prekursora imaju poveznicu s porastom magnitude. Od 1927. godine pa do danas provedena su razna istraživanja, no još uvijek nije pronađena točna povezanost anomalija radona i seizmičke aktivnosti odnosno ne može se sa sigurnošću potvrditi da je radon prekursor potresa. Mjerenja koncentracija radona u Japanu, Tajvanu, Indiji, Sloveniji i Italiji ukazuju da bi radon mogao biti potencijalni prekursor potresa iako u Turskoj nije utvrđena povezanost između koncentracije radona i seizmičke aktivnosti. Istraživanjima se utvrdilo da radon kao prekursor nema značajniju ulogu kod slabih potresa pa su dakako od velike značajnosti daljnja istraživanja koja bi pomogla predviđanju potresa, kako u svijetu tako i u Hrvatskoj, pomoću mjerenja koncentracije radona.

7. LITERATURA

- [1] Singh, M., Kumar, M., Jain, R.K., Chatrath, R.P., Radon in ground water related to seismic events, *Radiation Measurements* 30. 1999, pp. 465-469
- [2] Radon. Prirodni, radioaktivni plin bez mirisa i okusa. Dostupno na: <http://radon.dzrns.hr/o-radonu/>. Datum pristupa: 18.02.2020.
- [3] Riggio A., Santulin M. Earthquake forecasting: a review of radon as seismic precursor. *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*. 2015. Vol. 56, n. 2, pp. 95-114
- [4] Marley M. Kako nastaje radioaktivnost? Dostupno na: <https://geek.hr/e-kako/znanost/kako-nastaje-radioaktivnost/>. Datum pristupa: 18.02.2020.
- [5] Proleksis enciklopedija. Atom. Dostupno na: <https://proleksis.lzmk.hr/9825/>. Datum pristupa: 18.02.2020.
- [6] Građa atoma. Dostupno na: <https://edutorij.e-skole.hr/share/proxy/alfresco-noauth/edutorij/api/proxy-guest/9948b293-e5f0-4e05-b7e1-5cb6bc02b81a/kemija-1/m02/j01/index.html>. Datum pristupa: 18.02.2020.
- [7] Radioaktivnost. Dostupno na: <http://radioaktivniotpad.org/radioaktivnost/>. Datum pristupa: 18.02.2020.
- [8] Enciklopedija. Radioaktivnost. Dostupno na: <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=51474>. Datum pristupa: 18.02.2020.
- [9] Gaverić I., Mjerenje radona u zraku na području grada Velike Gorice i okolnih općina/diplomski rad, Osijek: Sveučilište Josipa Juraja Strossmayera u Osijeku, odjel za fiziku, 2011., str: 7-10
- [10] Antineutrino. Dostupno na: <https://www.nuclear-power.net/nuclear-power/reactor-physics/atomic-nuclear-physics/fundamental-particles/antineutrino/>. Datum pristupa: 18.02.2020.
- [11] Neutrino. Dostupno na: <https://www.scientificamerican.com/article/what-is-a-neutrino/>. Datum pristupa: 18.02.2020.
- [12] Struna. Elektronski uhvat. Dostupno na: <http://struna.ihjj.hr/naziv/elektronski-uhvat/11749/>. Datum pristupa: 18.02.2020.

[13] Jurišić D., Mjerenje radona u Virovitičko – podravskoj županiji, diplomski rad, Osijek: Sveučilište Josipa Juraja Strossmayera u Osijeku, odjel za matematiku, 2010., str: 17

[14] Srcaltufeovo, Osnovna jednadžba radioaktivnog raspada. Zakon radioaktivnog raspada. Radioaktivna ravnoteža. Kvatifikacija radioaktivnosti i njegovih jedinica. Dostupno na: <https://srcaltufevo.ru/hr/osnovnoe-uravnenie-radioaktivnogo-raspada-zakon-radioaktivnogo.html>. Datum pristupa: 27.3.2020.

[15] Loveland W.D., Morrissey D.J., Seaborg G.T. Modern Nuclear Chemistry, Second Edition, 2006., ch.3 Radioactive decay kinetics, pp. 57 - 91

[16] Part community, Radon. Dostupno na: https://b2b.partcommunity.com/community/knowledge/hr/detail/3207/Radon#knowledge_article. Datum pristupa: 20.02.2020.

[17] Nuclear Forensic Search Project. Decay chains. Dostupno na: <http://metadata.berkeley.edu/nuclear-forensics/Decay%20Chains.html>. Datum pristupa: 18.04.2020.

[18] Physics open lab. Some Alpha and Beta Spectra. Dostupno na: <http://physicsopenlab.org/2016/11/05/some-alpha-spectra/>. Datum pristupa: 8.05.2020.

[19] Immé G., Morelli D., Radon as Earthquake Precursor, Earthquake Research and Analysis - Statistical Studies, Observations and Planning, 2012., pp. 144 – 157

[20] Risica S., Bochicchio F., Nuccetelli C., Thorium-234 the less known decay chain. Dostupno na: https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/thorium_232_-_the_less_known_decay_chain.pdf. Datum pristupa: 8.05.2020.

[21] Tomer A., Radon as a Earthquake Precursor: A Review. International Journal of Science, Engineering and Technology, 2016., Vol. 4, Issue 6, pp. 815 – 822

[22] RH, Ministarstvo unutarnjih poslova, Ravnateljstvo civilne zaštite. Radon. Dostupno na: <https://civilna-zastita.gov.hr/podrucja-djelovanja/radioloska-i-nuklearna-sigurnost/sluzba-za-nuklearnu-sigurnost/odjel-za-okolis-i-radioaktivni-otpad/radon/176>. Datum pristupa: 22.02.2020.

- [23] Amrane M., Determination for levels of uranium and thorium in water along Oum Er-Rabia river using alpha track detectors. Journal of Radiation Research and Applied Sciences, 2017., Vol. 10, pp 1 – 6
- [24] Steinhauser G., Buchtela K., Handbook of Radioactivity Analysis (Third Edition), 2012.,ch.3 Gas Ionization Detectors, pp. 194 – 199
- [25] Family handyman. What is Radon and How to Test For It. Dostupno na: <https://www.familyhandyman.com/smart-homeowner/home-safety-tips/what-is-radon/>. Datum pristupa: 27.03.2020.
- [26] Pylon. Scintillation Cell Contamination. Dostupno na: <https://pylonelectronics-radon.com/2016/08/30/scintillation-cell-contamination/>. Datum pristupa: 27.03.2020.
- [27] Enciklopedija. Potres. Dostupno na: <https://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=49792>, datum pristupa: 22.02.2020.
- [28] Potresi. Dostupno na: https://www.pmf.unizg.hr/_download/repository/2_POTRESI_%281.dio%29.pdf, datum pristupa: 23.03.2020.
- [29] Tandarić N., Skripta iz Opće geomorfologije za studente Prirodoslovno – matematičkog fakulteta Zagreb, 2010.
- [30] Shtreber. Litosferne ploče. Dostupno na: <https://www.shtreber.com/Litosferne-ploce>. Datum pristupa: 19.05.2020.
- [31] Kos-Modor J, Jurkin E. Rasjedi. KoG [Internet]. 2004 [pristupljeno 31.05.2020.];8.(8.):17-20. Dostupno na: <https://hrcak.srce.hr/3709>
- [32] Faults, Earthquakes, and Landscapes. Geology cafe. Dostupno na: <https://geologycafe.com/earthquakes/index.html>. Datum pristupa: 31.05.2020.
- [33] Geofizički odsjek. Seizmološki pojmovnik. Dostupno na: https://www.pmf.unizg.hr/geof/seizmoloska_sluzba/seizmoloski_pojmovnik. Datum pristupa: 18.04.2020.
- [34] Meaški H., Skripta iz Inženjerske geologije za studente inženjerstva okoliša. Geotehnički fakultet Varaždin, ak. god. 2018./2019.

- [35] Volcano discovery. How much energy does an earthquake release? Dostupno na: <https://www.volcanodiscovery.com/earthquakes/energy.html>. Datum pristupa: 8.05.2020.
- [36] USGS science for changing world. Foreshocks, aftershocks - what's the difference? Dostupno na: https://www.usgs.gov/faqs/foreshocks-aftershocks-whats-difference?qt-news_science_products=0#qt-news_science_products. Datum pristupa: 18.04.2020.
- [37] Prirodoslovno - matematički fakultet. O zagrebačkom potresu 2020. dostupno na: https://www.pmf.unizg.hr/geof/seizmoloska_sluzba/o_zagrebackom_potresu_2020. datum pristupa: 19.04.2020.
- [38] Prirodoslovno matematički fakultet, Sveučilište u Zagrebu. Odgovori na pitanja o potresima. Dostupno na: https://www.pmf.unizg.hr/geof/seizmoloska_sluzba/o_potresima/odgovori_na_pitanja_o_potresima. Datum pristupa: 8.05.2020.
- [39] Savić, A. Proaktivne mere zaštite od zemljotresa. U: , ur. Zbornik radova Fakulteta tehničkih nauka, Novi Sad, 2019., str.1470-1473
- [40] Planinić J., Radolić V., Vuković B., Radon as an earthquake precursor. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 2004., Vol. 530, Issue 3, pp. 568–574
- [41] Wakita H., Nakamura Y., Notsu K., Noguchi M., Asada T., Radon Anomaly: A Possible Precursor of the 1978 Izu-Oshima-kinkai Earthquake. Science, 1980., Vol. 207, Issue 4433, pp. 882-883
- [42] World vision. 2011 Japan earthquake and tsunami: Facts, FAQs, and how to help. Dostupno na: <https://www.worldvision.org/disaster-relief-news-stories/2011-japan-earthquake-and-tsunami-facts>, datum pristupa: 04.03.2020.
- [43] Fu C., Walia V., Yang T.F., Lee L., Liu T., Chen C., Kumar A., Lin S., Lai T., Wen K., Perseismic anomalies in soil-gas radon associated with 2016 M 6.6 Meinong earthquake, Southern Taiwan, 2017., Vol. 28, No. 5, pp.787 – 798
- [44] Virk H., Walia V., Helium/radon precursory signals of Chamoli Earthquake. Radiation Measurements, 2001., Vol. 34, Issues 1 – 6, pp. 379-384

- [45] Gregorič A, Zmazek B, Vaupotič J. Radon Concentration in Thermal Water as an Indicator of Seismic Activity. Collegium antropologicum [Internet]. 2008 [pristupljeno 12.05.2020.];32 - Supplement 2(2):95-98. Dostupno na: <https://hrcak.srce.hr/34548>
- [46] Novilist. Znanstvenici idu u zatvor zbog potresa: Italija se sjetila mračne sudbine Galilea Galilei. Dostupno na: http://www.novilist.hr/Vijesti/Svijet/Znanstvenici-idu-u-zatvor-zbog-potresa-Italija-se-sjetila-mracne-sudbine-Galilea-Galileia?meta_refresh=true, datum pristupa: 04.03.2020.
- [47] Laik-a-skeptik. Predvidi nepredvidivo, ili ćeš u zatvor! Dostupno na : <https://laikaskeptik.wordpress.com/2011/06/12/predvidi-nepredvidivo-ili-ce-u-zatvor/>, datum pristupa: 04.03.2020.
- [48] The Guardian. The man who predicted an earthquake. Dostupno na: <https://www.theguardian.com/world/2010/apr/05/laquila-earthquake-prediction-giampaolo-giuliani>. Datum pristupa: 18.04.2020.
- [49] Anicin I., Dragić A., Joković D., Udovičić V., Radon time-series analysis in the underground low-level laboratory in Belgrade, Serbia, Radiation Protection Dosimetry, 2011., Vol. 145, No. 2-3, pp.155 – 158

8. POPIS SLIKA

Slika 1. Građa atoma [6]

Slika 2. α -raspad [9]

Slika 3. β -raspad [9]

Slika 4. Slika 4. γ -raspad [9]

Slika 5. Graf funkcije radioaktivnog raspada [14]

Slika 6. Odnos vremena poluraspada [15]

Slika 7. Lanac radioaktivnog raspada torija [17]

Slika 8. Lanac radioaktivnog raspada ^{226}Ra [17]

Slika 9. Prikaz plastičnog detektora nuklearnih tragova [23]

Slika 10. Elektronska komora [24]

Slika 11. Prikaz kanistra s aktivnim ugljenom za detekciju radona [25]

Slika 12. Industrijski detektor sa Lukasovom ćelijom [26]

Slika 13. Prikaz epicentra i hipocentra potresa [28]

Slika 14. Tipovi granica [30]

Slika 15. Vrste rasjeda [32]

Slika 16. P-val [33]

Slika 17. SV-val i SH-val [33]

Slika 18. Rayleigh-jev i Love-ov val [32-33]

Slika 19. Koncentracije radona tijekom potresa Kobe [19]

Slika 20. Shematski prikaz mjerne stanice [43]

Slika 21. Prikaz koncentracije radona na PT stanici [43]

Slika 22. Ovisnost koncentracije radona i helija o vremenu [44]

Slika 23. Koncentracije radona na Bledu [45]

Slika 24. Koncentracije radona u Hotavlju [45]

Slika 25. Prikaz koncentracije radona u Rimu i Rieti [3]

Slika 26. Karta Etne [21]

Slika 27. Koncentracije radona tijekom potresa L'Aquila [50]

9. POPIS TABLICA

Tablica 1. Raspad ^{222}Rn [20]

Tablica 2. Raspad ^{220}Rn [20]

Tablica 3. Intenzitet potresa prema Mercallijevoj ljestvici [29]

Tablica 4. Intenzitet potresa prema Richerovoj skali [29, 34]