



UNIVERZITET U NOVOM
SADU PRIRODNO-
MATEMATIČKI FAKULTET



**Razvoj i primena brze metode pripreme
uzoraka za detekciju radijuma u
mineralnim vodama gama-
spektrometrijskom metodom**

- master rad -

Mentor:
doc. dr Sofija Forkapić

Student:
Aleksandar Vuković

Novi Sad, 2023

Ovom prilikom želim da se zahvalim svom mentoru dr Sofiji Forkapić na izdvojenom vremenu, divnoj saradnji i svemu što sam naučio tokom izrade ovog master rada, a što će mi sasvim sigurno koristiti u budućnosti. Veliku zahvalnost dugujem i Danijelu Velimiroviću i dr Janu Hansmanu na pomoći tokom pripreme uzoraka, merenja i obrade gama spektara u Laboratoriji za ispitivanje radioaktivnosti uzoraka i doze jonizujućeg i nejonizujućeg zračenja. Takođe se zahvaljujem svim ostalim zaposlenim na Katerdri za nuklearnu fiziku, kako za usvojeno znanje tako i za prijatnu atmosferu i pomoć u raznim prilikama. Kolegama sa Fakulteta tehničkih nauka zahvaljujem se na razumijevanju i motivaciji koju su mi pružili. Ipak, najveću zahvalnost dugujem mojim najbližima koji su me podržavali iz dana u dan da uspem u svom cilju. Hvala!

Aleksandar Vuković, septembar 2023.

Sadržaj

1. Teorijski deo.....	2
1.1. Radioaktivnost.....	2
1.1.1. Alfa raspad	2
1.1.2. Beta raspad	3
1.1.3. Gama raspad	3
1.2. Zakon radioaktivnog raspada	4
1.3. Aktivnost	5
1.4. Radioaktivni nizovi	6
1.5. Sekularna radioaktivna ravnoteža.....	8
1.6. Podela radionuklida prema poreklu.....	10
1.7. Radionuklidi u vodi	11
1.7.1. Radon.....	13
1.7.2. Radijum u vodi	16
1.7.3. Uranijum u vodi.....	18
1.8. Uticaj geologije na radioaktivnost vode	18
1.8.1. Litologija	20
1.9. Radijacioni rizik od izlaganja jonizujućem zračenju.....	20
1.10. Radijacioni rizik od prisustva radona u vodi	23
2. Ispitivano područje	25
2.1. Geološke karakteristike Bosne i Hercegovine.....	25
2.2. Mineralni i termomineralni izvori	28
2.2.1. Izvori u BiH.....	29
2.2.2. Izvori u Podrinju.....	30
3. Metodologija merenja.....	34
3.1. Gama spektrometrija	34
3.2. Aktivni radonski detektor RAD7.....	35
4. Gama spektrometrijsko određivanje radijuma u vodi primenom jonoizmenjivačkih smola	38
4.1. Metode pripreme uzoraka.....	38
4.1.1. Određivanje minimalne granice detekcije MDA za različite pripreme uzoraka vode.....	40
5. Rezultati merenja i diskusija	42
6. Zaključak	54
Literatura:	55
Kratka biografija autora.....	59
Ključna dokumentacijska informacija	60

1. Teorijski deo

1.1. Radioaktivnost

Radioaktivnost kao pojava otkrivena je 1896. godine od strane naučnika Henri Becquerel i Marie Curie, u eksperimentima s fosforescentnim materijalima. Istražujući luminiscenciju Henri Becquerel je slučajno otkrio - zahvaljujući tome što je nekoliko dana bilo oblačno i što je komad filma zajedno s uzorcima minerala koji su sadržavali uran ostao zatvoren u ladici stola - da uran spontano zrači. Uranove soli prouzrokovale su zacrnjenje ploče iako je ploča bila umotana u crni papir. Ta su zračenja dobila naziv "Bekerelovi zraci" (Brodsky, 1978).

Isprva se činilo kao da je novo zračenje slično tada nedavno otkrivenim rendgenskim zracima. Dalja istraživanja Becquerela, Ernesta Rutherforda, Paula Villarda, Pierrea Curiea, Marie Curie i drugih pokazala su da je ovaj oblik radioaktivnosti znatno komplikovaniji. Rutherford je prvi uočio da se svi takvi elementi raspadaju u skladu s istom matematičkom eksponencijalnom formulom. Rutherford i njegov učenik Frederick Soddy su shvatili da su mnogi procesi raspadanja rezultirali transmutacijom jednog elementa u drugi. Nakon toga, Fajansov i Sodijev zakon radioaktivnog pomaka je formulisan da opiše produkte alfa i beta raspada. Maria i Pierre Curie su ispitivali različite elemente kako bi našli slične efekte. Naime, rezultat ovih pokušaja je doveo do zaključka da i torijum pokazuje slična svojstva uranijumu. Kasnije dolaze do saznanja da u rudi uranijuma (takozvana pehblend) postoje i daleko aktivniji elementi, te je otkriven polonijum i radijum. Proučavanje radioaktivnosti Marie i Pierrea Curieja važan je faktor kako u nauci tako i u medicini. Njihovo istraživanje radijuma moglo bi se smatrati prvom mirnom upotrebom nuklearne energije i početkom moderne nuklearne medicine.

Od prvih otkrića, pa do danas, interes naučnika za radioaktivnost, radioaktivne elemente i njihovu primenu stalno raste. Svet u kome živimo je radioaktivan od svog postanka. Radionuklidi (radioaktivni elementi) se nalaze svuda oko nas, a i u nama, te ih možemo pronaći u zemlji, zraku, vodi, hrani, a time i u svim živim bićima. Po tome kako su nastali dele se na one koji su oduvek prisutni na Zemlji, one koji nastaju kao posledica delovanja kosmičkih zraka i one koji su posledica ljudske tehnologije.

Proces u kojem dolazi do spontane transformacije jezgra kojom prilikom ono menja svoj sastav ili energetska stanje predstavlja radioaktivnost. Sastav jezgra se menja ukoliko ono doživi alfa ili beta raspad. Prilikom alfa raspada dolazi do emisije čestice koja se sastoji od dva protona i dva neutrona, baš kao i jezgro atoma helijuma. Jedan od načina raspada nestabilnih jezgara iz grupe beta emitera je emisija negativne beta čestice koja nije ništa drugo nego elektron. I alfa i beta raspad bivaju praćeni emisijom gama zračenja koje je elektromagnetne prirode. Nakon radioaktivnog raspada stvoreno jezgro može biti u pobuđenom stanju, a na osnovno energetska stanje najčešće prelazi emisijom gama zračenja. Svakako, najznačajnija činjenica jeste da je radioaktivnost spontani proces i na nju se ne može uticati spoljašnjim faktorima, kao što su temperatura, pritisak, vlažnost vazduha i slično. Uobičajeno je da se jezgro koje se raspada naziva predak, dok se jezgro koje putem radioaktivnog raspada nastaje naziva potomak. Jezgro potomak, nastalo alfa raspadom u odnosu na pretka ima dva protona manje, a maseni broj mu je manji za četiri. Prilikom emisije negativne beta čestice ne menja se maseni broj, ali potomak poseduje jedan proton više i jedan neutron manje u odnosu na pretka. Kod izomera ne dolazi do promene sastava jezgra pošto ne dolazi do emisije čestice, emituje se samo gama zračenja koje menja samo energetska stanje jezgra (Krmar, 2013).

1.1.1. Alfa raspad

Alfa raspad se najčešće javlja u masivnim jezgrima s prekomernim odnosom protona naspram neutrona. Ovaj raspad rezultuje promenom atomske mase i rednih brojeva jezgara, što znači da prilikom raspada nastaju novi hemijski elementi.

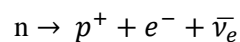
Čestice koje se oslobađaju pri alfa raspadu su α -čestice, odnosno jezgra atoma helijuma. Ove čestice izlaze iz jezgra s velikom brzinom i prilikom prolaska kroz materiju vrše jonizaciju atoma. Zbog velike jonizacione moći, α -čestice brzo gube energiju i imaju ograničenu dubinu prodiranja u materiji, odnosno domet.

Zbog kratkog dometa u materiji, ova zračenja predstavljaju opasnost samo za površinske slojeve tkiva kada dolaze izvan organizma. Za njihovu zaštitu, dovoljno je koristiti relativno tanke slojeve zaštitnog materijala poput stakla, pleksiglasa, papira i slično. Međutim, kada su u pitanju unutrašnja izlaganja ovom tipu zračenja, situacija je drugačija. Alfa zraci, usled visoke jonizacije koju izazivaju, postaju izuzetno opasan izvor jonizujućih zračenja (Damnjanović, 1962).

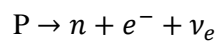
1.1.2. Beta raspad

Beta raspad je radioaktivni raspad u kome se proton u jezgru transformiše u neutron (ili obrnuto). Dakle, A je konstantno, ali se Z i N menjaju za 1, a to znači da se atomsko jezgro pretvori u novi hemijski element, koji je sledeći ili prethodni redni broj u periodnom sistemu elemenata.

Poznate su dve vrste beta raspada, a to su beta plus raspad (β^+) i beta minus raspad (β^-). Beta minus raspad nazivamo još i elektronskim zračenjem. Kod te vrste raspada nestabilna atomska jezgra koja imaju višak neutrona mogu spontano ostvariti raspad, gde se neutron raspada u proton, uz zračenje elektrona i antineutrina (elektronski antineutrino ili antičestica neutrina).



Beta minus raspad nastaje zbog delovanja slabe nuklearne sile. Taj postupak se obično javlja u nuklearnim reaktorima, ako u nuklearnom gorivu ima nestabilnih atomskih jezgara s viškom neutrona. Kod beta plus raspada ili pozitronskog zračenja nestabilna atomska jezgra koja imaju višak protona mogu spontano ostvariti raspad, gdje se proton raspada u neutron, uz zračenje pozitrona (antičestice elektrona) i neutrina.



Beta (plus) raspad se može dogoditi samo unutar atomskog jezgra u kojem je nuklearna energija vezivanja novonastalog hemijskog elementa ili izotopa veća od nuklearne energije vezivanja hemijskog elementa iz kojeg je radioaktivni raspad započeo.

Sva ispitivanja su pokazivala da se β - zraci ponašaju slično kao i katodni zraci. Te se moglo pretpostaviti da je njihova priroda ista. Kako bi dokazala sličnost između β i katodnih zraka, Becquerel je izmerio otklon zraka u električnom i magnetnom polju, te na temelju toga odredio njihovu brzinu kao i naelektrisanje. Prema Becquerelu, "ovi rezultati su potpuno iste veličine kao i za katodne zrake." Naknadni rad je pokazao da su β - zraci istovetni katodnim zracima struja brzih elektrona (Grasty, 2004).

Domet β - čestica u vazduhu je oko 100 puta veći od dometa α - čestica. Zanimljivo je da β -čestice slabije jonizuju gas. Njihov je trag na fotografskoj ploči mnogo tanji i duži, pa se po tome lako prepoznaju.

1.1.3. Gama raspad

Gama raspad je treći tip radioaktivnog raspada i za razliku od alfa i beta raspada malo specifičniji. Kod gama raspada ne dolazi do strukturne transformacije jednog jezgra u drugo, već je gama raspad jedna vrsta emisije gama zraka. Ponekad jezgra, nakon emisije α ili β čestica, ostanu u pobuđenom stanju. To je stanje u kojem je energija jezgra veća od osnovnog stanja. U tom slučaju, jezgra će spontano prelaziti u stanja niže energije sve do osnovnog. Pri tim prelazima jezgro emituje elektromagnetne talase. Ovu emisiju gama fotona nazivamo γ zračenje. Gama zraci su fotoni, prema

tome, nemaju električno naelektrisanje i kreću se brzinom svetlosti. Sposobnost jonizacije manja je od alfa i beta zračenja. Domet u vazduhu im je od nekoliko desetina metara do par kilometara. Gama zraci su najprodorniji, te su zato potrebni debeli ili gusti zaštitni slojevi, kao olovo, olovno staklo, gvožđe, beton i sl.

1.2. Zakon radioaktivnog raspada

Kao što je rečeno radioaktivni raspad jezgra ne zavisi od spoljašnjih uticaja. Za atom koji se raspada, nevažno je nalazi li se pored njega još jedan takav raspadajući atom. Iako je neizvesno kada će se pojedini atom raspasti, ipak se u jedinici vremena raspadne približno isti postotak atoma. To znači da u određenom vremenskom intervalu svaki atom ima mogućnost raspada pa je zbog toga radioaktivni raspad slučajni događaj. Verovatnoća raspada određena je isključivo prirodom procesa koji se u njemu odvijaju i može se za dati izotop smatrati konstantom. Upravo zbog toga uvedena je veličina koja se naziva konstanta radioaktivnog raspada, a predstavlja verovatnoću da se neko jezgro raspadne u jedinici vremena. Precizna merenja su pokazala da je konstanta radioaktivnog raspada karakteristika svakog pojedinačnog radioizotopa, a eksperimentalno se može odrediti kao što je dato u (Krmar, 2013):

$$\lambda = \frac{\left[\frac{\Delta N}{\Delta t} \right]}{N} \quad 1.1.$$

gde je sa ΔN označen broj jezgara koji se raspao u vremenskom intervalu Δt , a N predstavlja ukupan broj radioaktivnih jezgara u posmatranom uzorku u početnom trenutku. Dakle numerička vrednost od λ izražava statističku verovatnoću raspada svakog pojedinačnog atoma u grupi identičnih atoma u jedinici vremena.

Raspadne li se dN atoma neke supstance u vremenskom intervalu dt , onda je taj broj dN proporcionalan i broju N neraspadnutih atoma i vremenskom intervalu dt . Kako se broj N smanjuje može se napisati:

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N \quad 1.2.$$

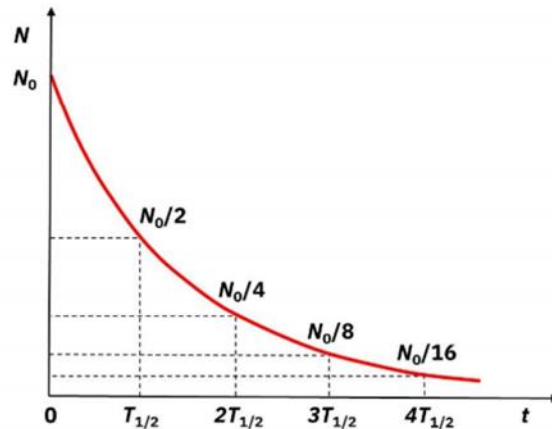
Postupnim rešavanjem ove jednačine dobijamo:

$$-dN = \lambda N dt \quad 1.3.$$

Negativan predznak pridodat čitavoj relaciji govori o tome da se krajnji broj jezgara smanjuje u odnosu na početni i to mu je jedini fizički smisao. Nakon integracije relacije 1.3. dobija se:

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad 1.4.$$

pri čemu je N_0 početni broj jezgara, odnosno u trenutku $t = 0$, dok je N broj preostalih neraspadnutih jezgara nakon proteklog vremena t . Ovo je eksponencijalni zakon radioaktivnog raspada koji reprezentuje činjenicu da broj nestabilnih jezgara opada eksponencijalno sa vremenom. Grafik zavisnosti N u funkciji vremena t prikaz je na slici 1.1



Slika 1.1 Grafički prikaz broja nestabilnih jezgara N u funkcija vremena t .

Vreme za koje broj atoma padne na polovicu početne vrednosti naziva se vreme poluraspada $T_{1/2}$. Vreme poluraspada je povezano s konstantom raspada na način:

$$\frac{1}{2} = e^{-\lambda T_{1/2}} \quad 1.5.$$

Logaritmovanjem se dobija izraz za period poluraspada koji izgleda:

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad 1.6.$$

Period poluraspada spada u osnovne veličine koje moraju biti poznate za svaki radioaktivni element.

1.3. Aktivnost

Broj jezgara koji se raspadne u jedinici vremena se naziva aktivnost uzorka (A) (Mrđa & Bikit, 2016). Koristeći jednačinu radioaktivnog raspada aktivnost se po definiciji može izraziti na sledeći način:

$$A = -\frac{dN}{dt} = \lambda \cdot N \quad 1.7.$$

Množenjem leve i desne strane zakona radioaktivnog raspada konstantom radioaktivnog raspada, dobija se vremenska zavisnost aktivnosti, odakle vidimo da je i aktivnost takođe eksponencijalna funkcija od vremena:

$$A = A_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad 1.8.$$

Jedinica aktivnosti radioaktivnog izvora u Internacionalnom sistemu mernih jedinica (SI) je s^{-1} i zove se bekerel (Bq). 1Bq je jedan raspad u jednoj sekundi. Nije retkost i korišćenje vanskistemske jedinice za aktivnost, a to je 1 kiri (Ci), čija je vrednost $3,7 \cdot 10^{10}$ Bq, a koja odgovara aktivnosti jednog grama ^{226}Ra .

1.4. Radioaktivni nizovi

U prirodi postoje tri radioaktivna niza: dva niza uranijuma (^{238}U , ^{235}U) i niz torijuma (^{232}Th). Svi članovi istog niza su genetski vezani i nastaju sukcesivnim raspadima od prvog člana niza. Ova tri niza se završavaju stabilnim izotopima olova: ^{206}Pb , ^{207}Pb i ^{208}Pb (Tanasković, 2014).

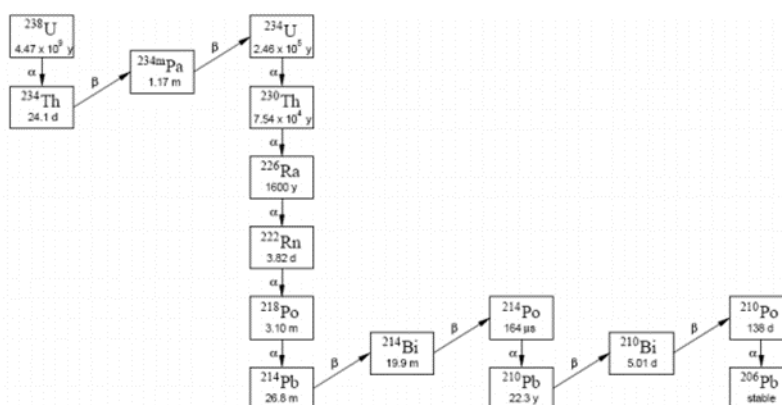
Rodonačelnik ili roditeljski izotop, označava izotop koji se nalazi na vrhu specifičnog niza radioaktivnih raspadanja. Raspadom tog roditeljskog izotopa, svi ostali članovi tog niza, tj. potomci, nastaju sukcesivno jedan za drugim. Nizovi su nazvani prema svom roditeljskom izotopu. Ukupno postoje tri glavna, već spomenuta niza: uranijum-radijumski, uranijum-aktinijumski i torijumski niz. Dodatno, četvrti niz, neptunijumski niz, stvoren je u laboratorijskim uslovima putem nuklearnih reakcija. Ove nizove karakterišu osnovni procesi transformacije jezgara, alfa i beta raspad, praćeni emisijom gama zračenja. Ključne karakteristike ova tri najvažnija radioaktivna niza prikazane su u Tabeli 1.1 (Bikit i dr, 2012).

Tabela 1.1 Neke od osnovnih karakteristika radioaktivnih nizova

Naziv niza	Polazno jezgro	Period poluraspada (god.)	Krajnji član
Torijumov niz	^{232}Th	$1,4 \cdot 10^{10}$	^{208}Pb
Uranijum-radijumov niz	^{238}U	$4,5 \cdot 10^9$	^{206}Pb
Uranijum-aktinijumov niz	^{235}U	$7,2 \cdot 10^8$	^{207}Pb

Uranijumov niz počinje sa ^{238}U kao rodonačelnikom i nakon 14 transformacija (8 alfa raspada i 6 beta raspada) dolazi se do stabilnog krajnjeg elementa, a to je ^{206}Pb . Izotop ^{238}U je početni član uranijumovog niza, takođe poznatog kao (4n+1) niz. Među tri prirodna niza, ovaj niz je najduži. Njegova specifična aktivnost iznosi 0,747 rasp/μg. Glavna grupa alfa čestica ima energiju od 4,195 MeV (77%), a ostale 4,147 MeV (23%) i 4,038 MeV (0,23%). Član niza ^{226}Ra i njegovi kratkotrajni potomci izuzetno su važni za procenu zagađenja. ^{226}Ra je posebno značajan jer je vrlo rastvorljiv u vodi. To može predstavljati izvor unutrašnje kontaminacije vode za piće, posebno u slučajevima voda koje potiču iz dubljih slojeva tla i sadrže više koncentracije uranijuma (U) i radijuma (Ra) od proseka. Pitanje ^{226}Ra je komplikovano jer potomak ^{230}Th često premašuje svoj roditeljski izotop u koncentraciji. To je zbog veće rastvorljivosti Ra u poređenju s Th, kao i zbog migracije iz sedimenata u vodu (Tanasković, 2014).

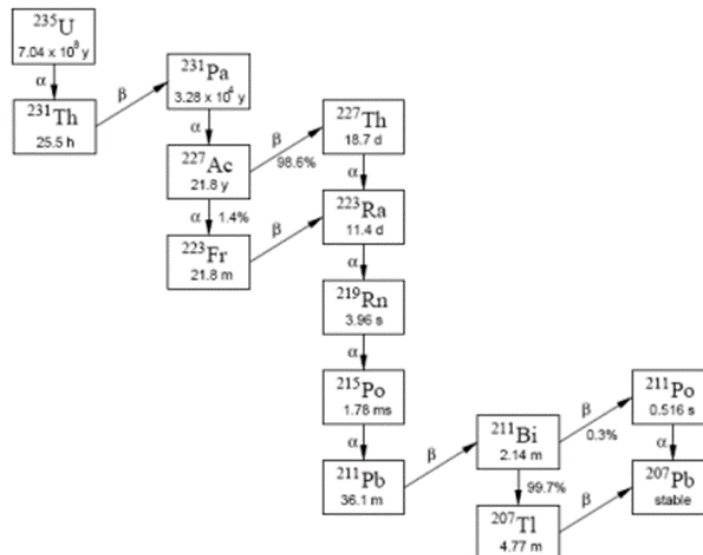
Uranijumov niz sa odgovarajućim raspadima dat je na slici 1.2



Slika 1.2 Uranijumov niz (Martin & Hancock, 2004)

Niz uranijuma ^{235}U ili niz $(4n+3)$, ima svoj početak s nuklidom iz kojeg proizlaze svi ostali nuklidi ove serije - ^{235}U . ^{235}U ima vreme poluraspada od $7,1 \times 10^8$ godina, što je otprilike šest puta kraće od vremena poluraspada ^{238}U . Tokom geoloških vremenskih razdoblja, odnos koncentracija $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ smanjio se na vrednost od 0,0073, što je rezultat bržeg raspada ^{235}U . Aktivnosti jednog grama prirodnog uranijuma iznose: 12 kBq za ^{238}U , 0,55 kBq za ^{235}U i 1 kBq za ^{234}U , koji je član niza ^{238}U . (UNSCEAR, Sources and Effects of Ionizing Radiation, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, United Nations, New York (1982)).

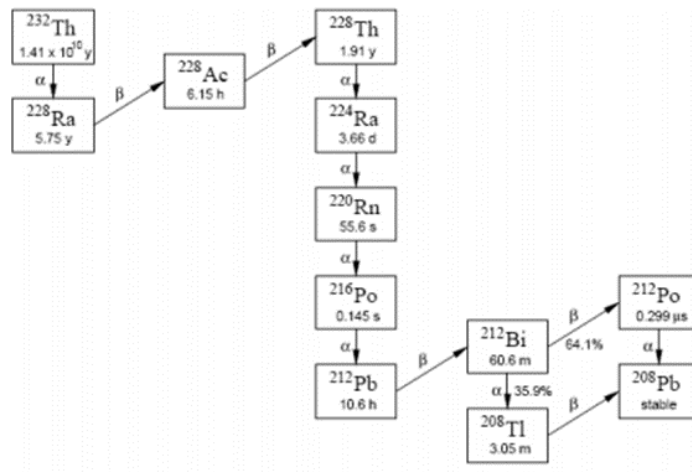
Rodonačelnik aktinijumovog niza je ^{235}U , a niz se završava sa ^{207}Pb . Na slici 1.3 vidi se aktinijumov niz sa naznačenim raspadima.



Slika 1.3 Aktinijumov niz (Martin & Hancock, 2004)

Torijumov niz ili $(4n)$ niz započinje sa ^{232}Th , čiji je period poluraspada $T_{1/2} = 1,405 \times 10^{10}$ godina. Torijumov niz se završava stabilnim izotopom ^{208}Pb . Nekada, ovaj niz je počinjao ^{252}Cf , međutim, svi članovi niza koji prethode torijumu su se do danas raspali i ne postoje u prirodi. U mineralima i stenama niske permeabilnosti, očekuje se ravnoteža radionuklida ovog niza. Međutim u tlu, prirodnim vodama i atmosferi različiti fizički i hemijski procesi mogu biti uzročnici neravnoteže. Direktni potomak ^{232}Th je ^{228}Ra koji je beta-emiter sa energijom raspada od 55 keV, tako da je zračenje koje potiče od ovoga radionuklida jako teško detektovati. Teškoće u merenju ovog

radionuklida su uslovljene prisustvom njegovog kratkoživećeg potomka ^{228}Ac koji ima maksimalnu beta energiju od 2110 keV i raspade praćene emisijom elektrona i gama zračenja.



Slika 1.4 Torijumov niz (Martin & Hancock, 2004)

1.5. Sekularna radioaktivna ravnoteža

U radioaktivnim nizovima radioizotopi se sukcesivno raspadaju sve dok se ne dobije stabilni izotop. Postavlja se problem određivanja aktivnosti pojedinih radionuklida, odnosno broja atoma N , ukoliko su poznati period poluraspada $T_{1/2}$ ili konstanta raspada λ posmatranog radionuklida (Forkapić, 2013).

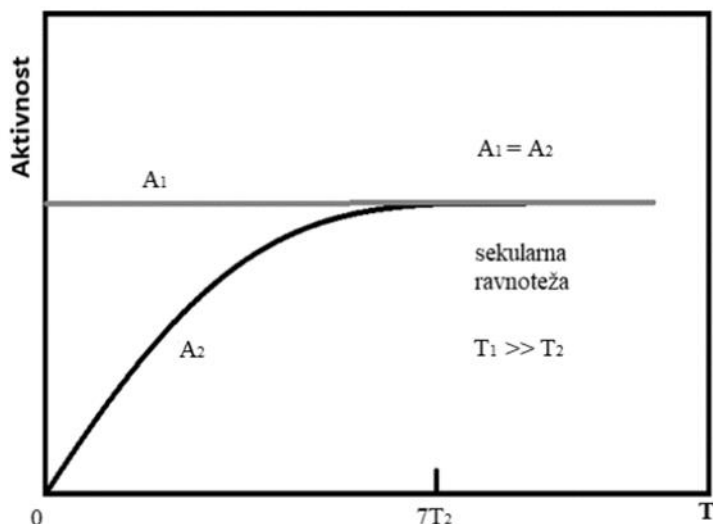
Rodonačelnici prirodnih radioaktivnih nizova poseduju izuzetno duge periode poluraspada, nekoliko redova veličine dužih od perioda poluraspada njihovih potomaka sa najdužim periodima poluraspada. Ova činjenica kao posledicu ima uspostavljanje sekularne radioaktivne ravnoteže (Forkapić, 2013). Pojam radioaktivne ravnoteže vezan je za uslov: $\frac{dN}{dt} = 0$. To je ustvari taj trenutak vremena kada se raspadne onoliko atoma koliko se stvori. Strogo matematički, ovi uslovi u potpunosti nikad nisu ispunjeni, međutim stanja bliska radioaktivnim ravnotežama su moguća. Za ovaj tip ravnoteže može se napisati sledeći uslov:

$$\lambda_1 \ll \lambda_2 \quad 1.9.$$

Te je:

$$\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2 = \dots = \lambda_n N_n \quad 1.10.$$

Ovaj tip radioaktivne ravnoteže se naziva sekularna ravnoteža (slika 1.5)



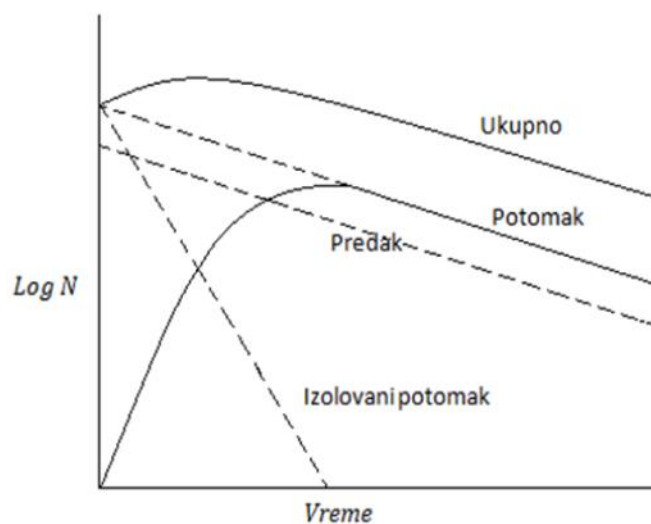
Slika 1.5 Opšti princip nastupanja sekularne (trajne) radioaktivne ravnoteže, za slučaj $T_1 \gg T_2$, gde ravnoteža nastupa nakon ~ 7 perioda poluraspada direktnog potomka

Drugi tip radioaktivne ravnoteže proističe iz uslova:

$$\lambda_1 < \lambda_2 \quad 1.11.$$

tj. kada konstanta raspada λ_2 nije mnogo veća od konstante λ_1 , ali se znatno razlikuju. To je slučaj, kada je period poluraspada pretka veći od perioda poluraspada potomka. Drugi tip radioaktivne ravnoteže naziva se tranzitivna ravnoteža i glasi:

$$\lambda_1 N_1 = (\lambda_2 - \lambda_1) N_2 \quad 1.12.$$



Slika 1.6 Prikaz tranzitivne ravnoteže

I treći slučaj je radioaktivni raspad bez ravnoteže i on nastaje kada je period poluraspada predaka kraći od perioda poluraspada potomka.

1.6. Podela radionuklida prema poreklu

Daleko najveći dio zračenja koje prima svetsko stanovništvo dolazi iz prirodnih izvora. Izloženost većini ovog zračenja je neizbežna. Kroz istoriju naše planete zračenje na njenu površinu dolazi iz svemira ili iz radioaktivnih materijala koji se nalaze u Zemljinoj kori. Ljudi su ozračeni na dva načina. No, dok svi stanovnici Zemlje primaju prirodno zračenje, neki apsorbiraju mnogo veće količine od drugih. To može zavisiti od toga ko gde živi (Novaković, 2001).

Prema načinu nastanka radionuklidi se dele na :

1. Primordijalni radionuklidi

Primordijalni (ili primarni) radionuklidi, stvoreni su nukleosintezom u isto vreme kada i sva supstanca našeg solarnog sistema. Predstavljaju najznačajniji izvor jonizujućeg zračenja u životnoj sredini. Samo su radionuklidi sa periodom poluraspada uporedivim sa starošću Zemlje i njihovi produkti raspada u značajnoj meri zastupljeni u materijalima u životnoj sredini (stenama, zemljištu, vodi, ljudskom telu). U izvore ovog zračenja spadaju radioaktivni elementi: uranijum ^{235}U , uranijum ^{238}U , torijum ^{232}Th , radijum ^{226}Ra , radon ^{222}Rn ili kalijum ^{40}K . Ovi radionuklidi potiču još iz vremena formiranja Zemlje i karakteriše ih vrlo dugo vreme poluživota. Izlaganje prirodnim izvorima zračenja može biti dvojako: interno (ulazak radioaktivnih elemenata u ljudski organizam) i eksterno (preko spoljašnjeg ozračivanja). Izuzetak je gas radon, čiji je poluživot 3,824 dana i od navedenih radionuklida najznačajniji je alfa-emiter. Radon nastaje kao karika u lancu raspada uranijuma ^{238}U . U gasovitom je obliku i izlazi iz stena koje sadrže uran ili radijum i difunduje kroz debele slojeve zemljišta do boravišnih prostora ili se vezuje za podzemnu vodu i tako dolazi na površinu.

2. Kosmogeni radionuklidi proizvedeni u zemaljskoj i vanzemaljskoj supstanciji djelovanjem kosmičkih zraka.

Kosmičko zračenje je takođe značajan izvor prirodne radijacije. Primarno kosmičko zračenje je galaktičkog i solarnog porekla, a sastoji se od naelektrisanih čestica veoma visoke energije (0,01 – 10 GeV). Do zemljine površine ono veoma retko dospeva pošto nestaje u interakcijama u atmosferi u kojima se stvara sekundarno zračenje i kosmogeni radionuklidi. U gornjim slojevima atmosfere nuklearnim reakcijama kosmičkog zračenja sa jezgrima azota i kiseonika dolazi do stvaranja nekolicine radioaktivnih jezgara, kao što su ugljenik ^{14}C i berilijum ^7Be . Nakon toga dolazi do njihovog ravnomernog raspoređivanja putem atmosferskih transportnih procesa, te na taj način i oni daju svoj doprinos ukupnoj prirodnoj radioaktivnosti. Radionuklidi formirani kosmičkim zracima su ^3H , ^7Be , ^{10}Be , ^{14}C , ^{22}Na , ^{36}Cl , ^{38}Cl , ^{39}Cl , ^{27}Na , ^{32}P , ^{33}P , ^{35}S , ^{38}S i ^{32}Si . Intenzitet kosmičkog zračenja varira sa nadmorskom visinom: stanovništvo koje živi u visokim planinskim regionima može primiti dva do tri puta veće doze od onih na nivou mora. Prevoz avionom takođe dovodi do ozračivanja putnika kosmičkim zračenjem. Međutim, kosmičko zračenje relativno malo doprinosi internom izlaganju (Bikit et al, 2004/2005).

3. Antropogene radionuklide

Antropogeni radionuklidi, radionuklidi koje proizvodi čovek u nuklearnim reaktorima, nuklearnim bombama i akceleratorima. Najveći broj ovih radionuklida imaju veoma kratak period poluraspada i predstavljaju realnu opasnost po ljudsku populaciju neposredno nakon njihovog nastanka u različitim procesima. Manji broj ovih radionuklida imaju velik period poluraspada i putem vazdušnih i vodenih strujanja se transportuju na velike razdaljine da bi se konačno istaložili. Ovi se radioizotopi mogu naći i u zemljištu. Od 60-tih godina ovog veka kao značajan problem pojavljuju se veštački izvori jonizujućeg zračenja. Prema podacima UNSCEAR-a iz 1982. godine usled probnih nuklearnih eksplozija u stratosferu je ispušteno $9.6 \cdot 10^{17}$ Bq, što je nakon stratosferskog taloženja izazvalo globalnu kontaminaciju biosfere radionuklidima kao što su cezijum ^{137}Cs i stroncijum ^{90}Sr (Forkapić, 2013).

Radionuklidi iz kategorija 2 i 3 se jednim imenom nazivaju još i sekundarni radionuklidi.

1.7. Radionuklidi u vodi

Svaki organizam je individualan i predstavlja svet za sebe, ali ono što je univerzalno jeste jedan prefinjen sistem kojim naše telo javlja da nam je voda potrebna – osećaj žeđi. Od kada je čovek postao svestan sebe i sveta koji ga okružuje, nikad nije bio indiferentan prema vodi. Ona čini 70 % njegovog fizičkog tela i bez nje nema života na Zemlji (Komatina, 2001).

Voda igra veoma važnu ulogu na Zemlji, ispunjava okeane, jezera, podzemne vode, led, oblake, te se obnavlja kroz različite prirodne procese kao što su kiša, sneg, isparavanja, površinsko oticanje. Prisustvo vode je neophodno za gotovo sve ekosistemske procese na Zemlji. Oblikuje zemlju topografski, transportuje velike količine materijala kretanjem moćnih lednika, sabija zemljište ispod gromada leda, rečnim tokovima prenosi zemljišne čestice do udaljenih jezera i mora, gde se odlažu na dno i vremenom, eventualno pretvaraju u sedimentne stene. Voda takođe erodira stene delujući kao rastvarač ili ih mehanički drobi prodirući kroz pukotine. Neprekidnim kretanjem po površini i ispod površine zemlje, voda povezuje i održava ekosisteme Zemlje. Može se reći da je voda nesumnjivo osnovni elemenat koji povezuje sve organe unutar jednog organizma, sve organizme unutar nekog ekosistema i ekosisteme sa širom okolinom. Ovo omogućava hidrografska mreža koju treba shvatiti u najširem smislu, počev od površinskih tokova raznih dimenzija, stajaćih i podzemnih voda, kanala, cevi i mikrocevi koje nastaju u zemljištu, do uspostavljanja sistema ćelija koje omogućavaju kretanje vode kroz biljni organizam.

Ono čega treba da budemo svesni je da voda u ekosistemu nije „destilovana“, već zasićena mnogim mikro i makro biogenim elementima i drugim materijama koje prima počev od atmosferskih slojeva do geološke podloge. Ona dospeva do svake biljke i drugih organizama u ekosistemima. Kada ispuni ulogu dostavljanja potrebnih elemenata za dalje sinteze, deo ostaje u biljnim tkivima, a veći deo vraća se u atmosferu da se uključi u ciklus stalnog kruženja (Tanasković, 2014).

Voda koju koristimo za domaću i javnu potrošnju dolazi iz podzemnih i površinskih voda. U zavisnosti od starosti i hemijskih svojstava, prirodna voda sadrži različite prirodne radionuklide u različitim koncentracijama. Podzemne vode su uglavnom padavinskog porekla. Radioaktivnost u vodama je uglavnom posledica prisutnosti radioaktivnih elemenata u Zemljinoj kori koji se rastvaraju u podzemnim vodama, kada se ona kreće kroz pukotine u stenovitom tlu. Kao rezultat ovoga, radionuklidi kroz sisteme za navodnjavanje ulaze u lanac ishrane, a time dolaze u tela ljudi i životinja, što predstavlja zdravstveni rizik. Radioaktivnost podzemnih voda je aktuelna tema za mnoge današnje radove u naučnim i stručnim časopisima, a očekivati je da će biti i u budućnosti zarad postizanja kontrole radioaktivnosti u raznim segmentima njene upotrebe.

Dugoživeći uranijumovi i radijumovi izotopi su odgovorni za prirodnu radioaktivnost podzemnih voda. Najčešće su to izotopi radijuma izuzetne radiotoksičnosti i dugih perioda poluraspada (^{226}Ra , $T_{1/2} = 1620$ god, ^{228}Ra , $T_{1/2} = 5,75$ god). Pored radionuklida iz serije uranijuma i torijuma (uključujući radon), u vodi se mogu pojaviti ^{40}K , ^3H , ^{14}C i drugi prirodni radionuklidi. ^3H i ^{14}C takođe mogu doći iz novijih antropogenih izvora, zajedno sa ^{90}Sr , ^{131}I , transuranijumskim proizvodima i drugim beta i gama emiterima koji se oslobađaju iz industrijskih postrojenja ili kao rezultat medicinskih aktivnosti. Radionuklidi antropogenog ili tehnološkog porekla mogu biti prisutni u vodi iz više izvora ((WHO), World Health Organization, 2008), kao što su: radionuklidi ispušteni iz objekata nuklearnih postrojenja; proizvedeni radionuklidi (proizvedeni i korišćeni u nezapečaćenom obliku u medicini ili industriji) dospeli u zalihe vode za piće kao rezultat redovnih ili slučajnih ispuštanja; i radionuklide ispuštene u prošlosti u životnu sredinu, uključujući izvore vode za piće. ^{137}Cs prisutan u životnoj sredini uglavnom potiče od katastrofa na nuklearnim elektranama. Važno je pratiti njegovu koncentraciju aktivnosti u površinskim vodama i u sedimentima, posebno jer veće uočene vrednosti ^{137}Cs mogu biti pokazatelj nekog nuklearnog akcidenta.

Tricijum, ^3H , je veoma važan nuklid za otkrivanje potencijalne radioaktivne ili nuklearne kontaminacije površinskih voda, posebno jer je njegovo poreklo u vodi uglavnom antropogeno, a ne prirodno. Radiougljenik, ^{14}C , je važan radioizotop za hidrogeološke studije, a njegovo poreklo može biti prirodno od kosmičkog zračenja i veštačko iz nuklearnih elektrana. Praćenjem koncentracije aktivnosti ^{14}C može se proceniti da li je došlo do nuklearnog udesa koji je direktno uticao na površinske vode.

Nakon testiranja nuklearne bombe i nuklearnih nesreća (poput Černobilja, koji je uglavnom pogodio evropske zemlje), veštački proizvedeni radioizotopi kao što su ^{137}Cs i ^{14}C deponovani su u rekama i akumulirani u sedimentima. Merenjem koncentracija aktivnosti ta dva izotopa, može se konstruisati skala prošlih nuklearnih događaja i odrediti neke karakteristike površinskih voda.

Pošto je radon visoko rastvorljiv gas, njegova koncentracija u podzemnoj vodi je generalno veća od koncentracije matičnih izotopa radijuma. U veoma starim i visoko mineralizovanim podzemnim vodama, aktivnost radona može biti manje ili više u ravnoteži sa radijumom. Rastvorljivost drugih radionuklida u vodi se razlikuje u zavisnosti od njihovih hemijskih svojstava. U rečnoj vodi, radionuklidi se mogu taložiti u sedimente. Kada se fiksiraju na materijalima velike površine kao što je glina, oni se lakše imobilišu ili transportuju u turbulentnim uslovima i na taj način povećavaju koncentraciju radionuklida u sedimentu.

Dok je uranijum hemijski toksičan, radijum, radon i njegovi potomci izotopi, olovo i polonijum, mogu biti radioaktivni i stoga predstavljati zdravstvene izazove. Tricijum i ^{14}C se javljaju u koncentracijama koje ne predstavljaju nikakvu opasnost po zdravlje, pa se mogu koristiti za datiranje podzemnih voda. Alfa, beta ili gama-spektrometrija se obično primenjuje za merenje koncentracije radionuklida u vodi. Količina vode i postupci uzorkovanja se razlikuju između radionuklida, u zavisnosti od njihovih hemijskih svojstava. Ukupna alfa i beta aktivnost se određuju najčešće tečnom scintilacionom spektrometrijom ili gasnim proporcionalnim brojačima. Za detekciju pojedinačnih radionuklida mogu se primeniti alfa spektrometrija ili polu-provodnički germanijumski detektori visoke radiočistoće (HPGe). Ove metode se često koriste i za analizu sedimenata. Granice detekcije ovih metoda moraju biti niske, za većinu radionuklida čak i ispod 0,1 Bq/l.

Prema nedavnim međunarodnim studijama, koncentracija prirodnih radionuklida u vodi i rečnim sedimentima varira najmanje koliko i u stenama domaćinima. U većini zemalja, međutim, ove koncentracije ne prelaze propisane nivoe u vodi za piće. Zemlje sa granitnim stenama i eventualno povećanom koncentracijom organske materije (zbog močvara), kao u Skandinaviji, su u opasnosti da imaju veće koncentracije radionuklida u vodi za piće.

Podzemne vode važno su prirodno bogatstvo svake zemlje, ali dok su s jedne strane značajne za očuvanje i poboljšanje kvaliteta života čoveka, s druge strane ih je potrebno proučavati i pratiti kao mogući izvor dodatne izloženosti prirodnoj radioaktivnosti. Zbog svoje mobilnosti i sposobnosti otapanja, vode su najugroženiji deo životne sredine. Količina supstanci koje se otapaju u vodi zavise od porekla vode. Podzemne vode imaju ključnu ulogu u migraciji i preraspodeli elemenata u Zemljinoj kori. Sadržaj prirodnih radionuklida u vodama diktiran je osobinama pojedinih radionuklida, te koncentracijama radionuklida u stenama kroz koje voda protiče.

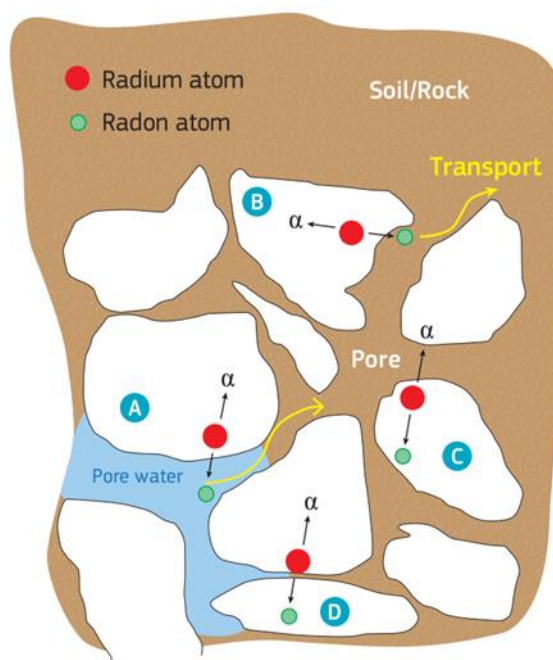
Ingestija pijaće vode koji sadrži visoke koncentracije ovih radionuklida može da izazove ozbiljne zdravstvene probleme stanovništva. Merenja ukupne alfa/beta aktivnosti sprovode se kao screening metod radi otkrivanja prisustva dugoživećih emitera (^{238}U , ^{234}U , ^{226}Ra , ^{210}Po) i ostalih radionuklida (^{40}K , ^{210}Pb , ^{228}Ra) u vodi, tj. radi opše procene da li ispitivani uzorak zahteva dalju analizu specifičnijim nuklearnim metodama (Salonen, 2006a).

Antropogeni izvori radioaktivnosti uključuju transuranijumske proizvode, ^{14}C , ^3H , ^{90}Sr i ^{131}I i druge gama emitere, oslobođene u kontrolisanim količinama iz nuklearnih instalacija, medicinskih ili industrijskih objekata, iz ranijih testiranja bombi ili nuklearnih nesreća.

Opasnosti po zdravlje od izotopa uranijuma su više hemijske prirode nego radiotoksičnosti. Drugi izotopi u ovim serijama generalno nisu prisutni u podzemnoj vodi u značajnim količinama zbog malog prisustva, niske rastvorljivosti u vodi i/ili veoma kratkog poluraspada. Aktivnost ^{40}K iz okoline se ne smatra opasnošću jer je K suštinski element u ljudskom metabolizmu. ^{14}C takođe čini deo prirodnog ugljenika u tragovima. U podzemnim vodama doprinos ugljenika potiče uglavnom od karbonatnih minerala sa obično niskom aktivnošću ^{14}C . Specifična aktivnost ^{14}C je stoga niska u prirodnim podzemnim vodama, a izloženost ljudi je zanemarljiva u prirodnim uslovima. Podzemne vode su obično sklonije od površinskih voda da akumuliraju radionuklide koji se javljaju u prirodi zbog uticaja reakcija voda-stena i velikog odnosa čvrsta materija/rastvor u izdanima (vodonosnicima). Štaviše, vreme zadržavanja između vode i geološke sredine u vodonosnom sloju je obično duže. Podzemne vode su regionalno važan i strateški resurs za javno i privatno snabdevanje.

1.7.1. Radon

Radon je inertan gas, koji kad se formira u Zemljinoj kori u nekom od radioaktivnih nizova, slobodno difunduje iz zemljišta u atmosferu. Radon je radioaktivni plemeniti gas koji u prirodi postoji u vidu tri izotopa: ^{222}Rn , ^{220}Rn , ^{219}Rn . Radon je najteži od svih plemenitih gasova. Najstabilniji i ekološki najrelevantniji izotop je ^{222}Rn , nastaje alfa raspadom ^{226}Ra , u lancu raspada ^{238}U . ^{222}Rn je kratkoživeći izotop sa poluživotom od 3,82 dana. Tokom raspada, alfa čestica se izbacuje, a emitovani radon se uzmiče kinetičkom energijom sa mesta raspada u suprotnom smeru. Ovaj alfa uzmak može da promeni kristalne rešetke i poboljša ispiranje radona sa površine kristala. Uzmakom, radon se može transportovati kao rastvoreni gas u vodi sa porama ili se može zadržati u mineralnoj strukturi.



Slika 1.7 Šematska ilustracija putanja uzmarka radona u i između zrna zemlje/stene: A) Radon se oslobađa u poru ispunjenu vodom; B) Radon se oslobađa u pore vazduha; C) Radon ostaje u zrnu; D) Radon koji apsorbuje susedno zrno (ako je debljina mineralnog zrna veća od opsega trzanja od 10-70 nm) (Cinelli et al., 2019).

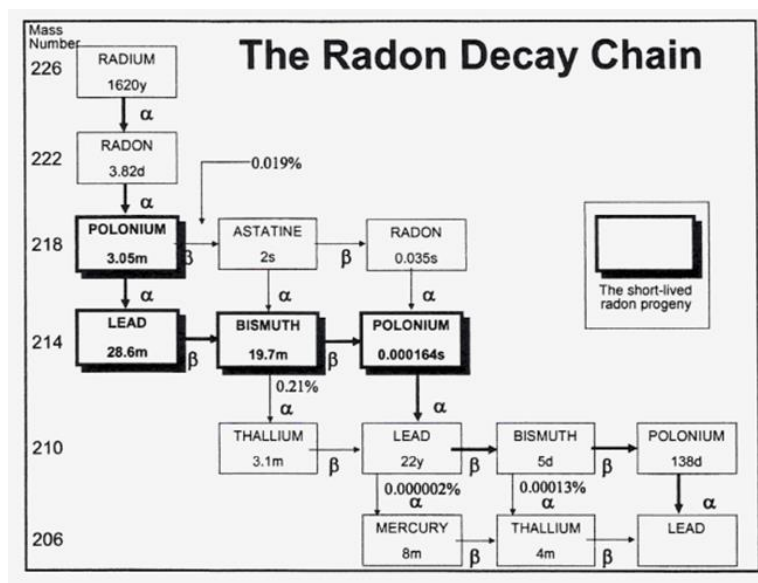
U periodnom sistemu elemenata radon je element sa atomskim brojem 86 i sa simbolom Rn. Rečeno je da nastaje u uranijumskom nizu koji počinje izotopom urana ^{238}U , a završava se stabilnim izotopom olova ^{206}Pb . Radon je u ovoj seriji jedini radioaktivni gas i to sa najdužim periodom poluraspada. Nastaje α -raspadom radijuma ^{226}Ra i spada u α -emitere, tj. posle 3,82 dana on se raspada i emituje

α -česticu energije $E = 5,5\text{MeV}$. Svako jezgro radona ^{222}Rn se raspada kroz niz raspada preko polonijuma ^{218}Po , olova ^{214}Pb , bizmuta ^{214}Bi i polonijuma ^{214}Po i ^{210}Po (^{210}Po ima dug period poluraspada od približno 134 dana pa nije toliko značajan za istraživanja poredeći dosta manje periode poluraspada ostala dva izotopa) do olova ^{210}Pb . Prilikom svake transformacije jezgra emituju odgovarajuće jonizujuće zračenje: alfa čestice, beta čestice ili gama zrake ili kombinaciju čestica i zraka. Energija emitovane alfa čestice iznosi 5.49 MeV (Čonkić, 1997).

Na slici 1.8 data je šema radioaktivnog raspada ^{226}Ra , odnosno ^{222}Rn i njegovih potomaka

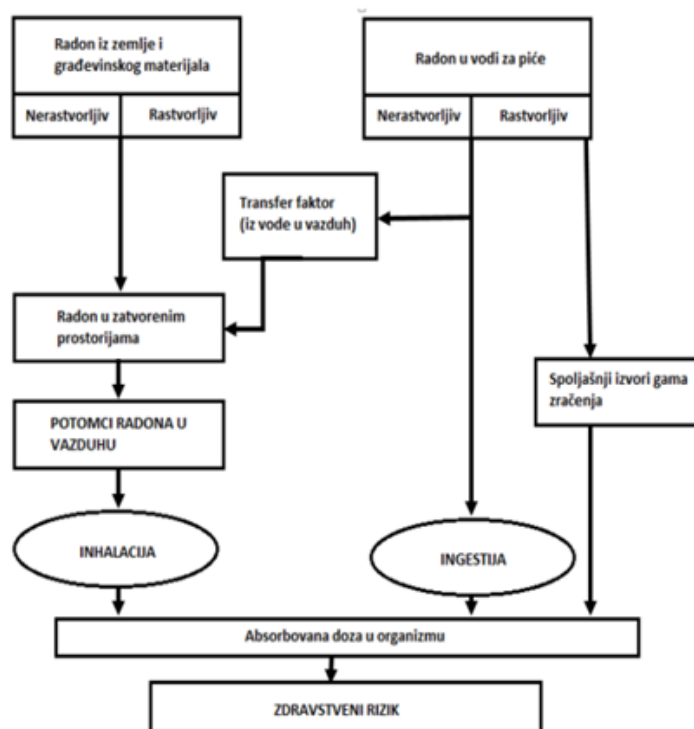
Radonovi kratkoživeći potomci su naelektrisane čestice koje se vezuju za aerosole i sitnije klasterne u vazduhu i imaju veliku moć jonizacije. Ovako vezane čestice udisanjem lako dospevaju u pluća. Polonijum ^{218}Po i ^{214}Po u najvećoj meri doprinose riziku od štetnog uticaja na organizam jer emituju alfa čestice, koje imaju veću relativnu biološku efikasnost (sposobnost da izazovu neku biološku promenu) od beta i gama zračenja. Alfa zračenje dovodi do iritacije i oštećenja ćelija pluća [CNSC, 2011]. Jezgra potomci radona doprinose oko 60% od ukupne unutrašnje ekvivalentne doze izazvane udahnutim radionuklidima (Galán López et al, 2004).

Istraživanja iz oblasti epidemiologije su pokazala je prisustvo radona ^{222}Rn u životnoj sredini jedan od najvažnijih uzročnika malignih obolenja pluća. I to je osnovni razlog monitoringa ovog radionuklida u vazduhu, vodi i zemljištu, jer predstavlja drugi najvažniji uzročnik karcinoma pluća kod čoveka, posle pušenja. Koncentracija radona u vazduhu je zbog toga u tesnoj vezi sa koncentracijom radijuma u zemljištu, stenama, građevinskom materijalu itd., ali takođe zavisi i od mnogih drugih parametara, kao što su ventilacija, poroznost materijala, ambijentalni uslovi i količina vlage u materijalu (UNSCEAR, 2000).



Slika 1.8 Šema radioaktivnog raspada Ra-226 . Potomci Rn-222 .

Na sledećoj slici prikazana je šema rasprostranjenosti radona i njegov uticaj na organizam.



Slika 1.9 Rasprostranjenost radona u životnoj sredini i njegov uticaj na organizam

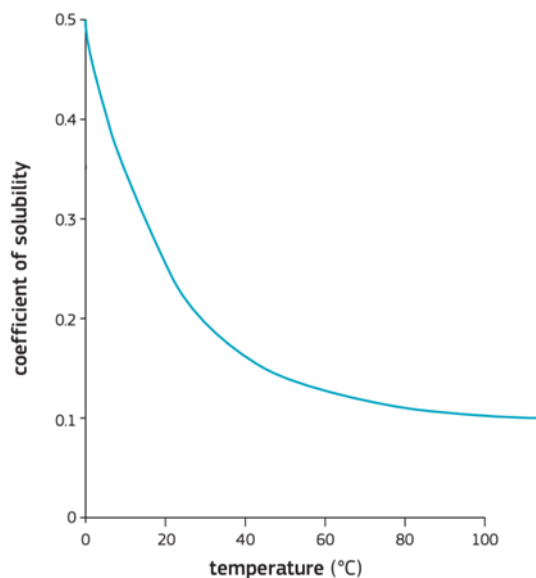
U Evropi, godišnja efektivna doza potekla iz svih izvora radijacije u životnoj okolini je procenjena na 3.3 mSv, od čega doze u zatvorenom prostoru koje potiču od radona (^{222}Rn), torona (^{220}Rn) i njihovih kratkoživećih potomaka iznose 1.6 mSv (CNSC, 2011). Ispitivanja nivoa radona u zatvorenom prostoru u Evropskoj uniji pokazuju da je uzrok 20000 smrtnih slučajeva zbog kancera pluća upravo radon, što čini 9% od svih uzroka plućnog kancera, kao i 2% od uzroka kancera uopšte unutar Evropske unije (Nikolov et al, 2012).

1.7.1.1. Radon u vodi

Visok sadržaj radona u podzemnim vodama povezan je sa sadržajem uranijuma i radijuma u mineralima vodonosnog sloja i podzemnim vodama, kao i sa protokom podzemnih voda. Nakon izbijanja podzemne vode na površinu, dolazi do naglog pada koncentracije radona u vodi, usled njenog kontakta sa okolnim vazduhom, pri čemu radon može lako da “pobegne” iz vode. Problem se javlja kada se ova voda bogata radonom koristi za piće, što je uobičajeno u nekim naseljenim mestima. Vreme koje protekne od sakupljanja radona do konzumacije vode nije dovoljno da bi se izbegla opasnost po zdravlje konzumenata. U cilju utvrđivanja bezbednosti vode za piće, od velike je važnosti vršiti proveru koncentracije radona u vodama na izvorištima i javnim česmama (Todorović et al, 2014). Oslobođeni radon povećava koncentraciju u zatvorenim prostorijama i odgovoran je za izazivanje kancera pluća, dok manja količina radona koji ostaje u vodi ingestijom se unosi u organizam i može biti odgovorna za kancer želuca. Bitno je spomenuti da prosečna koncentracija ^{222}Rn u podzemnim vodama iznosi 20 Bq l^{-1} (WHO, 2008), a može varirati od 3 - 80000 Bq l^{-1} (Appleton, 2005). Voda koju koristimo iz gradskih vodovoda sadrži znatno manje koncentracije radona, jer tehnološkim postupkom čišćenja i prerade vode dolazi do emanacije radona u dodiru sa vazduhom. Koncentracija radona u flaširanim pijaćim vodama najviše zavisi od porekla vode, tj. dubine sa koje se isumpava voda i vrsta zemljišta kroz koju voda prolazi na svom putu do tačke isumpavanja.

Za dati sadržaj uranijuma u akviferu, veće koncentracije radona u podzemnoj vodi se očekuju u stenama manje poroznosti, veće gustine ili veće efikasnosti emanacije (Wanty et al., 1992). Fluks

radona sa mesta raspada radijuma je takođe određen permeabilnošću primarnih i sekundarnih stena. Visoke koncentracije radona se obično ne nalaze u zonama visoke transmisivnosti u vodonosnim slojevima zbog smanjenog odnosa stena/voda i razblaženja emanirajućeg radona (Lawrence et al., 1991). Kada se radon nađe u podzemnoj vodi, njegov transport se kontroliše advekcijom i difuzijom. Rastvorljivost radona u vodi zavisi od temperature, pri čemu se rastvorljivost smanjuje za oko 3 % po °C kako temperatura raste sa 10 °C na 20 °C (Slika 1.10).



Slika 1.10 Grafik koeficijenta rastvorljivosti radona u funkciji temperature vode

Čest je slučaj da analizirani uzorci termalnih i mineralnih voda pokazuju visoke sadržaje ^{222}Rn , ali ne i visoke koncentracije ^{226}Ra i ^{238}U i obrnuto. Upravo zbog toga čini se da je nemoguće postaviti korelaciju između njihovih koncentracija. Granice rastvorljivosti U i Ra u većini podzemnih voda mnogo su niže u odnosu na radon. Takođe niske koncentracije radijuma mogu dovesti do visokih koncentracija radona ukoliko je radijum adsorbovan na površini mineralnih zrna.

Radon je u najvišim koncentracijama prisutan na području granitnih stena i škriljaca sa visokom koncentracijom uranijuma. Najviše koncentracije radionuklida izmerene su u magmatskim stenama (granit). Koncentracija radionuklida je pod uticajem hidrotermalnih, pneumatolitskih i drugih postmagnatskih procesa koji dovode do sekundarnih izmena stena. Zbog ovakvih izmena, radionuklidi su često prisutni u okolini tektonske zone (Todorović et al, 2015).

1.7.2. Radijum u vodi

Radijum je zemnoalkalni element. Čisti radijum je srebrnasto-bele boje, ali lako reaguje sa azotom pri izlaganju vazduhu, te se formira crni površinski sloj radijum nitrita (Ra_2N_2) (Slika 1.11). U prirodi, radijum se može naći u rudama uranijuma i (u manjim količinama) torijuma u tragovima – 1 gram po toni rude uranijuma.



Slika 1.11 Radijum

Glavni izotopi radijuma, tj. ^{226}Ra , ^{228}Ra i ^{224}Ra su prisutni u uranijumskom i torijskom nizu. ^{226}Ra i ^{224}Ra su alfa emiteri; ^{228}Ra je beta emiter. Odlikuju ih različiti periodi polu-raspada od 1 600 godina, 5,75 godina i 3,6 dana, respektivno. ^{226}Ra i ^{228}Ra su najvažniji izotopi radijuma prisutni u vodi. Nastaju raspadom ^{238}U i ^{232}Th , respektivno, njihova koncentracija zavisi od sadržaja njihovih roditelja u supstratu. Pošto je torijuma oko tri puta više od uranijuma u litosferi, ali ima konstantu raspada oko tri puta veću od uranijuma, globalne zalihe ^{226}Ra i ^{228}Ra bi trebalo da budu otprilike jednake; međutim, lokalne specifične geološke strukture terena dovode do velike varijabilnosti u odnosu ova dva izotopa.

Generalno, koncentracija radijuma u slatkoj podzemnoj vodi je obično niska, obično u opsegu mBq/l. Koncentracija radijuma u površinskim vodama je čak niža nego u većini podzemnih voda (Eisenbud & Gesell, 1997). Neke mineralne i termalne vode pokazuju vrednosti koncentracije ^{226}Ra do nekoliko Bq/l. ^{226}Ra potomak ^{230}Th , generalno se nalazi u većoj količini od svog roditelja u većini prirodnih voda zbog veće rastvorljivosti radijuma u odnosu na torijum. U slatkoj vodi, radijum se nalazi u najvećim koncentracijama u krečnjačkim regionima gde je rastvorljiviji u HCO-vodama. ^{228}Ra se takođe nalazi više od svog roditelja ^{232}Th u prirodnim vodama.

Veće aktivnosti su takođe pronađene u slanim podzemnim vodama, uključujući slane vode naftnih polja i druge formacijske vode. Prijavljene su aktivnosti od desetina do stotina Bq/l za ^{226}Ra i ^{228}Ra u salaminama naftnih polja iz SAD (Spaite & Smithson, 1992), pri čemu je aktivnost obično u pozitivnoj korelaciji sa salinitetom podzemne vode/slane vode. Radijum ima fizička svojstva i pokazuje ponašanje slično onome kod barijuma, stroncijuma i kalcijuma, a njegovu pokretljivost kontrolišu geohemijske reakcije koje utiču na ove elemente (rastvaranje/taloženje, sorpcija). Radijum ima samo jedno oksidaciono stanje (+2) u prirodnim sistemima. Element se u rastvoru javlja uglavnom kao slobodni Ra^{2+} ili kao RaSO_4 i takođe formira jake vodene komplekse sa karbonatom (Wanty & Nordstrom, 1993).

Mobilnost radijuma u vodi može biti poboljšana alfa uzmakom, ali i ograničena sorpcijom na oksidima gvožđa i mangana, gline ili koprecipitacijom sa zemnoalkalnim metalima u BaSO_4 , SrSO_4 i CaCO_3 . Sorpcija radijuma na okside metala i gline zavisi od pH vrednosti i manje je značajna u kiselim uslovima. Aktivnost radijuma je tipično veća u anaerobnim podzemnim vodama zbog redukcionog rastvaranja oksida gvožđa, u vodonosnicima sa slabim kapacitetom sorpcije (nizak sadržaj gvožđa) i onima sa visokim koncentracijama konkurentskih katjona (kalcijum, magnezijum, barijum i stroncijum), kao i HCO_3^- (Szabo et al., 2012). Kao rezultat ko-precipitacije i sorpcije, aktivnosti radijuma mogu biti visoke u naslagama kamenca (sulfati, karbonati, silikati, oksidi).

Radijum se lako rastvara u podzemnim vodama kada su nivoi pH vode niski. Uopšte, površinska voda ima niske sadržaje radijuma; međutim, duboki vodonosni slojevi odakle se dobija voda za piće ponekad sadrže radijum iznad izvedenih koncentracija za vodu za piće. Podzemna voda, dok teče kroz pukotine stenovitih slojeva, rastvara minerale. Ukoliko stene sadrže značajnu količinu radijuma, a voda se kreće dovoljno sporo, spiraće veće količine radijuma. U vodi za piće radijum nema ni miris, boju, ni ukus. Neposredni zdravstveni rizici od vode za piće koji sadrže niske nivoe radioaktivnosti su mali, ali ukoliko se ovakva voda konzumira tokom života, zdravstveni rizici su povećani. Sa povećanjem dubine izvorišta, koncentracija ^{226}Ra u vodi raste. Radijum se u prirodi nalazi i kao posledica određenih ljudskih aktivnosti kao što su nanošenje vode iz rudnika tokom oluja ili ispuštanja industrijskog i medicinskog otpada. Radijum se u ljudsko telo unosi hranom i vodom u kojoj je ovaj radionuklid prisutan. Radiotoksičnost ^{226}Ra potiče od njegove osobine da se nakuplja u kostima i mokraćnoj bešici, gde se raspada i izlaže organizam jonizujućem zračenju.

Zakonski propisane granice za koncentracije radijuma u pijaćoj vodi su veoma niske (0,5 Bq/l za ^{226}Ra i 0,2 Bq/l za ^{228}Ra) i odgovaraju indikativnoj dozi od 0.1 mSv/godišnje (Sl. Glasnik RS 36/18). Ove koncentracije su izvedene na osnovu doznih koeficijenata iz publikacije ICRP Publication 119 (ICRP 2012) i prosečnog unosa pijaće vode na godišnjem nivou od 730 l za odrasle osobe (2001/982/Euratom).

1.7.3. Uranijum u vodi

Uranijum (U) je težak element u seriji aktinida (atomska broj 92) sa dva glavna prirodna, primordijalna, dugovečna radionuklida, uključujući obilniji ^{238}U (vreme poluraspada od $4,5 \times 10^9$ godina, 99% ukupne mase uranijuma) i manje zastupljeni ^{235}U (vreme poluraspada od $7,0 \times 10^8$ godina, 0,72 % ukupne mase uranijuma), oba se raspadaju odvojeno kroz duge i složene serije radioaktivnog raspada koji se završavaju stabilnim olovom (^{206}Pb i ^{207}Pb , respektivno). Drugi prirodni izotop uranijuma, ^{234}U , (vreme poluraspada od $2,4 \times 10^5$ godina, 0,0056 % ukupnog prirodnog uranijuma), je treći proizvod raspada u seriji radioaktivnog raspada ^{238}U . Ovaj izotop uranijuma se generalno smatra u ravnoteži (do blagog deficita) sa svojim prethodnikom ^{238}U . Odnos $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$, trenutno oko 138, vremenom se povećavao zbog bržeg radioaktivnog raspada ^{235}U .

Osnovni faktori koji utiču na kretanje uranijuma u prirodi kroz litosferu su redoks potencijal i pH sredine. Ciklus kretanja uranijuma u prirodi započinje oksidacijom četvorovalentnog uranijuma. Sve dok su kompleksi u vodenoj fazi stabilni teče proces transporta uranijuma kroz prirodu. Proces kontaminacije zemljišnog rastvora uranijumom se prekida kada se on redukuje ili fiksira. Međutim, sa izmenom uslova u prirodi, fiksiran uranijum se može ponovo pokrenuti i tako ciklus uranijuma ponovo otpočinje. Može se zaključiti da se uranijum slobodno kreće kroz prirodu od momenta oksidacije i rastvaranja u vodi.

Koncentracije rastvorenog U(VI) mogu biti visoke u kiselim vodama rudnika. Pri višim pH, uranil jon formira stabilne komplekse sa karbonatnim jonima, posebno $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2^{2-}$ i pri višim pH, $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3^{4-}$. Kompleksi sa fosfatom se mogu pojaviti pri skoro neutralnom pH (Drever, 1997) i sa sulfidom i fluoridom u kiselim uslovima (Drever, 1997). Hlor i SO_4 mogu biti važni ligandi u slanim vodama (Porcelli & Swarzenski, 2003). Uranijum (VI) takođe formira komplekse sa rastvorenim organskim ugljenikom pri pH vrednostima između 3,5 i 7 (Cothorn & Lappenbusch, 1983).

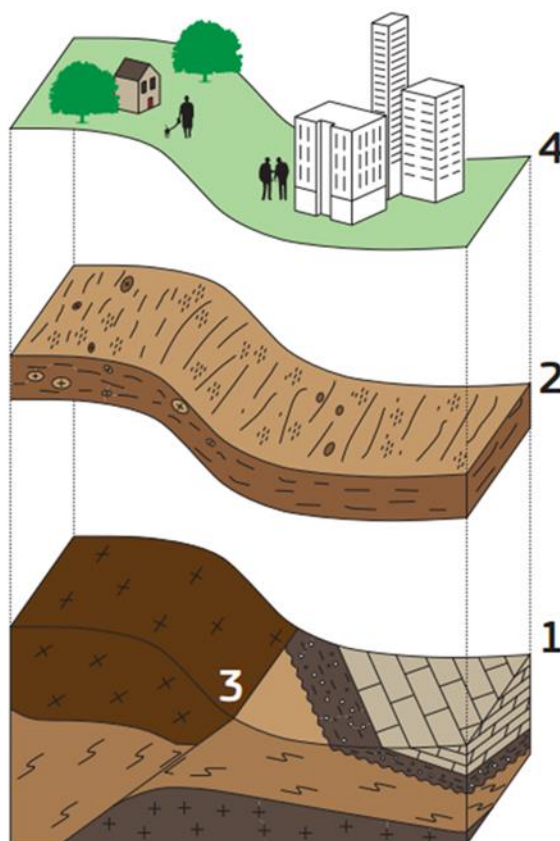
U većini kontinentalnih voda (glečeri, reke i jezera, odnosno površinske vode isključujući morsku) koncentracija uranijuma se kreće od manje od 0,1 do 10 $\mu\text{g/l}$ (približno od $< 2,5$ do 250 mBk/l).

1.8. Uticaj geologije na radioaktivnost vode

Struktura podzemnih stena ima veliki doprinos na nivo pozadinskog zračenja, zajedno sa drugim parametrima kao što su nadmorska visina i klima. Geologija opisuje i objašnjava razlike u sastavu i strukturi stena na osnovu geološke skale (u trajanju tokom hiljada do milion godina) kao i fizičko-hemijskim uslovima razmatranog regiona. To implicira da se posmatranjem geologije Evrope već može formirati opšta i široka predstava o nivou prirodne radioaktivnosti koji se može očekivati. Na primer, mladi i pokretni nekonsolidovani morski sedimenti (kao što su glina, ilovača i pesak) koji se nalaze u mnogim obalnim regionima u severnoj i severozapadnoj Evropi koji generalno sadrže manje radionuklida od određenih magmatskih ili metamorfnih stena pronađenih na primer u Skandinaviji Fenoskandijski štit), Centralnoj Evropi (Boemski masiv), Francuskoj (Bretanja i Centralni masiv) i u Španiji (Iberijski masiv). Prvi regioni su periodično i geološki-nedavno (tokom poslednjih nekoliko miliona godina) dio plitkog mora, dok su drugi rezultat veoma starih procesa izgradnje planina koji su omogućili formiranje tvrdih stena i migriranje i koncentrisanje radionuklida, bilo homogeno u određenim delovima magmatske komore ili u diskretnim prelomima i slojevima. Noviji alpski planinski pojasevi se sastoje od mnogo različitih tipova stena (magmaške, sedimentne/karbonatne, metamorfne itd.) koje variraju relativno lokalno i na taj način dovode do jakih prostornih varijacija u radiološkom smislu. Što se tiče vuklanskih stena, uopšteno govoreći kiseli materijali kao što su tufa i riolit imaju veći sadržaj radionuklida i mogu dovesti do povećane unutrašnje gama doze i koncentracije radona ili torona, kada su prisutni u temeljima zgrada ili kada se koriste kao građevinski materijal. Još jedan specifični slučaj su kraška krečnjačka područja, gde radiološki rizik, uglavnom zbog emanacije radona, varira lokalno, što dovodi do jakih žarišta prirodne radioaktivnosti. Organski bogati škriljci i argilošist takođe mogu biti od značaja za doprinos pozadinskom zračenju, zbog

njihovog ponekad povećanog sadržaja uranijuma ili torijuma u kombinaciji sa visokom poroznošću, omogućavaju migraciju radionuklida uglavnom radona ili radijuma, a ponekad i uranijuma u vodenom rastvoru. To dovodi do još jednog važnog geološkog faktora koji igra ulogu u radiološkom pozadinskom zračenju, a to su pukotine i tektonski rasedi. Ove strukture mogu formirati puteve za migriranje, koncentrisanje i emanaciju radionuklida utičući tako lokalno ili šire (u zavisnosti od njihove geometrije i obima) na pozadinsko zračenje. Druga specifična situacija postoji u Baltičkom regionu i severnoj Nemačkoj do Danske, gde su glacijalni procesi transportovali otpadni materijal sa Baltičkog štita na velike udaljenosti, što je dovelo do naslaga sa povećanom prirodnom radioaktivnošću. Na kraju, površinski sloj Zemljine površine često je prekriven slojem zemlje koji nastaje od lokalne erozije stena ili se taloži putem transportnih procesa poput poplava/reka koje meandriraju. Propusnost i sastav ovih slojeva zemljišta će ponovno uticati na lokalni sadržaj radionuklida i prirodnu radioaktivnost.

Prirodno pozadinsko zračenje na otvorenom je uglavnom određeno koncentracijama aktivnosti prirodnih zemaljskih radionuklida ^{238}U , ^{232}Th i ^{40}K i njihovih potomaka koji se nalaze u Zemljinoj kori. Radioaktivni raspad ovih nuklida se dešava u svim stenama (nivo 1 na slici 1.12).



Slika 1.12 Izvori glavnih prirodnih radionuklida iz serije raspada ^{238}U , ^{232}Th i ^{40}K . Primarni izvor: osnovna stena ili bedrok (nivo 1); sekundarni izvor: zemljište (nivo 2); dodatni izvori: diskontinuiteti (npr. tektonika, nivo 3); antropogeni izvor: građevinski materijali i zagađenje životne sredine (nivo 4). (Cinelli et al., 2019).

Međutim, koncentracija aktivnosti radioizotopa zavisi od procesa koji kontrolišu mobilizaciju, precipitaciju, koncentraciju i/ili ispiranje radionuklida (Langmuir, 1978). Zemljište, formirano trošenjem stena i pedogenim biohemijskim procesima, je drugi izvor prirodne radioaktivnosti, (nivo 2 na slici 1.12). Proces formiranja zemljišta mogu izazvati dalju mobilizaciju i koncentraciju radionuklida, kao što je na primer akumulacija uranijuma koji se može favorizovati u uslovima redukcije, migracija radionuklida prema površini i atmosferi dodatno zavisi od fizičkih svojstava kao što su propusnost, sastav zemljišnog gasa, dinamika podzemnih voda i tektonika (nivo 3 na slici 1.12).

Pored toga, prirodni kamen i sirovine (glina, laporci, pesak) koji se koriste za proizvodnju građevinskog materijala (npr. cigle, cementi, malteri) takođe sadrže radionuklide, što dovodi do izloženosti ljudi koja, u nekim slučajevima, može izazvati rizik po zdravlje (nivo 4 na slici 1.12). Suštinski, sirovine koje se koriste u širokom spektru industrijskih procesa (kao što su mineralne rude, nafta i gas, kamen) mogu dovesti do zagađenja životne sredine na različitim nivoima, uzrokujući izlaganje ljudi prirodnim radionuklidima koji su tehnološkim procesima dovedeni do visokih koncentracija u životnoj sredini, tzv. radioaktivni materijal (NORM materijali – Normally Occuring Radioactive Materials).

1.8.1. Litologija

Litologija proučava stene, uključujući poreklo, starost, sastav, strukturu i rasprostranjenost na celoj planeti. Litologija je disciplina koja klasifikuje stene na osnovu njihovih fizičkih i hemijskih svojstava i na osnovu procesa kojima se stvaraju stene. Te se na osnovu toga dobija podela na tri osnovne vrste stena, a to su: magmatske, sedimentne i metamorfne stene.

Magmatske stene se formiraju od magme, bilo unutar magmatske komore (tako se formira magmatska stena poput granita ili diorita) unutar intruzija (formirajući intruzivne stene poput dolerita) ili od tokova lave (formirajući vulkanske stene kao što su bazalt ili riolit). Sedimentne stene nastaju transportom i taloženjem supstanci koje formiraju stene kao što su klasične čestice ili hemijske i biohemijske precipitacije. Ako se javljaju kao nekonsolidovane i necementirane formacije, nazivaju se sedimenti, poput peska ili gline. U različitim stepenima, oni takođe mogu biti podvrgnuti zbijanju, dijagenzi ili liksivijaciji tokom vremenskih uslova, formirajući tako različite vrste sedimentnih stena poput škriljaca, krečnjaka ili peščara. Metamorfne stene su re-kristalizovani subsolidus iz portolita već postojećih sedimentnih, magmatskih ili drugih metamorfnih stena. Tipični primeri su gnajs i škriljac... Visoke koncentracije radionuklida mogu se naći u mnogim različitim tipovima stena, ali u suštini potiču iz procesa stvaranja magmatskih stena. U i Th su nekompatibilni elementi snažno podeljeni u početne taline nastale delimičnim topljenjem u komori magme. Zbog njihovog velikog jonskog radijusa i visoke valencije, oni su snažno nekompatibilni sa glavnim mineralima koji formiraju stene i pokazuju najveći afinitet prema M^{4+} elementima kao što su Ce i Zr. Stoga su uranijum i torijum generalno obogaćeni granitoidnim stenama i njihovim odgovarajućim vulkanskim proizvodima, a uglavnom su ugrađeni u pomoćne minerale kao što su cirkon ($ZrSiO_4$) titanit ($CaTiSiO_5$), apatit ($Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$), epidot ($Ca_2Al_2(Fe^{3+}Al)(SiO_4)(Si_2O_7)O(OH)$) u kome su manje nekompatibilni, ili u monazite ($(Ce,La,Th,U)(PO_4,SiO_4)$), alanite ($(Ce,Ca,Y,La)_2(Fe^{2+},Fe^{3+},Al)_3(SiO_4)(Si_2O_7)O(OH)$) i u specifičnim materijalima U i Th kao što su uraninit (UO_2), brannerit ($(U,Ca,Ce)(Ti,Fe)_2O_6$), karnoti ($K_2(UO_2)_2(VO_4)_2 \cdot 3H_2O$), kofinit ($USiO_4$), torit ($ThSiO_4$) i torijanit (ThO_2), gdje čak postaju kompatibilni (Blundy & Wood, 2003; Sakoda et al., 2010). Hidrotermalni i procesi vremenske erozije mogu uzrokovati ispiranje urana (U) i torijuma (Th) iz pridruženih minerala, nakon čega sledi kristalizacija rude i adsorpcija na sekundarne hidrirane Fe-okside, Mn-okside i glinene minerale (Taboada et al., 2006). Sedimentne stene su, generalno, znatno siromašnije U i Th. Većina depozita U-rude u sedimentnim stenama je ili detritna akumulacija uraninita koji sadrži Th u arhejskim i paleoproterozojskim siliciklastičnim sedimentima pod anoksičnim površinskim uslovima ili je povezan sa selektivnim ispiranjem uranijuma. Ovo može biti uzrokovano oksidujućim hidrotermalnim tečnostima ili podzemnim vodama koje proizvode i transportuju visoko rastvorljive komplekse uranila ($U^{6+}O_2$)²⁺.

1.9. Radijacioni rizik od izlaganja jonizujućem zračenju

Visoki nivoi jonizujućeg zračenja mogu oštetiti tkiva apsorpcijom energije unutar živih organizama, što za posledicu ima biološke efekte. Ova interakcija zračenja sa materijom uključuje procese jonizacije i ekscitacije atoma i molekula prisutnih u tkivima, što može proizvesti ozbiljna oštećenja. Živi organizmi se dominantno sastoje od vode i zračenje uglavnom jonizuje molekule vode,

što dovodi do radijalizacije vode i stvaranja vrlo reaktivnih jedinjenja, slobodnih radikala. Ova jedinjenja zatim reaguju s organskim molekulima, prenose im energiju i menjaju ih, što može dovesti do smanjenja ili gubitka njihove biološke funkcije. U suštini, delovanje zračenja na ljudsko telo se svodi na oštećenje pojedinačnih ćelija, ali to ne znači da zračenje deluje na sve ćelije na isti način. Postoji različita osetljivost različitih vrsta ćelija na zračenje, kao i individualna osetljivost pojedinih ćelija. Razlike u osetljivosti ćelija uzrokuju veliku razliku u posledicama ozračivanja različitih tkiva, organa i organizama. Manje osetljiva su tkiva koja se sporo dele, dok su mnogo osetljivija tkiva i organi koji se intenzivno obnavljaju.

Efekti zračenja koji se ispoljavaju na ozračenju osobe nazivaju se somatski, a oni koji se javljaju kod potomstva ozračenju osobe nazivaju se genetski ili nasledni efekti. Pošto se štetne posledice dejstva zračenja na živi organizam ispoljavaju u različitim vremenskim intervalima posle ozračivanja, somatski efekti mogu biti akutni i hronični. Pojava somatskih efekata koje jonizujuća zračenja izazivaju na ljudima, direktno zavisi od veličine primljene doze i vremena ekspozicije. Akutni nastaju kada je celo telo naglo izloženo dejstvu visokih doza zračenja. Prvi put u istoriji čovečanstva, masovni akutni somatski efekti bili su ispoljeni u Japanu posle eksplozije atomskih bombi u Hirošimi i Nagasakiju avgusta 1945. godine. Osim ovih, akutni somatski efekti su zabeleženi posle nuklearnih akcidenata u raznim nuklearnim centrima, kada je došlo do naglog ozračivanja visokim dozama pri radu pored jakih izvora zračenja.

Akutni somatski efekti se ispoljavaju određenim kliničkim simptomima koji se zajedničkim imenom nazivaju akutnim bolestima zračenja. Od posebnog su značaja somatski efekti koji se javljaju posle ozračivanja žena u prvim nedeljama trudnoće. Smatra se da je najosetljiviji period trudnoće za žene, pa i sve životinje sisare vreme od oplođivanja do 6-7 nedelja. Eksperimentalno je na životinjama utvrđeno da ozračivanje ženki pre nego što se ugnjezdi plod dovodi do visokog procenta smrtnosti prilikom rađanja, ali ne i do nakaznosti. Ozračivanje u periodu stvaranja organa i udova izaziva delimično visoku smrtnost, ali i pojavu mnogih nakaznosti kod rođenih mladunaca.

Genetski efekti nastaju i kao posledice i akutnog i hroničnog ozračivanja, a po značenju daleko prevazilaze somatske. Za genetske efekte ne postoji prag-doza. Ćelije u deobi pokazuju najveću osetljivost u početku profaze, tj. u toku pripreme za deobu. Ovaj period se poklapa sa fazom intenzivne sinteze nuklearnih kiselina koje su nosioci procesa deobe. Poznato je da se sinteza nuklearnih kiselina zaustavlja pod dejstvom zračenja, pa se osetljivost ove faze dovodi u vezu sa opisanim fenomenom. U toku kasnijih faza deobe (metafaza, anafaza i telofaza) osetljivost prema zračenju je smanjena.

Važna klasifikacija štetnih radijacionih efekata je i njihova podela na stohastičke i determinističke efekte. Deterministički efekti zračenja su dozno zavisni efekti koji se ispoljavaju kada organizam primi dozu zračenja veću od praga doze. Pojava i intezitet nastalih štetnih efekata zavise od jačine apsorbovane doze, brzine doze i načina ozračivanja. U determinističke efekte spadaju radijaciona bolest (radijacioni sindrom), radijacione opekotine, sterilitet, hipotireoidizam i katarakta. Stohastički efekti zračenja su efekti čija se verovatnoća pojave, povećava sa dozom zračenja. Ovi efekti nemaju prag doze, smatra se da ne postoji bezbedna doza zračenja, odnosno da je svaka doza zračenja, pa čak i najmanja, potencijalno opasna. Stohastički efekti se smatraju glavnim zdravstvenim rizikom kod profesionalno izloženih lica koja rade u zoni zračenja. U stohastičke efekte zračenja spadaju pojava karcinoma, leukemije (somatski efekti) i nasledni (genetski) efekti (Mitrović, 2021).

Verovatnoća da pojedinac doživi određeni štetni somatski efekat kao rezultat izlaganja jonizujućem zračenju, radijacioni rizik, određuje se preko doze - fizičke veličine koja služi kao kvantitativna mera nivoa izlaganja jonizujućem zračenju. Povećan radijacioni rizik može se javiti usled:

1. eksternog (spoljašnjeg) ozračivanja, kada se izvor zračenja nalazi izvan organizma i

2. internog (unutrašnjeg) ozračivanja, kada izvori jonizujućih zračenja dospevaju u organizam na sledeći način:
- inhalacijom (dominantno radon i njegovi potomci) i
 - ingestijom - unošenjem u organizam putem lanaca ishrane (zemljište-voda-biljke-životinje-čovjek) (Forkapić, 2013).

U zavisnosti od načina izlaganja zračenju, primenjuju se odgovarajuće metode merenja i procene radijacionog rizika:

1. kod spoljašnjeg ozračivanja meri se doza zračenja u radijacionom polju. Dozimetri direktno beleže naelektrisanje indukovano zračenjem, ta informacija se odgovarajućom kalibracijom pretvara u absorbovanu dozu – odnosno srednju absorbovanu energiju E po jedinici mase organizma m :

$$D = \frac{dE}{dm} [Gy] \quad 1.13$$

Jedinica za absorbovanu dozu od 1975. godine nosi naziv prema britanskom fizičaru Luisu Haroldu Greju (1905-1965). Ranija jedinica koja je bila u upotrebi je rad (skraćena od radijaciona absorbovana doza); $1 Gy = 100 rad$.

Međutim, problem zaštite od zračenja nije rešen poznavanjem samo absorbovane doze, jer biološki efekti zavise od tipa zračenja i prostornog rasporeda izvora zračenja i ozračenog organizma. Ove parametre uzima u obzir ekvivalentna doza H :

$$H = D Q N [Sv] \quad 1.14$$

gde je Q faktor kvaliteta zračenja, a N je proizvod svih modifikujućih faktora. Jedinici za ekvivalentnu dozu 1979. godine dato je ime Sivert (Sv) u čast švedskog fizičara Rolfa Maksimilijana Siverta (1896-1966). Ranije korišćena jedinica rem ($1 Sv = 100 rem$).

Ista jedinica (Sv - sivert) se koristi i za efektivnu dozu koja uzima u obzir i zavisnost težine oštećenja od osetljivosti određenog tkiva na datu vrstu zračenja.

2. kod internog ozračivanja dozimetrijska merenja su nemoguća - u slučaju ingestije određuje se koncentracija aktivnosti u hrani ili vodi za svaki radionuklid. S obzirom da sem nekoliko retkih čistih beta-emitera (^{90}Sr , ^3H) svi radionuklidi emituju gama-zračenje, gama-spektrometrija nezamenjiva u slučaju simultane multizotopske analize prirodnih uzoraka. Ingestiona doza se izračunava na osnovu određene koncentracije aktivnosti pojedinih radionuklida u datoj vrsti hrane i količine unete u organizam; primenom odgovarajućih modela.

Ukupna efektivna doza dobija se sabiranjem efektivne doze koja potiče od izlaganja spoljašnjem zračenju i od zračenja radionuklida unetih ingestijom i inhalacijom:

$$E = E_S + \sum_j e(g)_{j,ing} I_{j,ing} + \sum_j e(g)_{j,inh} I_{j,inh} \quad 1.15$$

gde su: E_S - doprinos spoljašnjeg zračenja ukupnoj efektivnoj dozi; $e(g)_{j,ing}$ i $e(g)_{j,inh}$ - očekivane efektivne doze po jediničnom unošenju radionuklida j unetog hranom ili udisanjem za pojedinca u starosnoj grupi g – ove vrednosti su date u zakonskoj regulativi i proračunate su na osnovu uticaja radionuklida prisutnog u crevima na druge organe i tkiva i na osnovu hemijske forme unetih elemenata; a kod inhalacije i od veličine inhaliranih čestica

$I_{j,ing}$ i $I_{j,inh}$ - odgovarajuće aktivnosti radionuklida unetih putem hrane ili udisanja.

1.10. Radijacioni rizik od prisustva radona u vodi

Postojanje radona u vodi za piće dovodi do unutrašnje izloženosti, direktno (kroz procese radioaktivnog raspada, ingestije i inhalacije) i indirektno (kada se kombinuju kao deo lanca ishrane). Merenje zastupljenosti radona u vodi za piće pomaže da se proceni rizik od izloženosti zračenju prilikom svakodnevne potrošnje vode. Rizik od radona u vodi je obično nizak u poređenju sa ukupnim inhaliranim radonom. Veća izlaganja radonu potiču od inhalacije iz vazduha zatvorenih prostorija gde može doći do značajne akumulacije radona koji se oslobađa iz podzemne mineralne vode koja se koristi u domaćinstvu ili pri rekreaciji.

Radioaktivni raspad radona u vodi proizvodi njegove potomke, pa će unošenje vode koja sadrži rastvoreni radon rezultirati i ingestijom njegovih potomaka. Radon se apsorbira u želucu i tankom crevu, mada se apsorpcija može javiti i u debelom crevu (Ishikawa, 2003; Khursheed, 2000). Domaćinstva koja imaju privatne bunare izložena su visokim dozama radona, dok se u gradskom vodovodu prečišćavanjem vode radon uklanja i tako se smanjuje njegova koncentracija.

Mere zaštite stanovništva od izlaganja radonu u pijaćoj vodi zasnivaju se na proceni efektivne doze koju stanovništvo primi konzumiranjem vode. Preporučena referentna doza (RDL-Recommended Reference Dose Level) iznosi 0,1 mSv na godišnjem nivou. RDL od 0,1 mSv odgovara 10% od granice za izlaganje stanovništva jonizujućim zračenjima od 1 mSv/god koju preporučuje Međunarodna komisija za zaštitu od zračenja ICRP (International Commission on Radiological Protection), a usvajaju i ostale međunarodne organizacije koje se bave zaštitom od zračenja: Međunarodna agencija za atomsku energiju IAEA (International Atomic Energy Agency) i Svetska zdravstvena organizacija WHO (World Health Organization).

Što se tiče radona u pravnoj regulativi propisuje se parametarske vrednosti za radon u vodi od 100 Bq/l za ispitivanja u okviru monitoringa radioaktivnosti vode za piće (2001/928/Euratom). To znači da sadržaj radona u vodi ne bi trebao da prekorači ovu vrednost. Ukoliko nacionalni programi merenja radona u vodi utvrde nivo radona iznad ove preporučene vrednosti, treba sprovesti optimizaciju zaštite od zračenja, ne ugrožavajući vodosnabdevanja na nacionalnom ili regionalnom nivou. Mere sanacije smatraju se opravdanim po osnovu radiološke zaštite bez daljeg razmatranja, ako koncentracije radona prelaze 1000 Bq/l.

Naime veliki broj istraživanja sprovedenih u državama članicama EU pokazala su da su koncentracije radona u površinskim vodama veoma niske ispod 1 Bq/l. Koncentracije radona u podzemnim vodama mogu varirati od 1 do 50 Bq/l za izvore u sedimentnim stenama, od 10 do 300 Bq/l za bunare iskopane u zemljištu i od 100 Bq/l do 50 000 Bq/l u granitnim i metamorfnim stenama koje sadrže povišene koncentracije uranijuma. Naravno postoje velike varijacije unutar geoloških regiona u koncentracijama radona u podzemnim vodama i u izvorima koje su praćene i uobičajenim sezonskim varijacijama radona (krajem jeseni i zimi su ove koncentracije najviše zbog varijacije pritiska i temperature).

Može se pokazati da voda sa sadržajem radona iznad 100 Bq/l dovodi do povećanog izlaganja jonizujućim zračenjima stanovništva, pacijenata i zaposlenih koji je redovno piju ili se u njoj kupaju. Efektivna doza primljena pri ingestiji radona i njegovih potomaka odnosi se na želudačno tkivo, kožu i krvne sudove i određuje se na godišnjem nivou preko izraza (Somlai, 2007):

$$D_{Rn} = K \times C \times KM \times t \quad 1.16$$

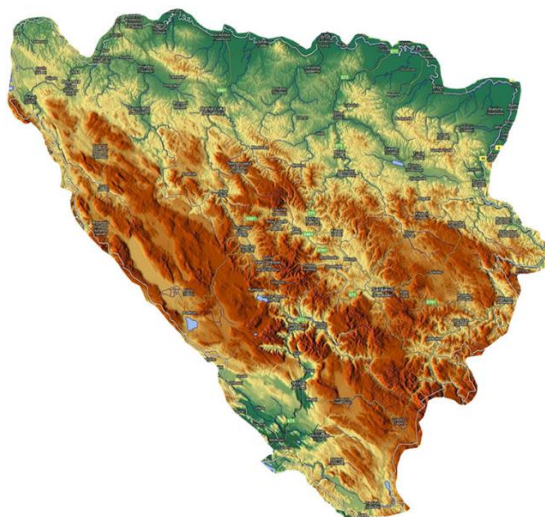
gde su: E - efektivna doza na godišnjem nivou u [mSv]; K - konverzioni faktor primljene doze pri ingestiji ^{222}Rn , a iznosi $10^{-8} \text{ Sv}\cdot\text{Bq}^{-1}$ za odrasle, a $2\cdot 10^{-8} \text{ Sv}\cdot\text{Bq}^{-1}$ za decu (UNSCEAR, 2010); C - izmerena koncentracija aktivnosti radona u vodi [$\text{Bq}\cdot\text{l}^{-1}$]; KM - prosečan unos vode (2 l po danu) i t - vreme za koje se procenjuje doza (1 godina, tj. 365 dana).

2. Ispitivano područje

2.1. Geološke karakteristike Bosne i Hercegovine

U Bosni i Hercegovini se ističu tri osnovne geomorfološke celine:

1. Južni obod Panonske nizije
2. Dinarski planinski sistem
3. Jadranski pojas



Slika 2.1 Reljefna karta Bosne i Hercegovine

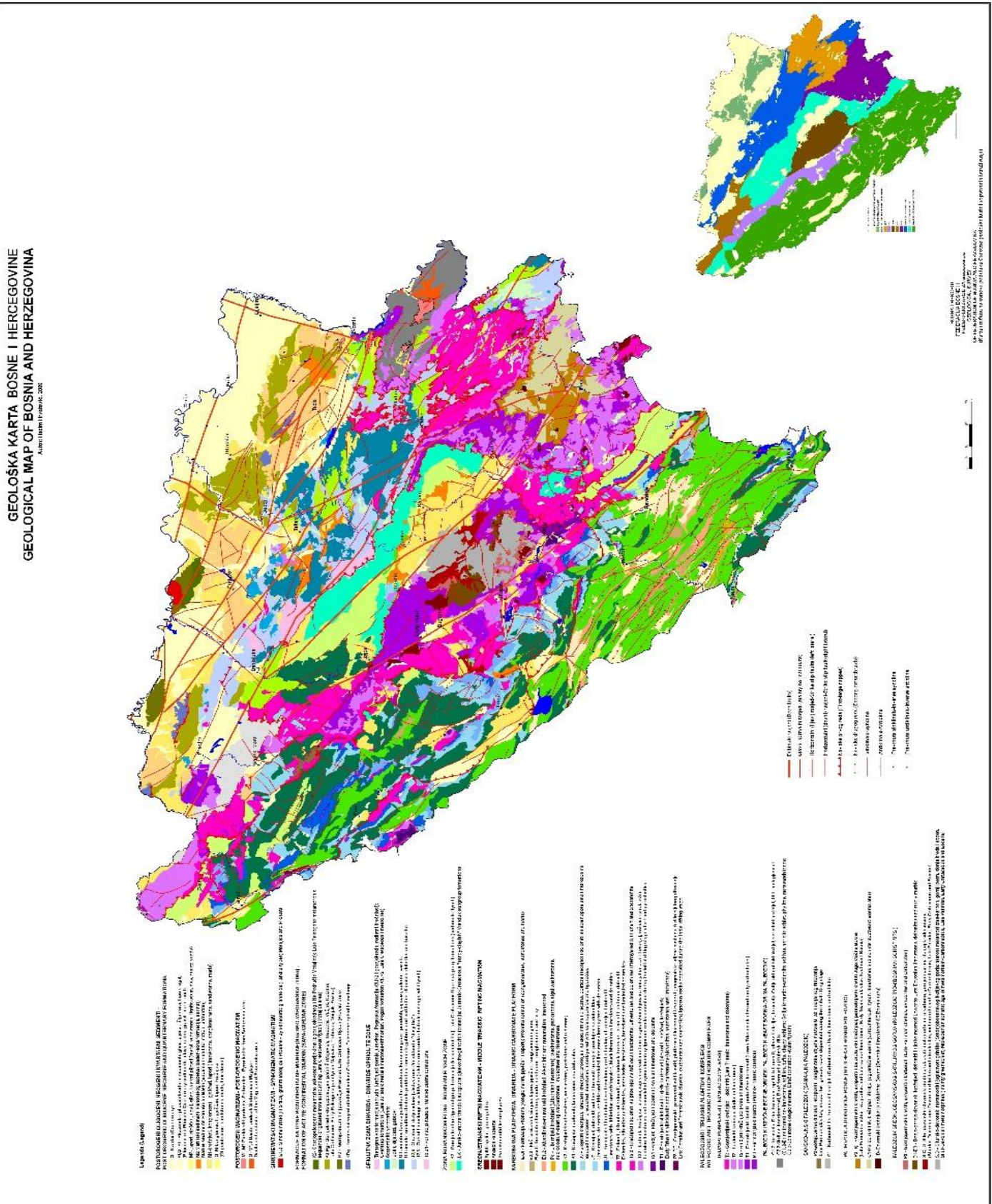
Bosna i Hercegovina se nalazi u središnjem delu Dinarida i zahvata oko 25 % njihove teritorije. U Dinaridima BiH se izdvajaju tri krupne strukturno-facijalne jedinice:

1. Spoljašnji Dinaridi koji obuhvataju prostor između jugozapadne granice sa Hrvatskom do granice sa središnjim Dinaridima; približnog pravca Bihać - Bosanska Krupa – Ključ – Prozor – Rujište – Gacko. Ova jedinica obiluje raritetnim geomorfološkim oblicima kao što su: kraška polja, pećine, kraška vrela, kanjoni, slapovi, močvare i dr.
2. Središnji Dinaridi obuhvataju prostor između pomenute granice sa središnjim Dinaridima na jugozapadu do granice sa unutrašnjim Dinaridima približnog pravca Bosanski Novi –Banja Luka – Kotor Varoš – Vranduk – Vareš – Sarajevo – Prača - Goražde. Ovu jedinica odlikuju prelepe vegetacijom obrasle visoke planine, glacijalna jezera, kraška vrela, reke i slapovi, kanjoni, brojni izvori mineralnih, termalnih i termomineralnih voda i dr.
3. Unutrašnji Dinaridi obuhvataju prostor između središnjih Dinarida na jugozapadu do Save na severu, te Drine nizvodno od Goražda na istoku. Ovu jedinicu odlikuju brojne pojave mineralnih, termalnih i termomineralnih voda koje su našle primenu u flaširanju, banjsko-rekreacionom turizmu i dr. (Čičić, 2002).



Slika 2.2 Geotektonska slika Dinarida BiH

U geološkoj građi terena Bosne i Hercegovine učestvuju tvorevine paleozoika, mezozoika i kenozoika. Najstarije poznate stene u Bosni, za koje se smatra da delom pripadaju ordovicijumu, su kvarc-sericitski i hloritno-sericitsko-kvarcni škriljci otkriveni u rejonu Busovače i na širem prostoru Vranice. Silur-devonske pjeskovito-škriljave i terigeno-karbonatne tvorevine su razvijene u terenima Vranice i Bitovnje u centralnoj Bosni, a naročito u okolini Gornjeg Vakufa, Prozora, Kreševa i Fojnice. Devon je razvijen u faciji škriljaca, te dolomita i krečnjaka koji veće rasprostranjenje imaju u terenima Vranice oko Fojnice, Kreševa i Lepenice, zatim u okolini Prače, dolini Drine i njenih pritoka i dr. Od magmatskih stijena u oblastima pojavljivanja paleozojskih tvorevina veće rasprostranjenje imaju kvarcporfiri. Analiza produkata sedimentacije i magmatizma u starijem paleozoiku ukazuje na prisustvo kaledonske orogeneze na ovim prostorima (Skopljak, 2008). Geotektonska slika Dinarida na području Bosne i Hercegovine data je na slici 2.2.



Slika 2.3 Geološka karta BiH (Hrvatović, 2009)

Slika 2.3. prikazuje geološku kartu Bosne i Hercegovine. Vapnenjačke stene ili vapnenjaci su najrasprostranjeniji agregati kalcita. Od kalcita su u Bosni i Hercegovini izgrađeni vapnenjaci krša koji se prostiru hiljadama kilometara i različite su geološke starosti: paleozoik, mezozoik, kenozoik. Kalcita ima mestimično u vlaseničkim i hercegovačkim boksitima. U paleozoološkim predelima Bosne i Hercegovine kalcit je bitan, a mestimično i jedini sastojak kristalnih vapnenaca, mramora i vapnenjačkih filita. Naslage paleozoika predstavljene su pretežno klastičnim, a manje karbonatnim tvorevinama koje su u pojedinim mestima promenile oblik. Naslaga paleozoika uglavnom ima u unsko-sanskom području, srednje bosanskim škriljavim planinama, istočnoj i jugoistočnoj Bosni te Posari i Motajici. Srednjobosanski paleozojski kompleks se proteže od Ivan-Sedla na jugoistoku do Jajca na severozapadu, te između sarajevsko-zeničkog bazena na severoistoku do gornjovrbaskog uskopljanskog bazena na jugozapadu. Paleozoik na prostoru jugoistočne Bosne je tzv. praćanski paleozoik koji se proteže istočno i severoistočno od Jahorine i Drine (Ademović & Kurtović, 2018).

U praćanskom paleozoiku zastupljene su uglavnom vapnenjačke stene iz devona i karbona. Severoistočno od praćanskog paleozoika je drinski paleozoik koji se pruža od Srebrenice do Zvornika. Paleozojske naslage razvijene su u okolini Ključa i Sanskog Mosta. Ovo područje se naziva unsko-sanski paleozoik. U unsko-sanskom paleozoiku karbon čine različiti klastiti u kojima ima i magmatskih stena, a nešto dolomita i vapnenaca, kao što se može videti na slici geološke karte BiH. Za kalcit se u Bosni i Hercegovini s pravom može reći da je sveprisutan mineral, koji nastaje u sve tri geološke sredine: sedimentne, magmatske i metamorfne. Najveće područje u Bosni i Hercegovini izrađuju vapnenjaci mezozojske i kenozojske starosti naročito u tzv. vanjskom dinarskom pojasu. Mezozojski vapnenjaci pripadaju trijasu, juri i kredi, a debljina im iznosi više hiljada metara. Mezozojske naslage široko su rasprostranjene u unutrašnjim, središnjim i vanjskim Dinaridima. Mezozojske naslage u vanjskim Dinaridima su predstavljene klasičnim karbonatnim naslagama, a središnji i unutrašnji Dinaridi imaju vulkansosedimentne i flišne naslage. Tercijalni vapnenjaci su pretežno iz perioda paleogena, a iz perioda neogena prisutni su na ograničenim područjima. Naslage jure zauzimaju najveći dio u vanjskom dinarskom pojasu, gde je uglavnom razvijen u vapnenjačko-dolomitnom facijasu (Barić et al., 1984).

2.2. Mineralni i termomineralni izvori

Prema međunarodnim standardima mineralnim vodama se nazivaju podzemne vode koje u jednom litru sadrže više od 1 grama ili više 0,1% rastvorenih materija u jednom litru vode. Ako je količina mineralnih materija u jednom litru vode iznad 50 grama ili 0,5% onda se one nazivaju rastvorima (Duhot, 1963). Evidentne granice između mineralnih voda i drugih podzemnih voda, zapravo ne postoje. Zbog toga se i nameće pitanje nastanka mineralizacije podzemnih voda. Mineralizacije podzemnih voda se često objašnjava juvenilnom, infiltracionom i sedimentacionom genezom. Juvenilna hipoteza mineralizaciju podzemnih voda dovodi u vezu sa magmatizmom, bez obzira da li je on plutonski ili efuzivni, koji juvenilne izvore snabdeva mineralnim i termalnim osobinama. Juvenilna hipoteza odnosi se na labilne morfostrukture Zemlje u kojima su završene ili još uvek traju magmatske aktivnosti. Oblasti savremenog vulkanizma podzemnim vodama daju visokotermalnu ugljenično kiselu i azotnu komponentu, koje su na većim dubinama pregrijane i čija temperatura doseže i preko 300°C. Juvenilne vode na topografskoj površini se oslobađaju visokog hidrostatskog pritiska pa izbijaju na površini u obliku vodoskoka koji se imenuje gejzirom. Izvan oblasti savremenog vulkanizma geneza mineralnih izvora i vrela se dovodi u neposrednu vezu sa procesima infiltracije i sedimentacije. Geneza ionskih soli obogaćenih specifičnim mineralnim komponentama u podzemnim vodama nastaje iz površinskih litoloških slojeva, u kojima se vrše složeni absorpcioni i biohemijski procesi sa vodom. Navedeni procesi koji učestvuju u formiranju mineralnih voda određeni su geološkom hronologijom i hidrogeološkim uslovima. Infiltracione mineralne vode manje se vezuju za morfostrukture oblika platformni, a više za geosinklinalne morfostrukture. Platformne morfostrukture, najčešće, daju visoku mineralizaciju kisele vode. Njihova mineralizacija povezana je za duboke arterske stratume. U okviru geosinklinalnih morfostrukture

geneza mineralnih i termalnih voda, najčešće je vezana za tektonske razlome na hladnoj granici vulkanita i stratuma naknadne sedimentacije karbonata. Važnu ulogu u formiranju mineralnih voda imaju gasovi, koji nastaju u post vulkanskim aktivnostima i za vreme sedimentacije.

Izvorske vode čija je temperatura viša od temperature vode normalnih izvora nazivaju se termalnim i dele se na:

- hipotermalne,
- homeotermalne i
- hipertermalne izvorske vode.

Hipotermalne vode imaju temperaturu između 20°C i 34°C, homotermalne imaju temperaturu vode približnu temperaturi čovečijeg tela i iznose od 34°C do 38°C, dok hipertermalni izvori imaju temperaturu vode višu od 38°C. Ako su termalne vode mineralne onda se one nazivaju termomineralnim vodama.

2.2.1. Izvori u BiH

Bosna i Hercegovina se ubraja u bogatije zemlje po brojnosti mineralnih i termalnih voda. U najpoznatije akrotopege ubrajaju se kisele vode u: Tešnju, Kiseljaku, Dubici kod Zvornika, Slana voda u Tuzli, Guber kod Srebrenice i dr. Među bosanskim hipotermalnim vodama posebno mesto imaju: Gornji Šeher, Laktaši, Fojnica, Olovo, Kulaši i Višegrad. U homotermalne vode ubrajaju se: Ilidža, kod Gradačca, Vrućica kod Teslića, Banja kod Gračanice i Gata kod Bihaća. Među hipertermama u Bosni i Hercegovini najpoznatije su: Ilidža kod Sarajeva, Dvorovi kod Bijeljine i Slatina kod Banja Luke. Kiseljak u Kiseljaku, Kiseljak kod Tešnja, Dragunja kod Tuzle, Tomina kod Sanskog Mosta i Slatina kod Banja Luke ubrajaju se u alkalne i zemno-alkalne vode. Vrelo Ilidža kod Gradačca, Gornji Šeher i Banja u Tuzli ubrajaju se u alkalno-murjatične mineralne vode. U murjatične mineralne vode ubrajaju se Ljeskovicica kod Žepča i mineralna voda u Tuzli. Mineralne vode u Orahovici kod Žepča, Guber i Mala kiselica kod Srebrenice pripadaju željezovitim vodama. U najpoznatije sumporovite vode u Bosni i Hercegovini ubraja se hipertermalna voda (57,5°C) na Ilidži.

Tabela 2.1 Najpoznatije mineralne i termomineralne vode u Bosni i Hercegovini

Lokacija	Temperatura (°C)	Mineralni sastav vode
Kiseljak – Kiseljak	12,2	Hidrokarbonatno-sulfatno-kalcijsko-natrijski
Slatina – Banjaluka	40,7	Sulfatno-hidrokarbonatno-kalcijsko-magnezijski
Banja Vrućica – Teslić	37,5	Hidrokarbonatno-hloridno-kalcijsko-natrijski
Laktaši	30	Hidrokarbonatno-kalcijsko-magnezijski
Kulaši – Prnjavor	30	Hidrokarbonatno-hloridno-natrijsko-kalcijski
Olovo	34,5	Hidrokarbonatno-kalcijsko-magnezijski
Fojnica	28,9	Hidrokarbonatno-kalcijsko-magnezijski
Višegrad	34,2	Hidrokarbonatno-kalcijsko-natrijski
Dvorovi – Bijeljina	56	Hloridno-hidrokarbonatno-natrijski
Gračanica	37	Hidrokarbonatno-sulfatno-natrijsko-kalcijski
Slana banja – Tuzla	27	Hloridno-natrijski
Ilidža – Sarajevo	57	Hidrokarbonatno-sulfatno-kalcijsko-natrijski
Gornji Šeher – Banja Luka	34	Hidrokarbonatno-sulfatno-kalcijsko-magnezijski
Gata – Bihać	36	Sulfatno-hloridno-kalcijsko-natrijski
Tomina Ilidža – Sanski Most	29	Hidrokarbonatno-hloridni

Mlječanica-Kozarska Dubica	14	Sulfatno-hidrokarbonatno-magnezijski
Crni Guber – Srebrenica	12,4	Željezno-arsenski
Ilidža – Gradačac	28,3	Hidrokarbonatno-sulfatno-natrijsko-magnezijski

Termomineralni izvori u užem smislu pripadaju slivovima reke Drine, Bosne, Ukline, Vrbasa, Une i neposrednom slivu Save. Slivu reke Drine pripadaju termomineralne vode u Višegradu, Crnom Guberu kod Srebrenice i Dvorovi kod Bijeljine. Slivu reke Bosne pripadaju termomineralne vode u Fojnici, Olovu, Kiseljaku, Ilidži kod Sarajeva, Tuzli, Gračanici i Tesliću. U slivu Vrbasa nalaze se termomineralne vode u Gornjem Šeheru, Slatini kod Banja Luke i Laktašima. Unskom slivu pripadaju termomineralni izvori u Gati kod Bihaća, Tominoj Ilidži kod Sanskog Mosta i Mlječanici kod Kozarske Dubice. Termomineralne vode u Kulašima kod Prnjavora pripadaju slivu reke Ukline, dok neposrednom slivu reke Save pripadaju termomineralne vode u Gradačcu.

Termomineralne vode u Bosni i Hercegovini javljaju se unutar geotektonskih kompleksa: središnjih i unutrašnjih Dinarida. Većina mineralnih i termalnih voda povezana je sa dubokim rasjednim zonama, koji uslovljavaju savremenu ascedentnu konvekciju hidrotermi u dubokom kršu. Pored toga, mogu se javiti na mestima šaržaženja trijaskih karbonata preko krednog fiša, podređeno, a primarno na hladnom kontaktu paleozojskih sa karbonatnim naslagama. Nije redak slučaj hladnog kontakta ultramafita i karbonata, odnosno jurskodijabaz rožne serije sa karbonatima.

2.2.2. Izvori u Podrinju

Mineralni i termomineralni izvori Podrinja skoncentrisani su u srpskom delu Podrinja u četiri banje: Badanja, Koviljača, Pribojska, Radaljska, a u bosansko-hercegovačkom delu u tri banje: Dvorovi, Srebrenička, Višegradska.

Podrinje, kao centralno mesto zapadnog dela Balkanskog poluostrva, meridijanski je izdužena regija oko reke Drine. Ono jednim delom pripada Srbiji, a drugim Bosni i Hercegovini. Prostire se između 43°20'59"N, 18°50'01"E и 44°53'33"N, 19°21'12"E i obuhvata prostor od nastanka reke Drine kod Šćepan Polja, na granici Crne Gore i Bosne i Hercegovini, do ušća Drine u Savu kod Sremske Rače u Srbiji. Prostor regije Podrinja čine teritorije 30 opština, površine od 14.395 km², koji naseljava 983.331 stanovnik (65% je stanovništvo sa područja opština iz Republike Srbije, a 34,6% iz opština Republike Srpske). Ova predeona celina istočne Bosne i Hercegovine i zapadne Srbije, obuhvata opštine Foča, Goražde, Čajniče, Rudo, Rogatica, Višegrad, Bajina Bašta, Srebrenica, Bratunac, Ljubovija, Zvornik, Mali Zvornik, Loznica, Bijeljina i Bogatić (Romelić & Čurčić, 2001).

Reljef Podrinja je raznolik. Najzastupljenije su planine srednje i planine niže visine. Severni deo Podrinja predstavljen je ravničarsko brežuljkastim područjem Mačve i Semberije. Od juga ka severu smenjuju se sledeće planine: Maglić (2.386 m), Zelengora (2014 m), Lelija (2032 m), Jahorina (1.910 m) i Ljubišnja (2238 m) u južnom delu Podrinja; zatim Javor (1.537 m), Zvijezda (1.675 m), Tara (1.544 m), Jagodnja (939 m) i Boranja (730 m) u srednjem Podrinju; Majeвица (915 m), Gučevo (779 m) i Cer u severnom Podrinju. Severni deo Podrinja prelazi u Panonsko-posavsku niziju. U severnom Podrinju se nalaze i dvije manje regije: Azbukovica (dolina Ljubovade), Jadar (dolina Jadra) (Ristanović, 2000). U pojasu planina srednje visine, reka Drina se probija između planinskih venaca i tu se u njenoj dolini smenjuju duboke i dugačke klisure sa manjim proširenjima, koja se obično nalaze oko ušća njenih pritoka (Gavrilović, 2005-b).

Geografsku i hidrološku osobenost Podrinja čine reke i brojna i raznovrsna prirodna jezera, savremene akumulacije i termomineralni izvori. U Podrinju se javlja veći broj mineralnih i termomineralnih izvora. Oko nekih su izgrađene banje kao posebna vrsta turističkih središta Podrinja sa naglašenom zdravstveno-lečilišnom i rekreativnom funkcijom, ali i stacionarnim, tranzitnim i manifestacionim turizmom.

2.2.2.1. Banja Višegrad

Rehabilitacioni centar "Vilina Vlas" udaljen je od Višegrada 5 km na nadmorskoj visini od 460 metara. To je savremeni objekat koji se sastoji od ugostiteljskog i medicinskog dela. Ugostiteljski deo raspolaže sa 142 ležajeva u 1/1, 1/2, 1/3 sobama i apartmanima. Gostima su na usluzi dva restorana sa 350 sjedišta. U medicinskom delu nalazi se zatvoreni bazen sa termalnom vodom veličine 15 x 12,7 m, trim kabinet sa teretanom, sauna i terapijski prostor sa medicinskim uređajima za lečenje i rehabilitaciju bolesnika. Povoljni klimatski uslovi omogućavaju efikasno korišćenje banje tokom cele godine. Termalne vode Višegradske banje na površinu izbijaju sa dubine od 180 metra, temperature 34,8 C. Imaju karakteristike radioaktivne karbonatne homeoterme. Vode Višegradske banje koriste se za prevenciju, lečenje i rehabilitaciju svih starosnih grupacija. Voda sadrži: natrijum, kalijum, kalcijum, magnezijum, aluminijum, litijum, stroncijum, mangan, željezo, hlor, jod i druge hemijske elemente koji je čine ljekovitom.

Na području banjskog kompleksa javlja se endemična vrsta paprati vilina vlas (*Adiantum capillus veneris*). Upravo po ovoj biljci i sam Centar za rehabilitaciju nosi ime Vilina vlas. Ova biljka se u narodu zove gospina vlas, ženska kosa, vodena paprat i pripada staroj tercijarnoj flori. U tercijaru je ona bila široko rasprostranjena, zahvaljujući toplim i vlažnim ekološkim uslovima. U toku glacijacije zbog snižavanja temperature, zadržala se na mediteranskim i submediteranskim područjima, a u kontinentalnoj klimi samo uz termalne izvore. Danas je njena rasprostranjenost na Dinaridima mozaična sa 49 utvrđenih staništa (Resulbegović-Deferdarević, 1999).

2.2.2.1.1. Kategorizacija termomineralne vode

Voda višegradske banje "Vilina Vlas" se kategoriše kao kalcijum, magnezijum, hidrokarbonatna, homeotermomineralna, oligomineralna, radonska voda. Upoređujući već navedene parametre dobijene analizama 1955. godine i u kasnijim vremenskim periodima, uočena je njihova konstantnost, sa malim oscilacijama u osnovnim fizičko-hemijskim karakteristikama termomineralnih voda Višegradske banje (Bukvić & Jevtić, 2013).

2.2.2.2. Banja Dvorovi

Banja Dvorovi jedan je od najvažnijih turističkih resursa Semberije. Nalazi se 6 km od Bijeljine, na prostoru između reka Save i Drine i puteva koji preko Rače i Pavlović mosta iz Srbije vode u Bijeljinu, dalje do Banja Luke i Sarajeva. Termomineralni izvori Banja Dvorovi imaju lekovitu vodu natrijumsko-kalcijum- hidrokarbonatnog sastava. Voda se uspešno primenjuje za lečenje svih oblika reumatizma, hronične ginekološke bolesti, šećernu bolest, blage neuroze i rehabilitacioni tretman postreumatskih stanja.

Prva saznanja o ljekovitosti termalnih voda "Banje Dvorovi" potiču iz 1956. godine. U potrazi za naftom, naftaši su napravili bušotinu u selu Dvorovi, južno od reke Save, iz koje je kasnije potekla vrela mineralna voda temperature 75 °C. Po pronalaženju vrela mineralne vode i njene analize krenulo se u izgradnju kupatila i banjskog objekta sa rezorvoarom za toplu vodu.

2.2.2.2.1. Lekovitost mineralne vode

Voda je natrijum-kalcijumsko hidro-karbonatno-hloridna. Analizom je utvrđeno da njeno korišćenje daje veoma dobre rezultate u lečenju hroničnih reumatskih obolenja, lakših oblika dijabetesa, hroničnog gastritisa, posttraumatskih povreda ekstremiteta i nekih oblika ekcema, hroničnih ginekoloških bolesti, lumbaga, spondiloze, splonditisa i lumboistijalgije. Gostima se preporučuje upotreba termomineralne lekovite vode u obliku kupki, koja efikasno leči sledeće:

- reumatska obolenja u smirenoj kliničkoj i laboratorijskoj fazi
- degenerativna reumatska obolenja
- stanja nakon povreda

- stanja nakon operativnih zahvata
- blaga kožna obolenja
- obolenja želuca, žuči i žučnih puteva pijenjem vode.

2.2.2.3. Srebrenička banja

Srebrenica je jedna od najstarijih naseobina na području Balkana. Na području Srebrenice postojali su tragovi života još od najranijih vremena, što je bilo uslovljeno povoljnim geografskim položajem i bogatstvom srebrne rude. Srebrenica u svojim grudima krije zlato, cink i olovo, a puna je i vode i minerala. Srebrenički mineralni izvori bili su poznati još pre dva milenijuma, a o tome svedoče i natpisi iz 220. godine, na ostacima velikog Rimskog kupatila na Gradini (Sase) pored Srebrenice. Nedaleko od Srebrenice na nadmorskoj visini od 560 m nalazi se najpoznatije srebreničko izletišta "Guber". Staza koja vodi do izletišta prolazi kroz netaknuti prirodni krajolik koji je obrastao četinarskim i listopadnim šumama, a šetnja ovim malim kanjonom daje posebne prirodne, lekovite vrednosti (samo 46 vrsta različitog drveća i drugih mnogobrojnih lekovitih biljaka koje joj daju i karakteristike vazdušne banje).

Detaljna analiza vode Crnog gubera izvršena je 1894. godine i tada je proglašena za jedno od najboljih arsenskogvozdjevito-sulfatnih radioaktivnih prirodnih vrela našeg kontinenta. Čak je smatrana boljom i od čuvene Leviko-vode (iz Vetriola u južnom Tirolu – sada Italija).

Guber voda sadrži gvožđe u dvovalentnom obliku koje se jedino tako pije u prirodnom obliku sa mogućnošću resorpcije u probavnom sistemu. Voda se koristi u vidu kupanja u kadama i bazenima te primenom različitih kupki i podvodnih masaža. Pijenje ove vode je strogo dozirano i obavlja se pod kontrolom stručnih lica, a voda se uzima strogo na izvoru i pije kroz slamku ili staklenu cevčicu da se ne ošteti gleđ zuba. Pijenjem se povećava osjetljivost organizma na UV zrake koji pomažu stvaranje D vitamina, a time povećava odbrambenu snagu organizma. U okolini Srebrenice u škriljcima i eruptivima ima raznih ruda, iz kojih voda apsorbuje gvožđe i arsen, kao i druge sastojke. Otuda na području Srebrenice ima čak 48 izvora, uglavnom gvoždevito-arsensko-sulfatne i radioaktivne vode, koja izbija iz starih rudarskih potkopa. Najznačajniji i sa najlekovitijom vodom su Vrelo Crni Guber, zatim izvori, Mali Guber, Crveno vrelo, Očna voda, Velika Kiselica, Mala Kiselica, Lepotica i drugi. Njihova voda ima temperaturu od 12°C do 14,5°C, te se ubraja u hipoterme. Kapacitet četiri kaptirana izvora je oko 300 litara u minutu. Od navedenih izvora uglavnom se koriste Crni Guber i Mali Guber, dok se ostali ne koriste, zbog nedovoljne proučenosti i nedostatka uređaja. Crni ili Veliki Guber izbija iz okerove (sdraste) podloge oko 30 m visoke i 16 m široke, a na nadmorskoj visini od 596 m, 2 km južno od Srebrenice. Nalazi se na desnoj strani slatkovodne rečice Bele vode i to na jednoj podužoj zaravni, skrivenoj u samoj četinarskoj šumi, ali ipak punoj sunca i vazduha. Voda Crnog Gubera otiče Crnom (Crvenom) rekam, čiji naziv potiče od oksida gvožđa crvenkaste boje. Glavni izvor Crnog Gubera daje u minuti oko 60 litara mineralne vode temperature 12,5°C. Glavni sadržaj vode Crnog Gubera je dvovalentno gvožđe (Fe), kojeg u 1 kilogramu vode ima 0,1232 gr. Pored gvožđa ova voda sadrži i retke minerale: bakar (Cu), kobalt (Co), mangan (Mn) i to u jednoj izvanrednoj harmoničnoj kompoziciji. Voda, takođe, sadrži i čitav niz drugih elemenata, što, sve zajedno, predstavlja prirodnu, delotvornu lekovitu kombinaciju i ovu banju čini jedinstvenom u Evropi za lečenje anemije (boravak od 28 dana omogućava stvaranje od 500 000 - 1 000 000 crvenih krvnih zrnaca). U litri ove vode ima od katjona najviše : gvožđa 0,1232 grama, zatim aluminijuma 0,0418 grama, kalcijuma 0,0100 grama, cinka 0,0071 grama, kalijuma 0,0051 gr, arsena 0,0046 grama, natrijuma i magnezijuma, a od anjona sulfata 0,5324 grama, hidroarsenata i hlora. Gvožđe i arsen daju obeležje vodi. Toliko gvoždevita voda i u takvoj kombinaciji mineralnih sastojaka je veoma retka. Po hemijskom sastavu Guber-voda je jedina na području bivše SFRJ i jedinstvena u srednjoj Evropi. Ona se može piti u prirodnom stanju, bez razblaživanja, što nije slučaj sa srodnim vodama evropskih banja.

2.2.2.4. Izvori u zoni Jasenica - Kiseljak

Severo-zapadno od Zvornika (24 km), na području sela Vitinički Kiseljak, nalazi se devet mineralnih izvora, a mineralni izvori Kozluk udaljeni su 8 km od Vitiničkog Kiseljaka prema Zvorniku. Istraživanja iz 1954. godine pokazuju da se mineralne vode Vitiničkog Kiseljaka i Kozluka mogu ubrojati u gasne vode, jer sadrže dosta rastvorenog ugljen-dioksida u sebi. Na području ovih voda je brežuljkasto zemljište, koje ima najvišu apsolutnu visinu od 550 m i opkoljava dolinu Vitinički Kiseljak sa severne, zapadne i južne strane, a na istočnoj strani prelazi u ravničarsko zemljište do Drine. Jasenički potok, kao glavna vodovodna arterija u ovom području, sastavljena je iz potoka Škrilje i Kosarlije, čija se izvorišta nalaze na ogranku planine Majevice. Glavna dislokaciona linija ima pravac pružanja zapadno-sjeverozapadno i istok-jugo-istok i proteže se dolinom potoka Jasenica, vežući se na severni rub planine Gučevo. Ova glavna dislokaciona linija, presečena je sekundarnom dislokacijom, koja se proteže od potoka Kosarlije, do severa, ka jugu. Presecište ovih dveju dislokacija nalazi se na početku doline Vitinički Kiseljak, tj. na ušću potoka Škrilje i Kosarlije. Treći sekundarni rased nalazi se u predelu Slatina. Glavne dislokacione linije se pružaju duž potoka Škrilja i prekinute su kosarlijском dislokacijom prema severo-zapadu, pod uglom od 75° i preseca skoro okomito slojeve peščara i konglomerata. Iz dubine ovih dislokacija, pod pritiskom gasa, kroz pukotine konglomerata, na levoj obali potoka Škrilje, izbijaju mineralni izvori Vitiničkog Kiseljaka, brojevi 2 i 4–8, a sa desne strane potoka Škrilje izbija izvor broj 9. U blizini presečišta glavne dislokacione linije i kosarlijске linije, nalazi se izvor broj 1, tj naspram ušća Škrilje i Kosarlije na južnom rubu doline Vitinički Kiseljak. Izvor broj 3 nalazi se u dolini desne pritoke potoka Jasenica, koja uvire 360 m nizvodnije od izvora broj 1. Ovo područje izgrađeno je od peskovitih i sitnih konglomeratičnih sedimenata, koji su podređeni laporastim škriljcima i glini. Ove tvorevine pripadaju eocenskom filsu. Bankoviti peščari svetlo-smeđe boje, kvarcnog zrna, leže na kvarcnim konglomeratima u konkordatnom položaju. Sa jako izraženim pukotinama, koje su okomite na slojne površine, ovi peščari daju izgled lažne slojevitosti. Ispod ovih peščara slede bankoviti kvarcni konglomerati, veoma čvrsti, iz čijih pukotina izbijaju svi mineralni izvori u ovom području. Mineralni izvori Kozluk nalaze se vezani uz jedan sekundarni rasjed, koji je približno paralelan jeseničkom rasjedu i na približnoj udaljenosti oko 3 km od prvog. Hladni izvor sumporne kisele vode nalazi se 3 km jugo-zapadno od Kozluka u selu Malešić, koji se nalazi vrlo visoko i nepristupačan je. Analiza geološkog profila za izvore mineralne vode Kozluk govori da se do 2 m nalazi humus, do 18 m smenjuje se pesak sa šljunkom, od 18–83 m smenjuju se laporac i krečnjak, a od 83–86 m nalazi se laporoviti krečnjak.

Mineralne vode sa izvora Vitiničkog Kiseljaka i Kozluka na osnovu dobijenih analiza spadaju u hidrokarbonatno-natrijum-hloridne vode, a prema članu 31. Pravilnika o higijenskoj ispravnosti vode za piće, Službeni glasnik Republike Srpske 40/2003, mogu se okarakterisati i kao kalcijumove, magnezijumove i gvožđevite vode. (Lazić et al., 2011).

3. Metodologija merenja

Metode brojanja i identifikacije nuklearnih događaja zasnivaju se na detekciji i registraciji efekata interakcije naelektrisanih čestica (α , β) ili zračenja (γ , X) koje nastaje kao posledica radioaktivnog raspada jezgara pojedinih nuklida sa materijalom detektora. Pored brojanja pojedinačnih događaja raspada, moguće je i određivanje vrste emitovanih čestica/zračenja, njihove energije, pa time i identifikacija pojedinih radionuklida u njihovoj smeši (spektroskopija čestica/zračenja) (Forkapić, 2013).

Detekcija niskih nivoa radioaktivnosti u uzorcima iz životne sredine zahteva upotrebu instrumenata visoke osetljivosti. Za tu svrhu, gama spektrometrija sa poluprovodničkim detektorima se široko koristi za analizu radioaktivnosti. Ova tehnika omogućava identifikaciju i precizno kvantitativno određivanje raznih radionuklida koji emituju gama zračenje u različitim vrstama materijala. Visoka rezolucija poluprovodničkih detektora omogućava relativno brzu i preciznu identifikaciju radionuklida i određivanje njihove aktivnosti na principu konvertovanja upadne energije gama zračenja u električne signale različite visine. Danas gama spektrometrija predstavlja najrasprostranjeniju nuklearnu analitičku tehniku u raznim oblastima istraživanja: monitoring nuklearnih postrojenja, medicinska fizika, nuklearna medicina, radioekologija, ispitivanje materijala, geologija, industrija, poljoprivreda, biofizika i sl. (Forkapić, 2013).

3.1. Gama spektrometrija

Gama spektrometrija je nedestruktivna metoda koja omogućava istovremeno određivanje velikog broja radionuklida gama emitera u uzorcima iz životne sredine, bez potrebe za komplikovanim i dugotrajnim radiohemijskim pripremanjima kao što je slučaj za alfa spektrometriju. Međutim, ograničena je slabom verovatnoćom emisije mnogih potencijalno korisnih emisionih linija, relativno slabom efikasnošću detektora u pojedinim opsezima energije i potrebom preciznog kalibrisanja efikasnosti detektora (Jodlowski, 2006).

Gama zračenje pokriva opseg energija od 30 keV do 3MeV. U tom opsegu se, putem interakcija zračenja sa materijom detektora, može formirati spektar zračenja, na osnovu kojeg se vrši identifikacija radionuklida od kojih zračenje potiče kao i njihova koncentracija u ispitivanom materijalu.

Prednost gama spektrometrije je u tome što omogućava direktna merenja masivnih uzoraka uz minimalnu pripremu. Na primer, kod čvrstih materijala kao što su zemljište ili sedimenti, uzorak se obično može direktno postaviti u nosač ili kontejner nakon osnovne pripreme kao što je sušenje i usitnjavanje.

Za poboljšanje efikasnosti detekcije, koristi se poseban kontejner, Marineli čaša koja naleže na kapu detektora. Važno je da pripremljeni uzorci odgovaraju fizičkoj geometriji referentnih materijala koji se upotrebljavaju za kalibraciju gama spektrometara. Najčešće to nije slučaj, pa se za prelazak na nove geometrije i matrice uzorka, koristi program ANGLE za izračunavanje efikasnosti detektora, putem koncepta efektivnog prostornog ugla. Bitni parametri su visina uzorka, prečnik, hemijski sastav i gustina. Sadržaj radionuklida u uzorcima pijaće vode određen je gamaspektrometrijskom metodom upotrebom HPGe – germanijumskih detektora visoke čistoće koji se nalaze u olovnoj zaštiti. Pripremljeni uzorak homogeno pakovan u cilindričnu geometriju se u laboratorijskim uslovima postavlja u kontaktnoj geometriji na etalonirani HPGe poluprovodnički detektor i snima se gama spektar uzorka. Obradom snimljenog spektra u odgovarajućem softveru vrši se kvalitativna i kvantitativna analiza, odnosno na osnovu pozicije fotovrhova u gama spektru, određuje se koji radionuklid je prisutan u uzorku, a na osnovu površine fotovrhova određuje se koncentracija aktivnosti radionuklida u uzorku.



Slika 3.1 Gama-spektrometarski sistem korišten za merenja

Merenje uzoraka iznosilo je tipično oko 80 ks. Kalibracija detektora izvršena je sertifikovanim referentnim materijalom – smešom radionuklida gama emitera u matriksu smole cilindrične geometrije CZECH METROLOGY INSTITUTE Cert.No:1035-SE-40001-17. Gama spektri uzoraka su prikupljeni i analizirani pomoću programa GENIE 2000 Spectroscopy System Software, proizvođača Canberra USA. Sve merne nesigurnosti su prikazane na nivou tačnosti 95%.

Za analizu sadržaja radionuklida u smoli korišćen je germanijumski detektor HPGe relativne efikasnosti 100%, model GX10021 u originalnoj zaštiti od olova debljine 15 cm, proizvođača Canberra Packard kao što je prikazano na Slici 3.1.

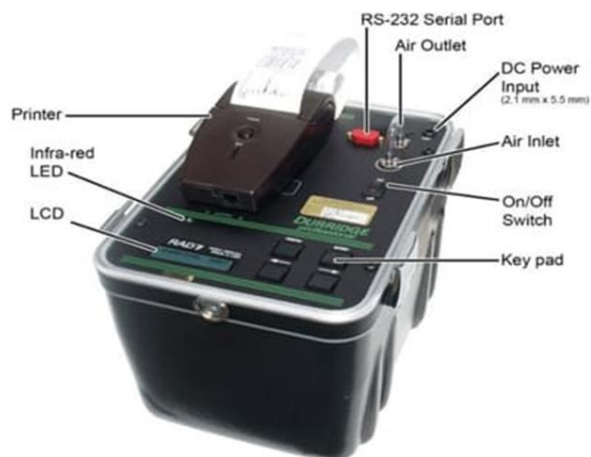
Ovaj detektor ima prošireni merni opseg od 6 keV do 3 MeV i tanak prednji prozor na kapi detektora koji omogućava detekciju niskoenergetskih fotona. Relativna efikasnost ovog detektora je 100% (ekvivalentno apsolutnoj efikasnosti 3"x 3" NaI(Tl) detektora na 1332 keV), što odgovara aktivnoj zapremini detektora od 380 cm³. Spektrometar je zatvorenog koaksijalnog tipa sa U kriostat konfiguracijom.

3.2. Aktivni radonski detektoro RAD7

Alfa spektrometrijska metoda je tehnika koja omogućava neprekidno praćenje varijacija nivoa ²²²Rn u vazduhu. Kada dođe do značajnih oscilacija u koncentraciji radona, to može ukazivati na procese koji imaju značajan uticaj na povećanje prisustva radona u vazduhu. Opisana metoda, u zavisnosti od dostupnih mernih uređaja, može se takođe primeniti za određivanje koncentracije radona u vodi i zemljištu.

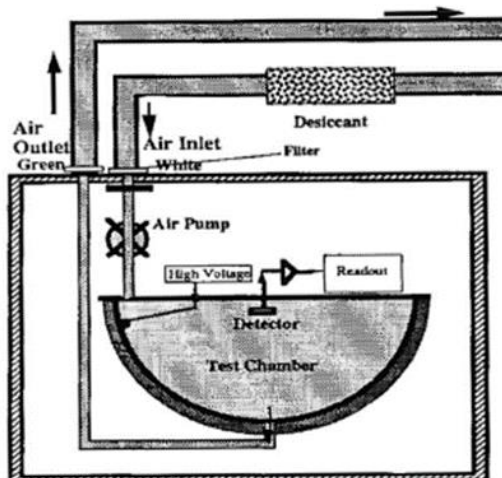
Značajna prednost alfa spektrometrijske metode jeste sposobnost preciznog razdvajanja energije svake emitovane alfa čestice. Time se omogućava tačno utvrđivanje porekla detektovane alfa čestice, identifikacija od kog izotopa potiče, od ²¹⁸Po, ²¹⁴Po ili ²¹⁶Po. Takođe i razdvajanje različitih tipova radona, kao naprimjer "stari" od "novog" radona, radon od torona, signal od šuma.

RAD7 je jedan od alfa spektrometara koji može da se koristi za merenje koncentracije radona u vodi, vazduhu i zemlji. Ovaj uređaj je mobilan zahvaljujući svom baterijskom napajanju i kompaktnom dizajnu. Moguće ga je koristiti na terenu, ne samo u laboratorijskim uslovima. To je veoma bitno za merenja koja je moguće izvoditi samo na licu mesta (koncentracija radona u zemljištu, podzemnim prostorijama, traženja pukotina ...).



Slika 3.2 Spoljašnji izgled uređaja RAD7

Osnova ovog uređaja je polusferna komora zapremine 0,7 litara obložena sa unutrašnje strane materijalom koji je dobar električni provodnik (Slika 3.3). U centru polusfere se nalazi ravni silicijumski α detektor koji je jonski implantiran. Visoki napon održava razliku potencijala između unutrašnjeg provodnika i detektora od 2 kV do 2,5 kV, stvarajući na taj način električno polje unutar zapremine detektorske komore. Funkcija električnog polja je da usmerava pozitivno naelektrisane čestice ka površini silicijumskog detektora. Automatska pumpa omogućava protok suvog vazduha brzinom od 1 l/min kroz komoru, na ulazu u komoru postoji filter koji sprečava ulazak radonovih potomaka u komoru i time omogućava merenje samo koncentracije radona u komori dok svi njegovi potomci ostaju nataloženi na filteru. Jezgra radona ^{222}Rn koja se nalaze unutar komore se raspadaju na jezgra polonijuma ^{218}Po , ova jezgra polonijuma su pozitivni joni i ona se električnim poljem navode na silicijumski α detektor na kome se talože. Nataloženi polonijum ^{218}Po se raspada α i β raspadom, α čestica se detektuje u zapremini detektora sa tačno određenom energijom α čestice koja nastaje raspadom polonijuma ^{218}Po , ta energija je 6,03 MeV. Svi nastali β raspad se neće detektovati, a drugi α raspad se detektuju, ali sa drugom upadnom energijom. Alfa čestice nastale raspadom radona ^{222}Rn u vazduhu unutar zapremine komore se neće detektovati, jer nastaju u vazduhu, a ne na površini detektora, jer na površini se ne talože atomi radona jer su hemijski inertni i električno neutralni i ne mogu biti privučeni električnim poljem. Principijelna šema unutrašnjosti uređaja je data na sledećoj slici:



Slika 3.3 Šema komore za detekciju zračenja

Moguće je biranje i zadavanje protokola merenja, broja ciklusa, dizajna izveštaja i režima rada pumpe (normal ili sniff mod). Kada se merenje završi, dobijeni podaci se mogu skinuti preko Capture programa u vidu excel tabele sa neophodnim korekcijama na vlažnost unutar aktivne komore. Moguće je štampati izveštaj koji sadrži sledeće informacije: srednju koncentraciju aktivnosti radona(torona) u toku datog vremenskog perioda; standardnu devijaciju srednje koncentracije; datum kao i tačno vreme kada je merenje okončano; temperaturu i vlažnost unutar merne komore; stanje napunjenosti baterije, ukupan broj detektovanih čestica; broj detektovanih čestica po energetskim opsezima i njihov procenat u odnosu na ukupan broj; histograme srednjih koncentracija za svaki od izabranih ciklusa merenja i kumulativni alfa spektar.

Za merenje koncentracije radona u uzorcima vode potrebno je instalirati dodatne adaptere i dodatke koji omogućuju takvu vrstu merenja. Koristi se sistem za babilovanje vode i istiskivanje vazduha iz posude sa uzorkom vode. To je zatvoren sistem i u njemu je zapremina vazduha i vode konstantna i nezavisna od protoka vazduha. Način uzorkovanja radona iz vode, vazduha i zemljišta, kao i samo rukovanje ovakvim uređajima propisani su standardnim procedurama međunarodnih agencija.

Faktori koji utiču na preciznost i tačnost dobijenih rezultata pomoću RAD7 detektora su: tehnika uzorkovanja, koncentracija i zapremina uzorka, vreme merenja, temperatura, relativna vlažnost i nivo pozadinskog zračenja.

4. Gama spektrometrijsko određivanje radijuma u vodi primenom jonoizmenjivačkih smola

Merenje koncentracije radijuma u prirodnim mineralnim ili podzemnim vodama je važno u proučavanju hidrosferskih i geohemijskih procesa, ali i zbog kontrole zdravstvene ispravnosti vode za piće. Iako je sadržaj radijuma u vodi veoma nizak, obično reda veličine mBq/l, ovaj element je izuzetno toksičan i ima tendenciju da se akumulira u kostima sisara zbog hemijskog ponašanja sličnog drugim zemnoalkalnim metalima (kalcijum, barijum i stroncijum). Potrošnja hrane i vode koja sadrži izotope radijuma, zajedno sa njihovim kratkotrajnim radioaktivnim potomcima sa visokim specifičnim aktivnostima, može značajno povećati unutrašnju dozu zračenja pojedinaca (Jia & Torri, 2007). Zbog tog je neophodno razviti brzu i preciznu metodu za merenje sadržaja radijuma u vodi sa dovoljno niskim granicama detekcije. Izuzetno, neke mineralne ili geotermalne vode mogu sadržati ^{226}Ra i do koncentracija reda veličine Bq/l (Cinelli et al., 2019).

Katjonske jonoizmenjivačke smole su prepoznate kao najbolja dostupna tehnologija (BAT) za uklanjanje radijuma iz vode sa efikasnošću do 99 % u zavisnosti od izbora smole, pH vrednosti i konkurentnih jona (Fan et al., 2016). U ovom radu analizirana je moguća upotreba komercijalne jonoizmenjivačke smole za pripremu uzoraka vode za gama spektrometrijska merenja. Ova metoda daje dovoljno niske granice detekcije za određivanje radijuma u uzorcima vode bez potrebe za komplikovanom i dugotrajnom radiohemijskom pripremom. Određena je efikasnost detekcije i minimalna detektabilna aktivnost MDA i izvršeno poređenje sa drugim metodama pripreme uzoraka vode koje se najčešće koriste u standardnim laboratorijskim procedurama.

4.1. Metode pripreme uzoraka

Za gama-spektrometrijska merenja uzoraka vode se koriste tri uobičajene procedure pripreme uzoraka u zavisnosti od zahtevanih limita detekcije. Prilikom uzorkovanja vode pazi se da ne dođe do kontaminacije uzorka korišćenjem rukavica i ispiranjem posude za uzorkovanje i kanistera nekoliko puta vodom iz česme na mestu uzorkovanja. Na mestu uzorkovanja se nedvosmisleno identifikuje uzorak obeležavanjem kanistera kako ne bi došlo do naknadne zamene uzoraka. Nakon prikupljanja, uzorci vode se zakišeljavaju da bi se sprečila adsorpcija radijuma na zidovima nosača uzorka koji su najčešće od plastičnih materijala.

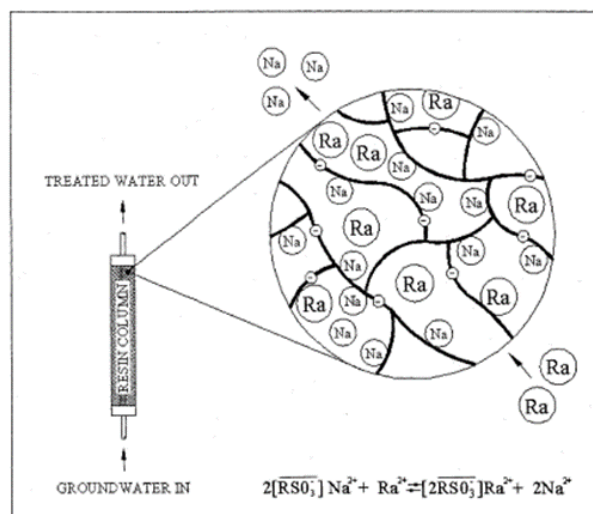
Kod direktnih merenja tako zakišljeni uzorak se sipa u posudu za merenje cilindrične ili Marineli geometrije koja je pogodnija zbog veće efikasnosti detekcije. Za ovo istraživanje korišćene su plastična posuda cilindrične geometrije zapremine 500 ml i Marineli geometrije zapremine 450 ml. Nakon sipanja vode u ove plastične nosače, tako pripremljen uzorak se postavlja na kapu germanijumskog detektora poznate efikasnosti i startuje merenje na gama-spektrometerskom sistemu.

Jedna od metoda pripreme koja se češće koristi je uparavanje do suvog ostatka ili do manje zapremine, čime se postiže prekoncentracija radionuklida. Uparava se početna zapremina uzorka 20 l – 25 l, koja je presuta u posude obložene aluminijumskom folijom. Nakon uparavanja, koje najčešće traje nekoliko dana u termostatisanim sušnicama na (70-100)°C, aluminijumska folija na kojoj se nalazi suvi ostatak, se homogeno pakuje u cilindričnu plastičnu posudu za merenje. Radionuklidi ostaju na aluminijumskoj foliji u vidu suvog ostatka i reprezentuju celokupnu količinu vode koja se uparila.

Za prekoncentrisanje radionuklida iz velike zapremine vode za gama-spektrometrijsko određivanje sadržaja radionuklida, može da se koristi MnO_2 precipitacija. Ovo je takođe veoma efikasan metod za prikupljanje radijuma i ostalih radionuklida gama-emitera iz vode (torijuma, uranijuma, polonijuma, aktinijuma i olova) (IAEA, 2010). U polaznu zapreminu vode se dodaje

kalijum-permanganat KMnO_4 , nakon čega se uzorak zagreva do 50°C uz konstantno mešanje. Potom se dodaje vodonik-peroksida H_2O_2 (dok rastvor ne dostigne $\text{pH} = 7$) i nastavlja se sa mešanjem sve dok se interakcija među jedinjenjima ne završi. Nakon taloženja voda se filtrira kroz filter-papir na kojem se zadržavaju prisutni radionuklidi. Da bi se sprovela gama-spektrometrijska analiza sadržaja radionuklida, filter-papir se suši i homogeno pakuje u plastičnu kutiju cilindričnog oblika koja se postavlja na kapu germanijumskog detektora poznate efikasnosti.

Katjonske jonoizmenjivačke smole sadrže pozitivne jone koji se selektivno zamenjuju pozitivnim jonima iz vode kao što je ^{226}Ra (Slika 4.1). Efikasnost ovih smola u mnogome zavisi od selektivnosti jona, tj. od njihove valence i atomskog broja jona, što je razlog za lakše vezivanje jona radijuma od jona magnezijuma ili kalcijuma (McMahon, 2008). Fizičke osobine smole od kojih zavisi njihova selektivnost su veličina pora i funkcionalne grupe kojima su joni vezani za smolu.



Slika 4.1 Jonoizmenjivačka kolona i princip uklanjanja radijumovih jona iz vode

U eksperimentu je korišćena smola Lewatit TP207. Analizirani su uzorci pijaćih voda i voda iz geotermalnih izvora. Početna zapremina od 10 l zakišeljene vode je propuštana kroz kolonu sa smolom podešenog protoka oko 1 ml/min. U cilju proučavanja primene ovakve smole za uklanjanje radijuma iz vode izvršena je procena MDA za gama-spektrometrijsku metodu određivanja radijuma u vodi za različite metode pripreme uzoraka vode, početne zapremine i poznate geometrije merenja.



Slika 4.2 Prikaz postupka propuštanja zakišeljene vode kroz jonoizmenjivačku kolonu

4.1.1. Određivanje minimalne granice detekcije MDA za različite pripreme uzoraka vode

MDA za određivanje sadržaja ^{226}Ra u vodi gama-spektrometrijskom metodom za različite primenjene procedure pripreme i prekoncentrisanja uzoraka su proračunate na osnovu Kirijeve jednačine (Currie, 1968):

$$MDA = \frac{2.71 + 4.65\sqrt{Rt}}{tp_{\gamma}\epsilon V} \quad 4.1$$

gde su: R brzina brojanja u fonskom spektru, t vreme merenja (86400 s), p_{γ} prinos gama linije, V početna zapremina uzorka vode i ϵ efikasnost detekcije za odabranu energiju proračunata za specifičnu matricu merenog uzorka i geometriju i material nosača uzorka. Za levatit korišćeni su sledeći podaci za gustinu od $0,9\text{g/cm}^3$ geometriju cilindričnog plastičnog nosača od 60 mm x 30 mm. Iz formule (4.1) može se uočiti da duža vremena merenja i veće početne zapremine uzorka vode mogu dodatno sniziti MDA za dati detektor i datu efikasnost.

U Tabeli 4.1 date su dobijene vrednosti za sve gore opisane procedure pripreme uzoraka vode za gama-spektrometrijska merenja. Za određivanje radijuma ^{226}Ra odabrana je gama linija od 186,1 keV umesto post-radonskih linija, zbog mogućnosti merenja uzorka neposredno nakon pripreme bez čekanja da se uspostavi radonska ravnoteža (oko 40 dana). Međutim, nedostatak ovakvog izbora gama linije je relativno mala verovatnoća gama prelaza (3,28 %) i dodatno mogućnost preklapanja sa gama linijom uranijuma ^{235}U od 185,7 keV sa daleko većom verovatnoćom emisije fotona od 57,24 %. Ipak u većini slučajeva ova linija se može pripisati radijumu ^{226}Ra uzimajući u obzir prirodnu zastupljenost ^{235}U (izotopski odnos $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ od 0,073) i zanemarljivu prisutnost uranijuma u pijaćim vodama.

Tabela 4.1 Procenjene MDA za različite procedure pripreme uzoraka vode

R.br.	Procedura pripreme	Efikasnost detekcije ϵ (186,1 keV)	MDA za ^{226}Ra (186,1 keV) [mBq/l]
1.	direktno merenje cilindar 0.5 l	0,031	2000
2.	uparavanje iz 10 l na Al	0,063	50
3.	MnO ₂ precipitacija iz 10 l	0,074	40
4.	Smola Lewatit TP207 iz 10 l	0,089	15

5. Rezultati merenja i diskusija

Uzorkovanje mineralnih voda za analizu vršeno je na regiji Podrinja, koja se nalazi u istočnom delu Republike Srpske, BiH. Ovu regiju karakteriše nekoliko značajnih banja Republike Srpske, kao i veliki broj mineralnih izvorišta. Navedene banje su poznate po bogatoj tradiciji u vezi sa lečenjem i velnesom i za njih postoje dokazi o pozitivnim učincima na zdravlje, kao na primer ublažavanje reumatskih bolesti u Višegradskoj banji što budi interes za utvrđivanje radiološkog sastava tih voda, pre svega iz naučnog interesa, radi utvrđivanja prisustva radijuma i radona, provere usklađenosti sa regulatornim zahtevima aktivnosti radionuklida u mineralnim vodama, takođe i zbog turističkog značaja.

Pri uzorkovanju mineralnih voda za određivanje radijuma korišteni su plastični kanisteri zapremina 5l, 10l i 20l. Zbog tendencije „lepljenja“ radijuma na zidove kanistera, radi poništavanja uticaja prethodno uzorkovanih voda kanisteri su isprani mineralnom vodom koja se skuplja, a zatim je natočena količinu za merenje. Voda je uzimana direktno sa izvorišta, odnosno česama i u trenutku uzimanja uzoraka beleženi su podaci o vremenu i datumu uzorkovanja, kao i koordinate i nadmorska visina lokacije, što se može videti u tabeli 5.1.

Za određivanje radona u mineralnim vodama koriste se staklene flaše sa teflonskim čepom. Za relevantne rezultate pravilno uzorkovanje je ključan faktor. Upravo iz tog razloga se koriste navedene bočice, pri čemu teflonski čepovi ne dozvoljavaju difuziju radona tokom transporta do laboratorije. Zbog opasnosti od emanacije radona iz vode u gasovitu fazu čime se smanjuje pouzdanost i tačnost merenja, potrebno je da uzorak vode do vrha ispuni bocu tako da ne bude vazduha u njoj. Poželjno je boce puniti pod što jačim mlazom vode direktno ispod česme, pustiti da dođe do preliivanja bočice i tada se pod mlazom zatvara boca. Nakon toga se može proveriti okretanjem boce da li je dobro uzorkovana voda, ako se okretanjem boce ne uočavaju mehurići vazduha može se smatrati da je izvršeno idealno uzorkovanje.

Tabela 5.1 Mineralni izvori uzorkovanih voda sa GPS podacima i vremenom uzorkovanja

R.br	Mineralni izvor	GPS koordinate lokacije	Nadmorska visina	Datum uzorkovanja	Zapremina [l]
1.	Vilina vlas	43°49'07"N 19°18'24"E	414 m	13.6.2023. u 10:55	20
2.	Čajniče – Luke	43°34'43"N 19°03'40"E	690 m	13.6.2023. u 13:07	20
3.	Rogatica – Toplik	43°47'51"N 18°59'58"E	545 m	14.6.2023. u 10:06	10
4.	Vlasenica pećina	44°09'32"N 18°55'31"E	1000 m	14.6.2023. u 11:52	5
5.	Srebrenica Crni Guber–1. voda za oči	44°06'04"N 19°19'13"E	590m	14.06.2023 u 13:40	10
6.	Srebrenica Crni Guber-2	44°06'06"N 19°19'10"E	550m	14.6.2023. u 13:53	10
7.	Srebrenica Crni Guber – 3. voda Lepotica	44°06'05"N 19°18'59"E	500m	14.6.2023. u 14:20	10

8.	Srebrenica Crni Guber – 4. voda za sinuse	44°06'08"N 19°18'54"E	250m	14.6.2023. u 14:30	10
9.	Kozluk Kiseljak	44°29'56"N 19°06'40"E	141m	14.6.2023. u 16:52	15
10.	Vitnički Kiseljak park	44°32'00"N 19°02'47"E	247m	14.6.2023. u 17:20	20
11.	Banja Dvorovi	44°48'25"N 19°15'46"E	87m	14.6.2023. u 19:50	20

Uzorci su tokom 13.6. i 14.6. 2023. godine uzeti sa osam lokacija na području istočnog dela Republike Srpske. Prvog dana prikupljanja uzoraka, uzete su vode iz hamama u okviru banje Vilina Vlas u Višegradu. Poznato balneološko lečilište, čije mineralne vode povoljno utiču na tretman reumatičnih, neuroloških i drugih bolesti.



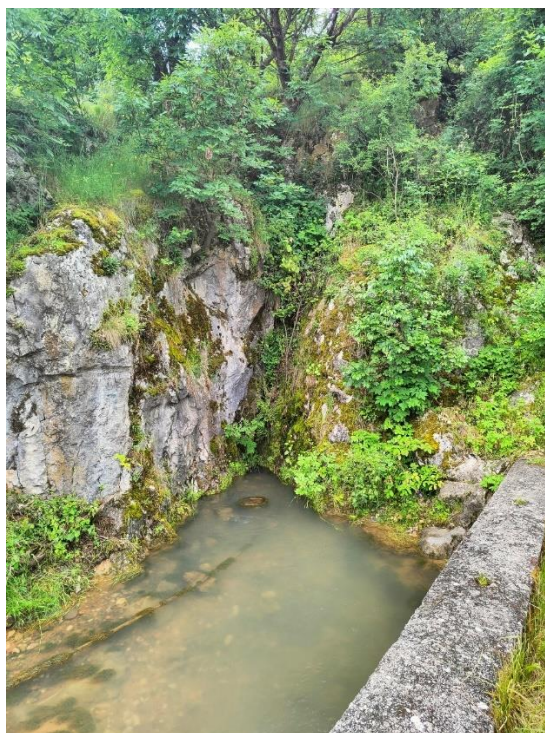
Slika 5.1 Hamam pored hotela Vilina Vlas

U okolini Čajniča se nalazi nekoliko mineralnih izvora pored izvora u Lukama. Sve vode su visoko mineralizovane, a na mestima izviranja voda primetno je taloženje naslaga željeznih hidroksida (Slika 5.2).



Slika 5.2 Izvor Kiseljak, Luke kod Čajniča

Narednog dana, 14.6. uzorkovana je voda na vrelu Toplik u Rogatici. Vrelo Toplika je tipično kraško vrelo. Izvire iz jedne veće pukotine u steni iznad koje se se diže strmi krečnjački odsek, visok 6-7 metara (Slika 5.3). Tu površinski krečnjaci trijasko starosti izdanjuju ispod nepropusnih vulkanogeno-sedimentnih formacija u podlozi. Bočna barijera podzemnim vodama su pleistoceni laporci koji izgrađuju rogatičku kotlinu. Tokom godine vrelo ima ujednačen proticaj (60 litara/sec) i temperaturu vode od 13 do 16°C što je uslovljeno dubljom cirkulacijom podzemnih voda u trijaskim krečnjacima, ispod vulkanogeno-sedimentnih formacija i povremenim mešanjem sa površinskim vodama.



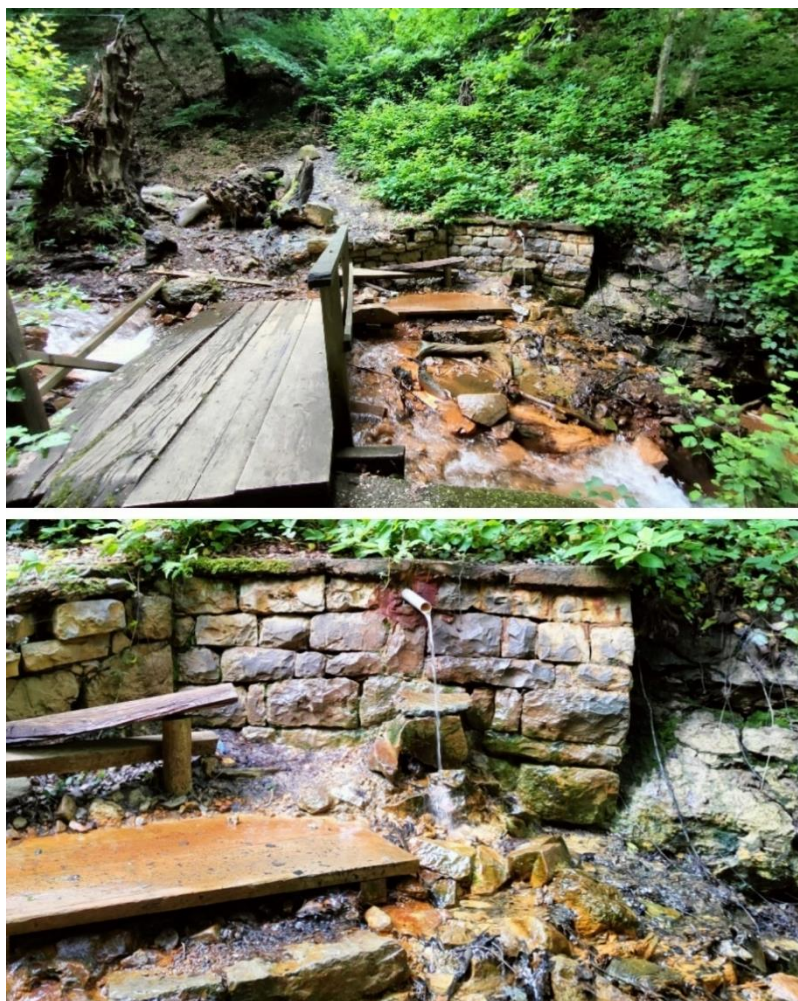
Slika 5.3 Vrelo Toplik, Rogatica

Zatim sa česme kod odmarališta na magistralnom putu Han Pijesak – Vlasenica, pored pećine Igrište, na teritoriji opštine Vlasenica (Slika 5.4).

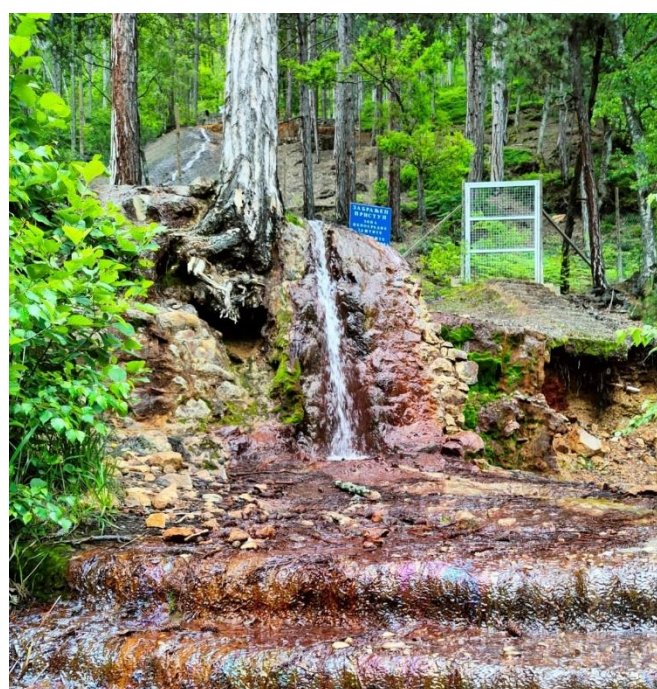


Slika 5.4 Vrelo kod pećine Igrište, Vlasenica

Posle Vlasenice odlazi se na lokaciju Srebrenice, gde se nalazi Banja Guber. U Banji Guber postoji veliki broj izvora, koji su još uvek nedovoljno ispitani. Smatra se da voda sa ovih izvora leči kožne bolesti, anemiju, vid i druge bolesti. Skoro svaki od izvora nosi i narodno ime. Izdvaja se pet lekovitih vrela, a to su: Crni (veliki) guber, Mali guber, Sinusna voda, Očna voda, Izvor Lepotica. Voda je uzorkovana sa četiri od navedenih vrela, izuzev sa Malog gubera koji je u trenutku uzorkovanja presušio.



Slika 5.5 Očna voda, Guber banja



Slika 5.6 Crni (Veliki) Guber



Slika 5.7 Voda Ljepotica, Guber banja



Slika 5.8 Sinusna voda, Guber Banja



Slika 5.9 Uzorkovanje vode sa vrela Sinusne vode, Guber banja

Šesta lokacija odakle su uzeti uzorci za radiološku analizu bila je Kiseljak u Kozluku, opština Zvornik. Mineralne vode sa ovog područja se eksploatišu u fabrici mineralne vode „Vitinka“ d.o.o. Kozluk. Na osnovu analiza mineralna voda „Vitinka“ spada u:

- hidrokarbonatno-natrijum-hloridne vode,
- mineralizacije 3.726 do 5.556 mg/l,
- temperature 12 °C,
- pH vrednosti 6,5
- sa eshalacijama H_2S , CO_2 i O_2 . (MINISTARSTVO INDUSTRIJE, ENERGETIKE I RUDARSTVA, 2011)



Slika 5.10 Izvor Kiseljaka u Kozluku, Zvornik

Na području opštine Zvornik posećena je još jedna lokacija, sedma po redu, sa izvorima mineralnih voda, u mestu Kiseljak, kod Zvornika. Na malom rastojanju (oko 500 m) na površini registrovano je isticanje mineralne vode različitog hemizma i mineralizacije na čak devet mesta. Za potrebe merenja uzorkovana je voda Petica ili „Bubrežna voda“ koja se pokazuje uspešnom pri lečenju kamenca i peska u bubregu.

Na osnovu do sada urađenih analiza mineralne vode u Kiseljaku kod Zvornika spadaju u:

- hidrokarbonatno-natrijum-hloridne vode, mineralizacije 2.959 do 7.634 mg/l,
- temperature 12 °C, pH-6.5 i
- sa eshalacijama gasova CO_2 , CO i O_2 .
- sa povećanim sadržajem sumpora i gvožđa, (MINISTARSTVO INDUSTRIJE, ENERGETIKE I RUDARSTVA, 2011).



Slika 5.11 Izvor mineralne vode Petice u mestu Kiseljak, Zvornik

Na kraju je još uzorkovana termomineralna voda iz Banje Dvorovi, u Bijeljini, smeštenoj na severoistoku Republike Srpske, između reka Drine i Save. U potrazi za naftom u selu Dvorovi napravljena je bušotina iz koje je potekla vrela mineralna voda temperature 75°C. Nakon čega su izvršene analize i izgrađen banjski objekat i kupatilo. Lekovita voda je oligomineralna i termalna, bogata natrijumom, kalcijumom, hidrokarbonatom i hloridom.



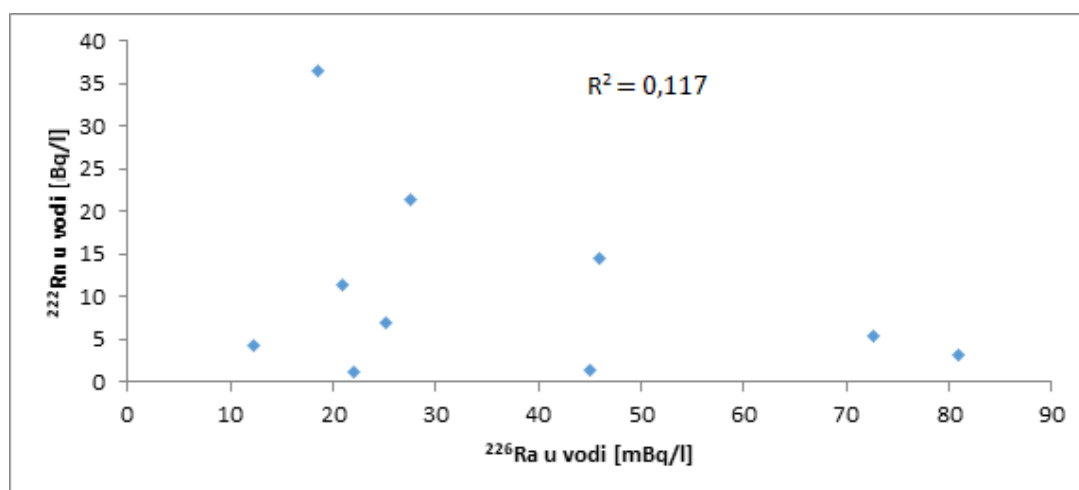
Slika 5.12 Izvor termomineralne vode Banja Dvorovi

Rezultati merenja

Tabela 5.2. Rezultati merenja koncentracija aktivnosti ispitivanih radionuklida

r.br.	Mineralni izvor	koncentracija aktivnosti (mBq/l)					²²² Rn u vodi (Bq/l)
		¹³⁷ Cs	²²⁶ Ra	²²⁸ Ra	⁴⁰ K	²³⁸ U	
1	Vilina vlas	< 4	22±2	7±2	< 21	< 60	1.28±0.05
2	Čajniče – Luke	< 3	21±3	7,5±1,3	< 21	< 25	11.3±0.9
3	Rogatica – Toplik	< 3	< 15	5,7±1,0	23±6	< 40	4.3±1.1
4	Vlasenica pećina	< 7	45±9	28±5	31±6	< 80	1.5±0.3
5	Srebrenica Crni Guber–1. Voda za oči	< 4	46±3	35,3±1,9	62±12	< 40	14.5±1.7
6	Srebrenica Crni Guber-2	< 6	82±3	380±19	216±21	780±70	-
7	Srebrenica Crni Guber – 3. voda Lepotica	< 1,6	18,6±2,1	64±4	36±11	< 40	36.5±2.9

8	Srebrenica Crni Guber – 4. voda za sinuse	< 2,7	27,6±2,1	189±9	58±11	95±14	21.3±2.0
9	Kozluk Kiseljak	< 2,8	72,7±2,1	25,8±2,3	67±10	95±12	5.3±1.5
10	Vitnički Kiseljak park	< 2,3	81±4	185±19	200±11	810±70	3.1±0.9
11	Banja Dvorovi	< 1,2	25,2±1,1	6,2±0,9	129±10	< 25	7.0±1.4

Slika 5.13 Korelacija ^{226}Ra i ^{222}Rn

Efektivne doze za godišnje izlaganje stanovništva od ingestije ispitivane vode su procenjene na osnovu formule 1.15 za izmerene koncentracije radijuma u vodi i formule 1.16. za izmerene koncentracije aktivnosti radona. Dobijene vrednosti su date u Tabelama br. 5.3. i br. 5.4:

Tabela 5.3 Efektivna doza pri godišnjem izlaganju stanovništva od ingestije radijuma

Mineralni izvor	Koncentracija aktivnosti ²²⁶Ra (mBq/l)	Izračunate doze ingestijom radijuma iz vode (mSv/god)
Vilina vlas	22	0,0014
Čajniče – Luke	21	0,0014
Rogatica – Toplik	12,3	0,0008
Vlasenica pećina	45	0,0029
Srebrenica Crni Guber– 1. voda za oči	46	0,0030
Srebrenica Crni Guber– 2. Veliki Guber	82	0,0053
Srebrenica Crni Guber – 3. voda Lepotica	18,6	0,0012
Srebrenica Crni Guber – 4. voda za sinuse	27,6	0,0018
Kozluk Kiseljak	72,7	0,0047
Vitnički Kiseljak park	81	0,0052
Banja Dvorovi	25,2	0,00162

Tabela 5.4 Efektivne doze pri godišnjem izlaganju stanovništva od ingestije radona

Mineralni izvor	Koncentracija aktivnosti ^{222}Rn u vodi (Bq/l)	Izračunate doze ingestijom radona iz vode (odrasli) (mSv/god)	Izračunate doze ingestijom radona iz vode (deca) (mSv/god)
Vilina vlas	1.28	0.00934	0.019
Čajniče – Luke	11.3	0.0825	0.165
Rogatica – Toplik	4.3	0.0314	0.063
Vlasenica pećina	1.5	0.011	0.022
Srebrenica Crni Guber–1. Voda za oči	14.5	0.106	0.212
Srebrenica Crni Guber-2	-	-	-
Srebrenica Crni Guber – 3. voda Lepotica	36.5	0.266	0.533
Srebrenica Crni Guber – 4. voda za sinuse	21.3	0.155	0.311
Kozluk Kiseljak	5.3	0.0387	0.077
Vitnički Kiseljak park	3.1	0.0226	0.045
Banja Dvorovi	7.0	0.0511	0.102

Uočavaju se varijacije merenih koncentracija aktivnosti, što je posledica složenih geoloških struktura nalazišta voda. Izmerene vrednosti koncentracije aktivnosti ^{226}Ra u (mBq/l) se kreću od 18,6 u vodi „Ljepotica“ iz Srebrenice do 82 (mBq/l) na izvoru Crni (Veliki) Guber, takođe iz Srebrenice, dok koncentracija aktivnosti radijuma u vodi sa izvora Toplik, Rogatica, je bila niža od granice detekcije. Koncentracije aktivnosti ^{228}Ra su merene u vrednostima od 5,7 (mBq/l) do 380 (mBq/l). Izmerene koncentracije aktivnosti ^{226}Ra i ^{228}Ra svih voda su u skladu sa zakonskom regulativom (< 0,5 Bq/l za ^{226}Ra i < 0,2 Bq/l za ^{228}Ra), izuzev vode sa izvorišta Crni (Veliki) Guber čija koncentracija aktivnosti ^{228}Ra iznosi 0,38 Bq/l, te kao takva ne bi smela da se koristi za piće u količinama od 2 l dnevno. Važno je napomenuti da izmerene vrednosti koncentracija mogu biti podložne uticaju obilnih padavina, koje su prethodile danima uzorkovanja mineralnih voda.

Severne terene Višegrada, gde se nalazi banja Vilina Vlas, obuhvata ofiolitski pojas Dinarida. Ofiolitni melanž se sastoji od spilita, keratofira, gabra, sijenita i granita koji su izmešani u pretežno finoklastitnim sedimentima glincima, rožnacima i pešćarima. Koncentracije ^{226}Ra javljaju se u škriljcima, vulkanskim i fosfatnim stenama praćenim granitima, glinenim stenama, pešćarom,

krečnjakom i drugim karbonatnim stenama. ^{232}Th obično se nalazi u granitnim i kiselo magmatskim stenama te se preko njega može objasniti prisustvo ^{228}Ra kao potomka ^{232}Th .

Na udaljenosti od oko 8 km severno od Čajniča, kod sela Okosovići otkrivena je veća pojava magnetita unutar sericitsko-kvarcno-hloritskih škriljaca mlađeg paleozoika, na kontaktu sa amfibolskim granitom. Radi se o dva izdužena sočivasta rudna tela (Đurić, 1963). Pored navedene pojave evidentirano je više manjih pojava kod sela Luke i na drugim mjestima u blizini intruziva amfibolskog granita. Te iz geološke strukture se da zaključiti poreklo izmerenih koncentracija aktivnosti radionuklida.

Koncentracija aktivnosti ^{226}Ra i ^{228}Ra u vodi sa vrela Toplik su jako malih vrednosti, kao i koncentracija aktivnosti ^{222}Rn . Toplik je jedan od vodonosnih slojeva karbonatne mase planine Romanije odakle vode i uzimaju radijum. Može se pretpostaviti da je na izmerene vrednosti uticao faktor otežanog pristupa direktnom izvoru vode iz stene, što omogućava oslobađanje radona, ali i verovatnoća mešanja izvorske vode sa padavinskim vodama koje su prethodile uzorkovanju. Na području srebreničke banje uočene su pojave kaolinisanog sanidinskog dacita duž potoka Crni Guber. Otkriveno je postojanje više tela kaolinisanog sanidinskog dacita. Dimenzije tela nisu pouzdano utvrđene, ali im se dužine kreću u rasponu od nekoliko stotina metara, a debljina desetak do sto metara. U različitim delovima tela stepen kaolinizacije je vrlo različit, te dovodi do različitih vrednosti koncentracija aktivnosti dobijenih u četiri uzorkovane vode sa ovih prostora.

U uzorcima iz Srebrenice i Zvornika merene su koncentracije aktivnosti uranijuma od 95 mBq/l do 810 mBq/l, što potvrđuje rezultate ranijih ispitivanja uranijuma na ovim lokalitetima. Naime tokom 1979. godine Geoinženjering iz Sarajeva i Geoinstitut iz Beograda vršili su geohemijska ispitivanja uranijuma na lokalitetu Kozluk-Zvornik. Geohemijska ispitivanja su obuhvatila podzemne i površinske vode, aluvion i čvrstu stensku masu, a izvršeno je oprobavanje, hemijsko i radiometrijsko određivanje sadržaja radioaktivnih elemenata. Time je utvrđeno da se anomalije sadržaja radioaktivnih elemenata u primarnom i sekundarnom oreolu, nalaze sa obe strane reke Sapne kod njenog ušća. Istraživanjem nuklearnih mineralnih sirovina na teritoriji BiH u periodu od 1978. do 1986. izvršena je selekcija perspektivnih rudnih rejonu i polja. Aerogamaspektrometrijskim premerom Podrinja (površina od 1900 km²) nisu nađeni izdanci urana, ali je otkriveno 30 anomalija radioaktivnosti II, III i IV reda. Najveći broj anomalija na teritoriji Republike Srpske je u paleozojskim tvorevinama Bratunca, Milića, Nove Kasabe i Drinjače, a delom u tercijarnim vulkanitima Kamenice i na ušću Sapne u Drinu, te nekoliko anomalija u krednim sedimentima oko sela Glumine (Golo & Hrvatović, 1987). Uran se nalazi u zemljinoj kori pretežno raspršen u stenama kao i njegov pratilac torijum. Najveće koncentracije vezane su za kisele, efuzivne magmatske stene. U tabeli sa izmerenim vrednostima se može videti da po pravilu u uzorcima voda sa većim vrednostima koncentracije aktivnosti uranijuma su i veće vrednosti koncentracije aktivnosti ^{228}Ra , koji je potomak ^{232}Th .

6. Zaključak

Tema ovog rada bila je razvijanje i primena brze metode pripreme uzoraka mineralnih voda za detekciju radijuma. U radu je pokazano da jonoizmenjivačka smola komercijalne prirode Lewatit TP207 može biti korišćena za pripremu uzoraka vode za gama-spektrometrijsko ispitivanje sadržaja radijuma. Korištena je brza metoda na osnovu linije od 186,1 keV bez čekanja uspostavljanja radonske ravnoteže. Osim što se izbegavaju post-radonske linije i problemi sa izdvajanjem radona u vazдушnom prostoru ispod čepa nosača uzorka, treba napomenuti da nedostatak ove metode može biti precenjivanje rezultata ako postoji prisutnost ^{235}U u vodi, zbog preklapanja sa linijom 185,7 keV, koja ima veću verovatnoću emisije fotona. Ipak, procenjuje se da ova greška ne unosi veliku neodređenost, s obzirom na malu zastupljenost ^{235}U u uzorcima iz životne sredine. Određivanjem granice detekcije MDA pokazuje se da je vrednost u procesu primene jonoizmenjivačke smole znatno niža u odnosu na druge gama-spektrometrijske procedure, što omogućava određivanje niskih koncentracija aktivnosti radijuma u vodama. MDA za izotop ^{228}Ra su bile niže u odnosu na izotop ^{226}Ra , zbog veće verovatnoće emisije fotona gama linija koje se koriste za određivanje koncentracije aktivnosti ^{228}Ra (338,3 keV i 969,0 keV od ^{228}Ac , 241,0 keV od ^{224}Ra , 238,6 keV od ^{212}Pb i 727,3 keV od ^{212}Bi).

Određivanjem koeficijenta linerne korelacije, "R squared" radona u odnosu na radijum čija je vrednost znatno niža od 1, zaključuje se da ne postoji korelacija u uzorkovanim mineralnim vodama između upoređenih radionuklida. Na osnovu izračunatih doza procenjuje se da su vode bezbedne za piće s obzirom na male koncentracije kako radijuma tako i radona. Detaljno je analizirana svaka voda sa aspekta litologije izvorišta i sadržaja radona i radijuma. Najveći sadržaj radijuma imale su vode sa izvora Srebrenica Crni (Veliki) Guber, Kozluk Kiseljak i Vitnički Kiseljak i na osnovu procenjenih doza od ingestije radijuma ove vode ne dovode do izlaganja preko 0,1 mSv/god što je granica za efektivnu dozu za ingestiju hrane. Međutim kod ingestije radona je tri vode prešlo ovu granicu i ne preporučuje se njihovo kontinuirano konzumiranje u velikim količinama. To su mineralne vode sa izvora Crni Guber-voda za oči, voda 3. Ljepotica i voda 4. za sinuse u Srebrenici. Ova metoda ima potencijal da bude od velikog značaja u praćenju radijuma u vodnim resursima i osiguranju kvaliteta voda.

Literatura:

- Appleton J.D. (2005) Radon in air and water, In: Essentials of Medical Geology: Impacts of the Natural Environment on Public Health. Selinus, O. (ed). Elsevier Amsterdam, 227– 262.
- Appleton J.D. (2005), Radon in air and water In: Essentials of Medical Geology: Impacts of the Natural Environment on Public Health, Selinus, O. (ed). Elsevier Amsterdam, 227-262.
- Barić, Lj., Trubelja, F.: Minerali Bosne i Hercegovine-Nesilikati, Svjetlost, 1984.
- Bikit I., J. Slivka, M. Vesković, N. Žikić – Todorović, Varga, S. Forkapić, D. Mrđa, J. Hansman, T. Jeftić, (2004/2005) Izveštaj o monitoringu koncentracije radona u zatvorenim prostorijama na teritoriji Vojvodine.
- Bikit, I., Slivka, J., Vesković, M., Krmar, M., Todorović, N., Mrđa, D., . . . Bikit, K. (2012). Izveštaj o realizaciji projekta-Praćenje radioaktivnosti zemljišta na teritoriji Grada Novog Sada tokom 2012. godine.
- Blundy, J. & Wood, B. (2003). Mineral-melt partitioning of uranium, thorium and their daughters. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 52(1): 59–123. <https://doi.org/10.2113/0520059>.
- Brodsky, A. (1978) Handbook of Radiation Measurement and Protection, BocaRaton, CRC Press.
- Bukvić D, Jevtić M. Rezultati procesa rehabilitacije pacijenata poslije operacije lumbalne diskus hernije u Rehabilitacionom centru Vilina Vlas, Višegrad. Biomedicinska istraživanja 2013;4(2):38–43.
- Burnett WC, Moon DS, Nour S, Horwitz P, Bond A (2003)Preconcentration of radium isotopes from natural waters using MnO₂ resin. Appl Radiat Isot 59:255–262.
- Canadian Nuclear Safety Commission (CNSC), Radon and Health, INFO-0813, Ottawa, Ontario, Canada, 2011.
- Cothorn, C.R. & Lappenbusch, W.L. (1983). Occurrence of uranium in drinking water in the U.S. Health Physics, 45, 89–99.
- Čičić, S. (2002) Geološki sastav i tektonika Bosne i Hercegovine. Sarajevo: Earth Science Institute.
- Čonkić, L. (1997). Uvod u zaštitu životne sredine-skripta. Novi Sad: Prirodno-matematički fakultet.
- Damjanović, B. (1962). Principi zaštite od jonizujućeg zračenja. Beograd: Savezna komisija za nuklearnu energiju.
- Drever, J. I. (1997). The Geochemistry of Natural Waters, Prentice Hall, New Jersey, US.
- Duhot, E. et Fontan, M. 1963: Le thermalisme, „Que sais-je“ No 229, Paris.
- Eisenbud, M. & Gesell, T. (1997). Environmental Radioactivity. From Natural, Industrial, and Military Sources, 4th edition (Academic Press).
- European Commission (2001), Commission recommendation of 20th December 2001 on the protection of the public against exposure to radon in drinking water, 2001/982/Euratom, L344/85.
- Forkapić, S. (2013). Istraživanje gasovitih radioaktivnih produkata uranijuma i torijuma-doktorska disertacija. Novi Sad: Prirodno-matematički fakultet.
- Forte, M., Bertolo, A., D’Alberti, P.F., De Felice, P., Desideri, D., Esposito, M., Fresca, Fantoni, R., Lorenzelli, R., Luciani, A., Magnoni, M., Marsili, F., Moretti, A., Queirazza, G., Risica, S., Rusconi, R., Sandri, S., Trevisi, R. & Valentini Ganzerli, M.T. (2007). Standardized methods for measuring radionuclides in drinking water. J. Radioanal. Nucl. Chem. 269: 397-401. <https://doi.org/10.1007/s10967-006-0420-2>.
- G. Cinelli, M. De Cort, T. Tollefsen. (Eds.), European Atlas of Natural Radiation, Publication Office of the European Union, Luxembourg, 2019.

- Gavrilović, Lj. (2005-b). Drina sa svojim pritokama. „Drina“, Zavod za udžbenike i nastavna sredstva, Beograd i Srpsko Sarajevo.
- Grasty, R.L. and LaMarre, J.R. (2004) The Annual effective dose from natural sources of ionizing radiation in Canada. *Radiation Protection Dosimetry* 108
- Hrvatović, H. (2022). Geološki vodič kroz Bosnu i Hercegovinu. Sarajevo: Akademija nauka i umjetnosti Bosne i Hercegovine.
- I. Stojković, Optimizacija tečnog scintilacionog spektrometra za ispitivanje alfa i beta emitera u vodama, Doktorska disertacija, PMF Novi Sad, 2015.
- IAEA Analytical Quality in Nuclear Applications Series No. 19: Analytical Methodology for the Determination of Radium Isotopes in Environmental Samples IAEA/AQ/19, Vienna 2010.
- Ishikawa T, Yamada Y, Fukutsu K, et al. Deposition and clearance for radon progeny in the human respiratory tract. *Radiat Prot Dosimetry*. 2003a;105(1–4):143–148.
- J. F. McMahan, Removing radium-226 contamination from ion exchange resins used in drinking water treatment, Master's Theses, University of New Hampshire, Durham, 2008.
- J. Nikolov, N. Todorović, T. Petrović Pantić, S. Forkapić, D. Mrđa, I. Bikit, M. Krmar, M. Vesković, Exposure to radon in the radon spa Niška Banja, Serbia, *Radiation Measurements* 47 (2012) 443-450, 2012.
- Jia G, Torri G (2007) Estimation of radiation doses to members of the public in Italy from intakes of some important naturally occurring radionuclides in drinking water (^{238}U , ^{234}U , ^{235}U , ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{224}Ra and ^{210}Po). *Appl Radiat Isot* 65:849–857.
- JODLOWSKI, P., Self-absorption correction in gamma-ray spectrometry of environmental samples – an overview of methods and correction values obtained for the selected geometries, *Nukleonika* 51 (2006) 21-25.
- Khursheed A. Doses to systemic tissues from radon gas. *Radiat Prot Dosimetry*.2000;88(2):171–181.
- Krmar, M. (2013). Uvod u nuklearnu fiziku. Novi Sad: Univerzitet u Novom Sadu, Prirodno matematički fakultet.
- Kvalitet vode – Radionuklidi koji emituju gama zračenje – Metoda ispitivanja sa gama spektrometrijom visoke rezolucije SRPS EN ISO 10703:2021
- L.A. Currie, Limits for qualitative and quantitative determination. *Anal. Chem.* 40, 1968, 586 – 593.
- L'Annunziata M. F. (2012) *Handbook of Radioactivity Analysis*, Academic Press, 3rd edition.
- Langmuir, D. (1978). Uranium solution-mineral equilibria at low temperatures with applications to sedimentary ore deposits. *Geochimica et Cosmochimica acta*, 42: 547–569.
- Lawrence, E., Poeter, E. & Wanty, R. (1991). Geohydrologic, geochemical, and geologic controls on the occurrence of radon in ground-water near conifer, Colorado, USA. *Journal of Hydrology*, 127: 367–386. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(91\)90123-Y](https://doi.org/10.1016/0022-1694(91)90123-Y).
- Lazić, D. Z., Škundrić, J. V., Vasiljević, L. C., Sladojević, S. G., & Blagojević, D. D. (2011). Karakterizacija mineralnih voda Vitiničkog Kiseljaka i Kozluka. Tehnološki fakultet Zvornik, RS, BIH; Prirodno–matematički fakultet, Banja Luka, RS, BIH.
- M Komatina, *Medicinska geologija*, Tellur, Belgrade (2001) 35-156.
- M. Galán López, A. Martín Sánchez, V. Gómez Escobar, Application of ultra-low level liquid scintillation to the determination of ^{222}Rn in groundwater, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, Vol. 261, No. 3 (2004) 631-636, Spain, 2004.
- MARTIN, P., HANCOCK, G.J., Routine analysis of naturally occurring radionuclides in environmental samples by alpha-particle spectrometry, Supervising Scientist Report 180, Supervising Scientist Division, Darwin NT, (2004).
<http://www.environment.gov.au/ssd/publications/ssr/180.html>.
- MITROVIĆ, Branislava, 1973 – Radiobiologija sa radijacionom higijenom/ Branislava Mitrović, 2021 (Beograd) – 107 str. Bibliografija: str. 100-107. ISBN-978-86-920303-1-4

- Mrđa, D., & Bikit, I. (2016). Osnove fizike čestica i nuklearne fizike. Novi Sad: Prirodnomatematički fakultet.
- N. Todorović, I. Jakonić, J. Nikolov, J. Hansman, M. Vesković, Establishment of a method for ^{222}Rn determination in water by low-level liquid scintillation counter, Radiation Protection Dosimetry (2014), pp. 1–5, Novi Sad, Serbia, 2014.
- N. Todorović, J. Nikolov, T. Petrović Pantić, J. Kovačević, I. Stojković, M. Krmar, Radon in Water – Hydrogeology and Health Implication (Eds: Audrey M. Stacks), Nova Science Publishers, New York, ISBN: 978–1–63463–742–8, 2015.
- Naida Ademović, Azra Kurtović Kamen i mort kod mostova iz razdoblja Osmanskog Carstva u Bosni i Hercegovini, Građevinar 3/2018.
- Novaković M. (2001) Zaštita od ionizirajućih zračenja: propisi u Republici Hrvatskoj s komentarima, Ekoteh-dozimetrija, Zagreb.
- Onishchenko, A., Zhukovsky, M., Veselinovic, N. & Zunic, Z.S. (2010). Radium-226 concentration in spring water sampled in high radon regions, Applied Radiation and Isotopes, 68 (4-5) pp. 825-827. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2009.09.050>.
- Porcelli, D. & Swarzenski, P. W. (2003). The behavior of U- and Th-series nuclides in groundwater. Uranium-Series Geochemistry.
- Pravilnik o granicama sadržaja radionuklida u vodi za piće, životnim namirnicama, stočnoj hrani, lekovima, predmetima opšte upotrebe, građevinskom materijalu i drugoj robi koja se stavlja u promet, Sl. gl. RS 36/18, 2018.
- Resulbegović-Deferdarević A. Grad Višegrad i okolica, istorijska monografija. Izdanje pisca: Sarajevo 1934. Beograd: Čigoja štampa; 1999.
- Ristanović S. (2000). Reka Drina i Podrinje. UKAN, Beograd.
- Romelić, J., Čurčić, N. (2001). Turistička geografija Jugoslavije. PMF, Departman za geografiju, turizam i hotelijerstvo, Novi Sad.
- Sakoda, A., Hanamoto, K., Ishimori, Y., Kataoka, T., Kawabe, A. & Yamaoka, K. (2010). First model of the effect of grain size on radon emanation. Applied Radiation and Isotopes, 68(6): 1169–1172. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2009.11.070>.
- Salonen L. (2006a) Alpha/Beta Liquid Scintillation Spectrometry in Surveying Finnish Groundwater Samples, Radiochemistry, 48(6): 606–612.
- Skopljak, F. (2008). Primjeri geološke i geomorfološke baštine u turističkoj ponudi Bosne i Hercegovine. Sarajevo, oktobar 2008. godine.
- Somlai K, Tokonami S, Ishikawa T, Vancsura P, Gaspar M, Jobbagy V, Somlai J, Kovacs T, ^{222}Rn concentrations of water in the Balaton Highland and in the southern part of Hungary and the assessment of the resulting dose, Radiat. Meas.42: 491–495 (2007).
- Spaite, P. W. & Smithson, G. R. J. (1992). Technical and regulatory issues associated with Naturally Occurring Radioactive Materials (NORM) in the gas and oil Industry. Chicago, USA: Gas Research Institute.
- Szabo, Z., dePaul, V. T., Fischer, J. M., Kraemer, T. F. & Jacobsen, E. (2012). Occurrence and geochemistry of radium in water from principal drinking-water aquifer systems of the United States. Applied Geochemistry, 27:729–752. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2011.11.002>.
- Taboada, T., Cortizas, A.M., García, C. & García-Rodeja, E. (2006). Uranium and thorium in weathering and pedogenetic transects developed on granitic rocks from NW Spain. Science of the Total Environment, 356: 192–206.
- Tanasković, I. R. (2014). Radioaktivnost podzemnih voda u tipičnim vodonosnim sredinama Srbije: Doktorska disertacija. Univerzitet u Beogradu, Fakultet za Fizičku hemiju.
- UNSCEAR, Sources and Effects of Ionizing Radiation, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, United Nations, New York (1982).

- UNSCEAR. (2000). UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly with Scientific Annexes: Sources and Effects of Ionizing Radiation, United Nations, New York, USA, ISBN: 92-1-142238-8.
- W. Fan, B. Liberati, M. Novak, M. Cooper, N. Kruse, D. Young, and J. Trembly: Radium-226 Removal from Simulated Produced Water Using Natural Zeolite and Ion-Exchange Resin, *Ind. Eng. Chem. Res.*, Vol. 55, 2016, 12502–12505.
- Wanty, R. B. & Nordstrom, D. K. (1993). Natural radionuclides. In: Alley, W. M. (ed.) *Regional Ground-Water Quality*. Van Nostrand Reinhold. New York, US.
- Wanty, R.B., Lawrence, E. P. & Gundersen, L.C.S. (1992). A theoretical model for the flux of radon from rock to ground water. In: Gates, A. E. & Gundersen, L.C.S. (eds.) *Geologic Controls on Radon*. The Geological Society of America.
- WHO (2017). *Guidelines for drinking-water quality: fourth edition incorporating the first addendum*, Geneva: World Health Organization; Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.
- WHO (2018). *Management of radioactivity in drinking water*, Geneva: World Health Organization. Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.
- (WHO), World Health Organization. (2008), *Guideline for Drinking-Water Quality, Third Edition, Vol. 1*, Geneva.

Kratka biografija autora



Aleksandar Vuković rođen je 24.10.1994. u Sokocu. Osnovnu i srednju školu završio je u Rogatici kao odličan učenik. 2013. godine upisuje osnovne studije na Prirodno matematičkom fakultetu u Novom Sadu na Departmanu za fiziku, smer diplomirani profesor fizike. Tokom čitavog studiranja bio je stipendista Opštine Rogatica. Takođe, dobitnik je nagrada Univerziteta u Novom Sadu za postignut uspeh u prvoj i drugoj godini studija. Studije završava prosekom 9.26. Nakon osnovnih studija započinje rad u Gimnaziji "27 januar" u Rogatici, na radnom mestu profesor fizike. 2022. godine upisuje master studije na Prirodno matematičkom fakultetu u Novom Sadu na Departmanu za fiziku, smer Nuklearna fizika i od septembra 2022. godine zaposlen je na Fakultetu tehničkih nauka kao saradnik u nastavi. Učesnik je naučnih konferencija i seminara kao i koautor nekoliko naučno-istraživačkih radova.

UNIVERZITET U NOVOM SADU PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

Redni broj:

RBR

Identifikacioni broj:

IBR

Tip dokumentacije: Monografska dokumentacija

TD

Tip zapisa: Tekstualni štampani materijal

TZ

Vrsta rada: Master rad

VR

Autor: Aleksandar Vuković

AU

Mentor: doc. dr Sofija Forkapić

MN

Naslov rada: Razvoj i primena brze metode pripreme uzoraka za detekciju radijuma u mineralnim vodama gama-spektrometrijskom metodom

NR

Jezik publikacije: Srpski (latinica)

JP

Jezik izvoda: Srpski/Engleski

JI

Zemlja publikovanja: Republika Srbija

ZP

Uže geografsko područje: AP Vojvodina

UGP

Godina: 2023.

GO

Izdavač: Autorski reprint

IZ

Mesto i adresa: Prirodno-matematički fakultet, Trg Dositeja Obradovića 4,

MA

Novi Sad

Fizički opis rada: 6 poglavlja/65 strana/33 slike, grafikona/7 tabela/ 70 referenci

FO

Naučna oblast: Fizika

NO

Naučna disciplina: Nuklearna fizika

ND

Predmetna odrednica/
ključne reči: Radium, radon, radioaktivna ravnoteža, geologija, jonoizmenjivačke smole, gamma spectrometrija, HPGe poluprovodnički detektor, MDA, korelacije, efektivna doza

PO

UDK

Čuva se: Biblioteka Departmana za fiziku, PMF-a u Novom Sadu

ČU

Važna napomena: nema

VN

Izvod:

IZ

U ovom master radu razvijena je brza i precizna metoda za pripremu uzoraka i merenja koncentracije radijuma u vodi. Zbog visoke radiotoksičnosti radijuma, sklon je akumulaciji u kostima, te je važno imati pouzdanu metodu za merenje niskih koncentracija radijuma u pijaćim vodama. Metoda koja je primenjena u radu uključuje upotrebu komercijalne jonoizmenjivačke smole za gama spektrometrijsku analizu radijuma u vodi. Ova tehnika omogućava detekciju radijuma bez potrebe za složenom i dugotrajnom radiohemijском pripremom uzoraka, što je presudno za brze rezultate. Rezultati ovih istraživanja sugerišu da razvijena metoda može obezbediti niske granice detekcije radijuma u uzorcima, čime se omogućava brza i precizna analiza ^{226}Ra .

Datum prihvatanja teme od 04.09.2023

NN veća:

DP

Datum odbrane: 25.09.2023.

DO

Članovi komisije:

KO

Predsednik:

dr Milan Pantić, redovni profesor na Departmanu za Fiziku Prirodno-matematičkog fakulteta Univerziteta u Novom Sadu.

Član/mentor

dr Sofija Forkapić, docent na Departmanu za fiziku Prirodno-matematičkog fakulteta Univerziteta u Novom Sadu.

Član:

dr Robert Lakatoš, docent na Departmanu za opšte discipline u tehnici Fakulteta tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu.

Član: dr Jovana Knežević Radić, naučni saradnik, PMF Univerzitet u Novom Sadu.

UNIVERSITY OF NOVI SAD FACULTY OF SCIENCE AND MATHEMATIC

KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number:

ANO

Identification number:

INO

Document type: Monograph publication

DT

Type of record: Textual printed material

TR

Content code: Final paper

CC

Autor: Aleksandar Vuković

AU

Mentor/comentor: Sofija Forkapić, Ph.D, docent

MN

Title: Development and application of a rapid sample preparation method for the detection of radium in mineral waters by the gamma-spectrometry

TI

Language of text: Serbian (Latin)

LT

Language of abstract: Serbian/English

LA

Country of publication: Serbia

CP

Locality of publication: Vojvodina

LP

Publication year: 2023

PY

Publisher: Author's reprint

PU

Publication place: Faculty of Science, Trg Dositeja Obradovića 4, Novi Sad

PP

Physical description:	6 chapters/65 pages/33 images, graphs/7 tables/70 references
PD	
Scientific field:	Physics
SF	
Scientific discipline:	Nuclear physics
SD	
Subject/ Key words:	Radium, radon, radioactive equilibrium, geology, ion-exchange resins, gamma spectrometry, HPGe semiconductor detector, MDA, correlations, effective dose
SKW	
UDK	
Holding data:	Library of Department of Physics, Trg Dositeja Obradovića 4, Novi Sad
HD	
Note:	none
N	
Abstract:	In this master's thesis, a fast and precise method for preparing samples and measuring the concentration of radium in water was developed. Due to the high radiotoxicity of radium, it tends to accumulate in bones, so it is important to have a reliable method for measuring low concentrations of radium in drinking water. The method used in the paper involves the use of a commercial ion exchange resin for gamma spectrometric analysis of radium in water. This technique enables the detection of radium without the need for complex and time-consuming radiochemical preparation of samples, which is crucial for quick results. The results of these researches suggest that the developed method can provide low detection limits of radium in samples, which enables fast and precise analysis of ^{226}Ra .
AB	
Accepted by the Scientific Board:	04.09.2023
ASB	
Defended on:	25.09.2023.
DE	
Thesis defend board:	
DB	
President:	PhD Milan Pantić, full professor at the Department of Physics, Faculty of Science, University of Novi Sad.
Member	PhD Sofija Forkapić, assistant professor at the Department of Physics, Faculty of Science, University of Novi Sad.
Member	PhD Robert Lakatoš, assistant professor at the Department of Fundamentals Sciences Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad.

Member

PhD Jovana Knežević Radić, research associate at the
Department of Physics, Faculty of Science, University of
Novi Sad.