

Usporedba metoda mjerenja koncentracija aktivnosti radona u vodi

Pavlačić, Ana

Master's thesis / Diplomski rad

2018

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Department of Physics / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Odjel za fiziku**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:160:729256>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-19**



Repository / Repozitorij:

[Repository of Department of Physics in Osijek](#)



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJ

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
ODJEL ZA FIZIKU

ANA PAVLAČIĆ

USPOREDBA METODA MJERENJA KONCENTRACIJA
AKTIVNOSTI RADONA U VODI

Diplomski rad

Osijek, 2018.

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
ODJEL ZA FIZIKU

ANA PAVLAČIĆ

USPOREDBA METODA MJERENJA KONCENTRACIJA
AKTIVNOSTI RADONA U VODI

Diplomski rad

Predložen Odjelu za fiziku Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku
radi stjecanja akademskog naziva MAGISTRA EDUKACIJE FIZIKE I INFORMATIKE

Osijek, 2018.

Ovaj završni rad je izrađen u Osijeku pod vodstvom doc. dr. sc. Marine Poje Sovilj i doc. dr. sc. Jovane Nikolov sa Departmana za fiziku Prirodno-matematičkog fakulteta u Novom Sadu u sklopu Sveučilišnog diplomskog studija fizike na Odjelu za fiziku Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku.

Predgovor

Zahvalila bih se doc. dr. sc. Marini Poje Sovilj te doc. dr. sc. Jovani Nikolov za mentorstvo i pomoć pri izradi diplomskog rada te za pomoć pri izvedbi eksperimentalnog dijela rada.

Sadržaj

1. Uvod	1
2. Radioaktivni raspad	2
2.1. Vrste radioaktivnog raspada.....	3
2.1.1. α raspad	3
2.1.2. β raspad	5
2.1.3. γ raspad	7
2.2. Zakon radioaktivnog raspada	8
2.3. Radioaktivnost na Zemlji.....	11
3. Dozimetrija	12
3.1. Dozimetrijske veličine i njihove mjerne jedinice	12
4. Radon.....	15
4.1. Fizikalne i kemijske karakteristike radona	15
4.2. Radon u vodi	17
4.3. Opasnost za zdravlje čovjeka.....	18
5. Eksperimentalni postupci – mjerenje radona u vodi	21
5.1. Uzorkovanje i metode	21
5.2. AlphaGUARD mjerni sustav	21
5.2.1. Mjerenje radona u vodi pomoću AlphaGUARD mjernog sustava	22
5.3. Mjerni uređaj Alfa spektrometar DURRIDGE RAD 7	24
5.4. Mjerni uređaj HPGe Gama spektrometar	30

5.5. Scintilacijski detektori	32
5.5.1. Tekućinski scintilacijski detektor Quantulus 1220	35
5.5.2. Tekućinski scintilacijski detektor TriCarb 2900	38
6. Rezultati i rasprava	41
7. Zaključak	51
8. Literatura	55
9. Životopis	57

USPOREDBA METODA MJERENJA KONCENTRACIJA AKTIVNOSTI RADONA U VODI

ANA PAVLAČIĆ

Sažetak

U teorijskom dijelu diplomskog rada opisane su vrste radioaktivnog raspada, zakon radioaktivnog raspada te radioaktivni raspadni nizovi. U radu je iskazana važnost te utjecaj ionizirajućeg zračenja na čovjeka te u skladu s time su navedene i osnovne dozimetrijske veličine. Prikazane su fizikalne i kemijske karakteristike radona i njegovih kratkoživićih potomaka te načini prijenosa radona iz tla u vodu i zrak. Izneseni su zaključci istraživanja vezani za opasnosti radona za zdravlje čovjeka.

U eksperimentalnom dijelu rada su opisani uređaji i metode kojima su izvršena mjerenja koncentracije radona u vodi nakon čega su izneseni rezultati mjerenja. Na samom kraju diplomskog rada je dan zaključak vezan za metode i rezultate mjerenja te njihovu korektnost.

57 stranica, 36 slika, 8 tablica, 16 literaturnih izvoda

Rad je pohranjen u knjižnici Odjela za fiziku

Ključne riječi: alfa spektrometar / gama spektrometar / metode / radioaktivnost / radon / scintilacijski detektor / voda

Mentor: doc. dr. sc. Marina Poje Sovilj

Komentor: doc. dr. sc. Jovana Nikolov

Ocjenjivači: izv. prof. dr. sc. Vanja Radolić

doc. dr. sc. Zvonko Glumac

Rad prihvaćen: 9. svibanj 2018.

COMPARISON OF SEVERAL METHODS FOR MEASURING RADON ACTIVITY CONCENTRATION IN WATER

ANA PAVLAČIĆ

Abstract

In theoretical part of this thesis the types of radioactivity, law of radioactivity and radioactive decay chains are described. The importance and influence of ionizing radiation on humans is stated in this thesis, together with basic dosimetry quantities and appropriate units. Physical and chemical properties of radon and its short-lived progeny are described, as well as the mechanism of radon transfer through the soil in water and air. Some conclusions on the influence of radon and radon progeny on public health are presented.

In experimental part of this thesis devices and methods of radon measurements in water are described and results are presented. Conclusions about used methods, obtained results and discussion of the performances of all used methods are given at the end of this thesis.

57 pages, 36 figures, 8 tables, 16 references

Thesis deposited in Department of Physics library

Keywords: alpha spectrometer / gamma spectrometer / methods / radioactivity / radon / scintillation detector / water

Supervisor: Assistant professor Marina Poje Sovilj, PhD

Assistant professor Jovana Nikolov, PhD

Reviewers: Vanja Radolić, PhD

Zvonko Glumac, PhD

Thesis accepted: 9th May 2018

1. Uvod

Radioaktivni plin radon koji nastaje radioaktivnim alfa raspadom radija-226 (^{226}Ra) u lancu raspada uranija-238 (^{238}U), plemeniti je plin koji se nalazi u tlu, izlazi na površinu i odlazi u atmosferu. U atmosferi radon se miješa sa zrakom koji udišemo i na taj način čovjek u sebe unosi radioaktivni plin radon. Kao glavna posljedica udisanja velikih koncentracija radona u zraku je nastanak smrtonosnog karcinoma pluća. Radon je nakon aktivnog pušenja drugi po redu uzročnik karcinoma pluća i kao takav je opasan za zdravlje čovjeka [James, 1988.]. Osim što u plinovitom stanju može doći u kuće gdje stanovništvo obitava, budući da je topiv u vodi, čovjek ga može unijeti u svoj organizam pijući vodu te tako radon predstavlja visoki rizik od nastanka raka želuca i gastrointestinalnog sustava. Poznavanje koncentracije radona u svakom izvoru, uključujući vodu u kućanstvu, osobito vodu na izvoru direktno iz zemlje, nužno je za zaštitu javnosti od posljedica prekomjerne izloženosti zračenju koji za posljedicu ima rak pluća, odnosno želuca.

Radon kao uzročnik karcinoma pluća je intenzivno zaokupirao javnost tridesetih godina prošlog stoljeća zbog brojnih smrti rudara koji su bili izloženi velikim dozama radona u rudnicima ispod zemlje. U drugoj polovici 20. stoljeća u Švedskoj su započeta opsežna istraživanja vezana za koncentracije radona u kućanstvima te su vršena istraživanja građevnog materijala koji se koristi za izradu kuća pri čemu je utvrđeno da je sadržavao veliku koncentraciju radija koja je utjecala na koncentraciju radona unutar kuća. Isto tako je utvrđeno da koncentracija radona u kući također ovisi i o koncentraciji radona u tlu u kojemu je kuća izgrađena [Nazaroff & Nero, 1988].

Iako je pijenjem vode koja sadrži visoku koncentraciju radona manja vjerojatnost oboljenja od karcinoma nego udisanjem radona oslobođenog iz vode [Risk Assessment of Radon in Drinking Water, 1999.], radon i njegovo zračenje u vodi je danas vrlo aktualno te postoji velika zainteresiranost za pronalaskom rješenja kako se zaštititi od radona i njegovih kratkoživućih potomaka.

Osim što se pronalazak određene koncentracije radona povezuje sa prijetnjom za ljudsko zdravlje isto tako može se upotrijebiti kao idealni plin za analizu mnogih procesa u području geologije, hidrogeologije (npr. seizmološka mjerenja, geološka analiza i dr.).

Diljem svijeta pa tako i u Hrvatskoj se koriste razne metode i vrše istraživanja vezana za radon i njegov utjecaj na zdravlje čovjeka. U ovom diplomskom radu cilj je usporediti koncentracije radona u vodi dobivene korištenjem različitih metoda mjerenja te time utvrditi točnost korištenih metoda. U radu su ispitane različite metode mjerenja radona u vodi, a posebna pažnja je posvećena

i načinu uzorkovanja jer je glavni izvor mjerne nesigurnosti upravo postupak uzorkovanja vode, testirana su dva načina uzimanja uzoraka voda i navedeni zaključci.

2. Radioaktivni raspad

Radioaktivni raspad ili radioaktivnost je pojava u prirodi gdje nestabilna jezgra atoma nekog elementa emitira energiju u obliku ionizirajućeg zračenja pri čemu dolazi do promjene u strukturi atomske jezgre.

Još davne 1838. Faraday je istraživao prolaz električne struje u plinovima u zatvorenim staklenim cijevima. Tim pokusima su započela istraživanja koja su vodila prema novim otkrićima, između ostalih i otkriću rendgenskih zraka.

1895. Wilhelm Conrad Röntgen slučajno tijekom pokusa otkriva nove vrste zraka o kojima piše u svom radu „O jednoj novoj vrsti zraka“ u kojem ističe razliku između katodnih zraka i zraka koje je nazvao X-zrake. Te zrake, koje su kasnije nazvane rendgenskim zrakama, nije uspio otkloniti magnetom pa je pretpostavio sličnost novih zraka sa zrakama svjetlosti.

1896. se povezuje postojanje novih zraka sa pojavom fluorescencije što je prvotno eksperimentom potvrdio i francuski fizičar Antoine Henri Becquerel. Ubrzo je ustanovio da neki minerali emitiraju zračenje sami po sebi, bez prethodnog izlaganja svjetlosti. Pokazao je da soli uranija, bez ikakvog djelovanja izvana ispuštaju nevidljive zrake koje prolaze kroz neprozirni papir i djeluju na fotografsku ploču. Nove zrake nazvao je „uranovim zrakama“, a ubrzo su prozване „Becquerelovim zrakama“. Osim što je Becquerel 1896. otkrio nove zrake, tj. radioaktivnost, uočio je i da te nove zrake djeluju na kožu čovjeka, te je na osnovi pokusa otkrio novu metodu za istraživanje radioaktivnosti.

Krajem 1897. u istraživanje nove pojave uključili su se i Marie Skłodowska Curie i Pierre Curie. Marie početkom 1898. objavljuje svoj prvi rad o radioaktivnosti u kojem je navela da torij i njegovi spojevi imaju isto svojstvo kao i uranij, ispuštaju „Becquerelove zrake“ te je to svojstvo nazvala radioaktivnim. Taj naziv je ubrzo bio prihvaćen i tako je 1898. nastao novi termin „radioaktivnost“. U tom radu Marie Curie je prvi put povezala radioaktivnost sa pojedinim atomima i svojstvom samih atoma. U radu „O novoj radioaktivnoj tvari sadržanoj u rudi smolinca“ bračni par Curie je opisao metodu određivanja nove tvari – otkrili su novi metal polonij čija je aktivnost bila 400 puta veća od uranijeve. Netom kasnije, iste godine, otkrili su novu iznimno aktivnu tvar (900 puta veća aktivnost od uranijeve) – radij. Ova nova otkrića kemijskih

elemenata polonij i radij bili su vrlo važan korak u istraživanju radioaktivnosti. Za svoj rad i otkrića u području radioaktivnosti Henri Becquerel i bračni par Curie dobivaju Nobelovu nagradu za fiziku 1903. godine.

Za razvoj polja radioaktivnosti također je uvelike zaslužan Ernest Rutherford koji je na osnovi pokusa zaključio da postoje dvije vrste zraka – alfa i beta, što ih razlikuje od X-zraka te kako se međusobno razlikuju. Gama zrake, koje su puno prodornije od prethodno navedenih alfa i beta zraka je otkrio Paul Villard.

Nedugo potom su Rutherford i Soddy došli do zaključka da je radioaktivnost pojava u kojoj dolazi do nastanka novih tvari, a one nastaju zbog promjena u samim atomima. Također su zajedno došli i do zakona radioaktivnog raspada.

1934. godine su F. Joliot i I. Joliot-Curie otkrili da se radioaktivni elementi mogu dobiti i na umjetni način tako da se element izloži djelovanju alfa čestice te se pri tome izaziva nuklearna pretvorba u novi element ili novi izotop. Pojava koju su otkrili dobila je naziv „umjetna radioaktivnost“ i za nju su 1935. dobili Nobelovu nagradu za kemiju.

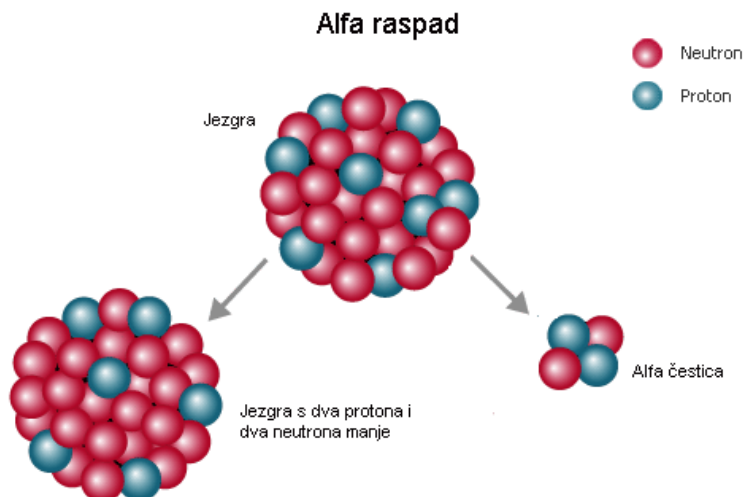
2.1. Vrste radioaktivnog raspada

Danas znamo za tri tipa radioaktivnog raspada te koja su svojstva svakog od njih. Najbitnija razlika je to da kod α i β raspada nestabilna jezgra emitira α ili β česticu kako bi postala stabilnija i pritom dolazi do transformacije iz jednog elementa u drugi. Za razliku od α i β raspada, kod γ raspada se ne odvija transformacija jezgre u novi element već jezgra koja se nalazi u pobuđenom stanju prelazi u stabilnije stanje bez promjene karakteristika jezgre uz emitiranje energije.

2.1.1. α raspad

Alfa raspad (Slika 1.) je proces u kojem dolazi do spontanog raspada teških nestabilnih jezgara pri čemu se emitira alfa čestica odnosno jezgra helija koja sadrži dva protona i dva neutrona, ${}^4_2\text{He}$. Kada teška jezgra emitira alfa česticu ona izgubi dva protona i dva neutrona i dolazi do transmutacije atomske jezgre. Pri tomu se njen protonski broj smanji za dva, a nukleonski broj se smanji za četiri. Promatramo li periodni sustav elemenata (PSE), novi element nastao alfa raspadom se u PSE pomjera za dva mjesta u lijevo.

Proces možemo zapisati:
$${}_Z^AX \rightarrow {}_{Z-2}^{A-4}X' + {}_2^4\alpha \qquad {}_2^4\alpha = {}_2^4\text{He}$$



Slika 1. α raspad

Primjer alfa emitira je radij $^{226}_{88}\text{Ra}$ koji u stabilnije stanje prelazi emisijom alfa čestica pri čemu nastaje plin radon $^{222}_{86}\text{Rn}$ koji je isto radioaktivan pa slijedi daljnji niz raspada dok se ne postigne stabilnost jezgre.

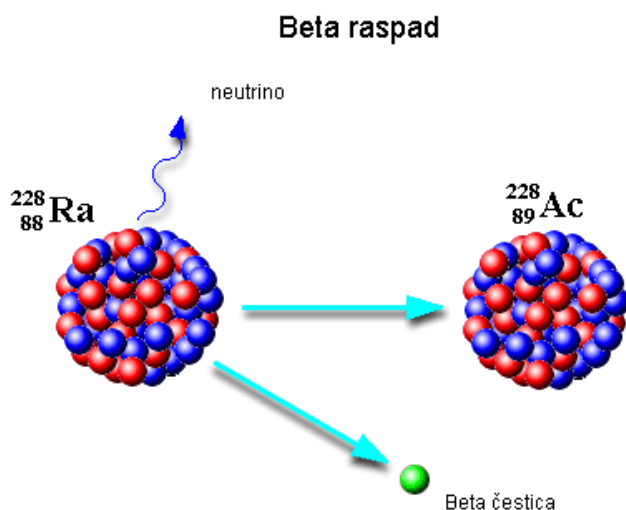
Alfa zračenje ima precizno definiranu energiju, dakle alfa čestica ima točno određenu kinetičku energiju (ovisnu o početnoj jezgri). Bez obzira na ogromnu energiju koju nosi alfa čestica (u intervalu od 4-10 MeV), zbog svoje relativno velike mase i dva pozitivna elementarna naboja, međudjelovanje sa tvari kroz koju prolazi je izrazito jako pa domet alfa čestica u zraku iznosi približno od 2-8 cm. U tkivu čovjeka domet iznosi tek oko 0.03 mm.

Radi navedenih razloga alfa zračenje nije opasno ako se nađe izvan organizma jer ga može zaustaviti par cm zraka ili koža. No, ukoliko uđe u organizam (unutarnje ozračivanje) tada je iznimno opasno. Zbog jake interakcije sa tvari kroz koju prolazi i koju ionizira (stvara veliki broj ionskih parova po jedinici puta), ogromnu energiju koju posjeduje može pohraniti u samo jednoj stanici. Zato je štetno djelovanje alfa zračenja jako izraženo te ga definiramo ekvivalentnom dozom ionizirajućeg zračenja.

2.1.2. β raspad

Kada govorimo o beta raspadu tada razlikujemo tri tipa raspada:

- β minus raspad (Slika 2.)
- β plus raspad
- elektronski uhvat



Slika 2. β^- raspad

β minus raspadu su podložne jezgre koje imaju višak neutrona. Pri β minus raspadu neutron u nestabilnoj jezgri se pretvara u proton koji ostaje u jezgri, a iz jezgre izlijeću dvije čestice, elektron (β minus čestica) i antineutrino. Pri tome se protonski broj poveća za 1, a nukleonski broj ostaje isti, dakle dolazi do transformacije atomske jezgre. Promotrimo li PSE, pri beta raspadu novonastala jezgra se pomjera za jedno mjesto u desno u PSE.

Proces možemo zapisati: $^A_ZX \rightarrow ^A_{Z+1}X' + ^0_{-1}e + ^0_0\bar{\nu}_e$ $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$

Beta minus čestica ionizira tvar kroz koju prolazi i spada u ionizirajuće zračenje.

β plus raspadu su podložne nestabilne jezgre s manjkom neutrona. Tijekom procesa beta plus raspada dolazi do transformacije protona u jezgri u neutron, pri čemu se emitira beta plus čestica (pozitron – antičestica elektrona; ista masa i naboj suprotnog predznaka) i neutrino. Pri tome se protonski broj smanji za 1, a nukleonski broj ostaje isti, dakle dolazi do transformacije atomske jezgre. Promotrimo li PSE, pri beta raspadu novonastala jezgra se pomjera za jedno mjesto u lijevo u PSE.

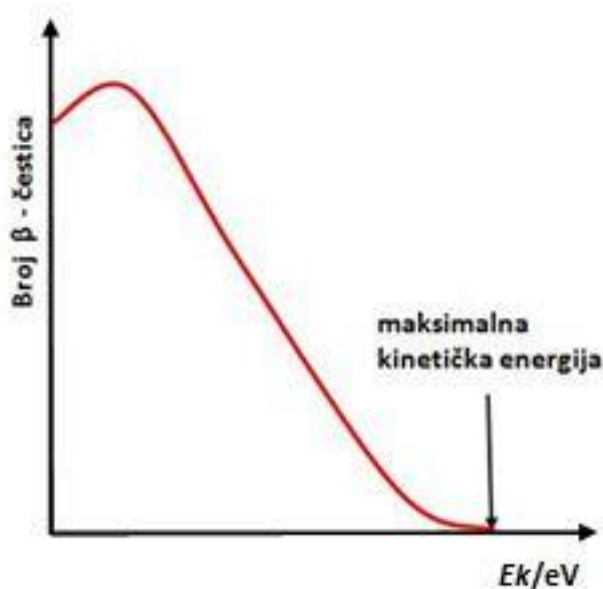
Proces možemo zapisati: ${}_Z^AX \rightarrow {}_{Z-1}^AX' + {}_{+1}^0e + {}_0^0\nu_e$ $p \rightarrow n + e^+ + \nu_e$

Uхват elektrona je raspad pri kojem jedan elektron iz omotača (K – ljuska najbliža jezgri) biva povučen od protona u jezgri. Proton pri tome prelazi u neutron uz emitiranje neutrina.

Proces možemo zapisati: ${}_Z^AX + {}_{-1}^0e \rightarrow {}_{Z-1}^AX' + {}_0^0\nu_e$ $p + e^- \rightarrow n + \nu_e$

Antineutrino i neutrino su čestice bez električnog naboja, zanemarivo male mase i s vrlo slabom interakcijom s tvari kroz koju prolaze.

Pri beta minus raspadu antineutrino dijeli energiju nastalu s emitiranom beta česticom pa je nastali beta spektar kontinuiran, dakle beta čestice mogu imati bilo koju kinetičku energiju od 0 do neke maksimalne kinetičke energije (Slika 3.).



Slika 3. Spektar beta zračenja

Doseg beta čestica u zraku ovisi o njihovoj energiji. Za otprilike 0,5 MeV beta čestice njen doseg je približno 0,7 m, dok je za beta čestice energije 3 MeV doseg otprilike 10 m. Beta čestice može zaustaviti debljina aluminijskog lima od nekoliko mm.

Zračenje beta čestica se koristi u medicinske svrhe pa se tako u brahiterapiji izvor radioaktivnog zračenja smješta unutar tumora ili neposrednoj blizini tumora. Kada se izvor beta minus čestica nalazi u pacijentu, doseg čestica iznosi nekoliko milimetara.

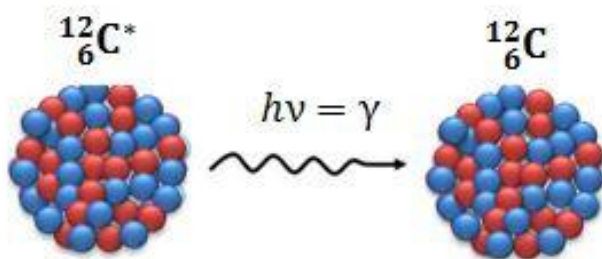
Prodornost β čestica je veća nego prodornost α čestica, no zbog puno manje mase (manje kinetičke energije) β čestice ne djeluje tako razorno kao α čestice (Slika 5.).

2.1.3. γ raspad

Beta raspad znaju novonastalu jezgru ostaviti u pobuđenom stanju, pa se prijelaz u osnovno stanje odvija uz emisiju gama zračenja. Gama raspad nije raspad u pravom smislu te riječi.

Gama zračenje je elektromagnetsko zračenje pri čijoj emisiji ne dolazi do promjene nukleonskog ni protonskog broja. Tijekom tog procesa jezgra prelazi iz pobuđenog stanja u stabilno stanje prilikom čega dolazi do emitiranja energije (Slika 4.). Iznos te energije je jednak razlici između konačnog i početnog energijskog stanja jezgre.

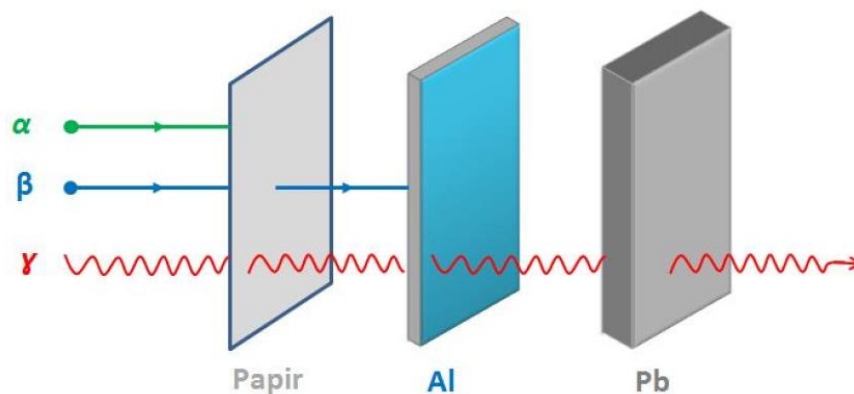
Proces zapisujemo: ${}^A_ZX^* \rightarrow {}^A_ZX + \gamma$



Slika 4. Emisija gama zračenja

Većina gama zračenja se emitira gotovo trenutno po raspadu (poluživot γ raspada iznosi reda 10^{-9} - 10^{-14} s), no mali dio raspada se odvija tako da radioaktivni potomak ostane u metastabilnom stanju (γ raspad ima znatno duži poluživot – nekoliko sati ili dana), označavamo sa malim slovom m uz maseni broj - ${}^AX^m$ ili ${}^{Am}X$.

S obzirom na veliku energiju koju gama fotoni nose sa sobom (milijun puta veću od fotona vidljivog dijela spektra), gama fotoni su vrlo prodorni i oštećuju elektronske omotače atoma i molekula na koje nalijeću te zbog toga djeluju razorno na tkiva živih bića. Gama zračenje najbolje apsorbiraju materijali velikog atomskog broja (olovo) i velike gustoće (Slika 5.).



Slika 5. Prolazak alfa, beta i gama zračenja kroz različite materijale

2.2. Zakon radioaktivnog raspada

Nestabilne jezgre se spontano raspadaju emisijom alfa ili beta čestica što uobičajeno prati gama zračenje. Proces je statističke prirode i ne može se sa sigurnošću predvidjeti kada će se pojedina nestabilna jezgra raspasti, niti se na proces može djelovati izvana. Iako je neizvjesno kada će se pojedini atom raspasti, ipak se u jedinici vremena raspadne isti postotak atoma. Dakle, može se izračunati broj jezgara koje će se raspasti nakon određenog vremenskog intervala t .

Eksperimenti pokazuju da je broj radioaktivnih jezgri koje se raspadnu u nekom vremenu proporcionalan početnom broju jezgri i različit je za svaku vrstu radionuklida, uz uvjet da ne dodajemo nove jezgre u uzorak. To zapisujemo kao:

$$-\frac{dN}{dt} = N\lambda \quad (1)$$

gdje je član s lijeve strane brzina raspada jezgri (minus nam govori da se broj jezgri smanjuje), a λ je konstanta koju nazivamo konstanta raspada i karakteristična je za svaki pojedini radioaktivni nuklid dok je N broj neraspadnutih atoma.

Izraz (1) možemo zapisati na slijedeći način:

$$dN = -\lambda N dt \quad (2)$$

Izraz (2) podijelimo sa N te potom integriramo:

$$\frac{dN}{N} = -\lambda dt \quad (3)$$

$$\int \frac{dN}{N} = -\lambda \int dt \quad (4)$$

$$\ln N = -\lambda t + C \quad (5)$$

Konstanta C se izračuna prema početnim uvjetima $t=0$ i $N=N_0$, te slijedi:

$$\ln N_0 = 0 + C \quad (6)$$

$$C = \ln N_0 \quad (7)$$

Uvrstimo li izraz (7) u izraz (5) slijedi:

$$\ln N = -\lambda t + \ln N_0 \quad (8)$$

$$\ln N - \ln N_0 = -\lambda t \quad (9)$$

$$\ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t \quad (10)$$

Antilogaritmiranjem dobivamo:

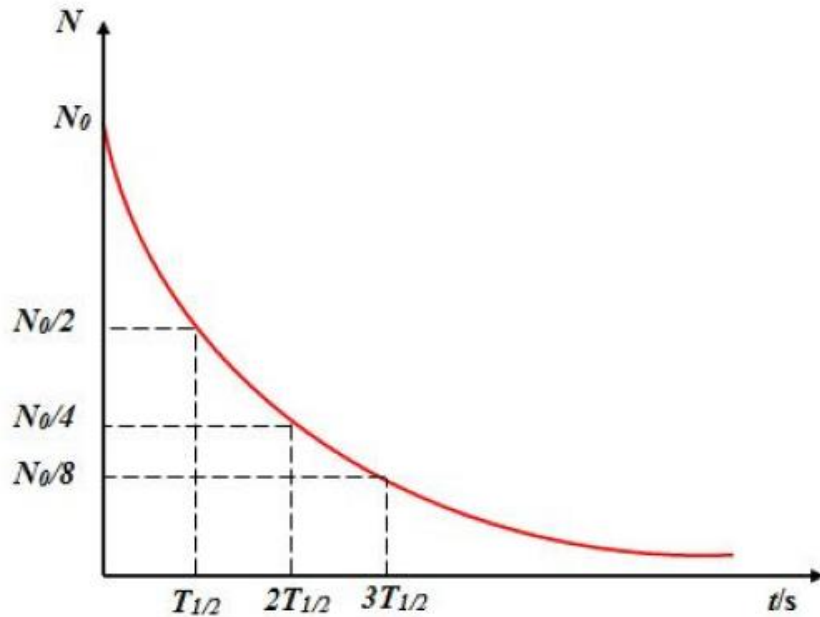
$$\frac{N}{N_0} = e^{-\lambda t} \quad (11)$$

Odnosno:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (12)$$

gdje je N_0 konstanta integracije, tj. broj jezgri za vrijeme $t=0$.

Prikažemo li grafički zakon radioaktivnog raspada, iz njega se jasno vidi broj preostalih atoma koji eksponencijalno opada (Slika 6.).



Slika 6. Graf funkcije radioaktivnog raspada

Korisno je definirati vrijeme poluraspada $T_{\frac{1}{2}}$ kao vrijeme u kojem se broj radioaktivnih atoma smanji na polovicu svoje početne vrijednosti N_0 :

$$N = \frac{N_0}{2} \quad (13)$$

Ukoliko se izraz (13) primijeni na zakon radioaktivnog raspada, dobiva se:

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T_{\frac{1}{2}}} \quad (14)$$

Podijeli li se izraz (14) s N_0 i logaritmiraj po bazi prirodnog logaritma tada slijedi:

$$\ln 1 - \ln 2 = -\lambda T_{\frac{1}{2}} \quad (15)$$

Vrijedi da je $\ln 1 = 0$ te ako se egzaktno izrazi vrijeme poluraspada iz (15) tada slijedi da je:

$$T_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda} \quad (16)$$

Izraz (16) povezuje konstantu radioaktivnog raspada i vrijeme poluraspada.

Aktivnost A definiramo kao mjeru pojave raspada u uzorku:

$$A(t) = \lambda N(t) = A_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad (17)$$

gdje je A_0 početna aktivnost u trenutku $t=0$, tj. $A_0 = \lambda N_0$.

Važno je zapamtiti da mjereći broj raspada ΔN u vremenu Δt zapravo predstavlja aktivnost uzorka samo kada je $\Delta t \ll \lambda^{-1}$. Aktivnost izražava broj raspada u nekom vremenskom intervalu, a mjerna jedinica SI sustava za aktivnost je *bekerele* (Bq) i predstavlja jedan raspad u sekundi. Osim bekerela, u praksi se koristi i *kiri* (Ci) koji je isprva definiran kao aktivnost 1 grama radija, a sada je definiran kao: $1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$.

2.3. Radioaktivnost na Zemlji

Jezgra koja se radioaktivno raspada nazivamo jezgra roditelj, a jezgre koje nastaju raspadom roditelja nazivamo jezgrama potomcima ili jezgre kćeri. Ako se potomci također radioaktivno raspadaju, tada se tvore nizovi elemenata koji se redom jedan za drugim raspadaju dok ne nastane stabilan produkt raspada.

Radioaktivnost na Zemlji opažamo u četiri glavna raspadna niza. Oni započinju s vrlo teškim elementima koji gotovo i nemaju stabilne izotope, a raspadaju se α i β raspadom. Kako α raspad smanjuje nukleonski broj jezgre za četiri, imamo četiri različita niza s nukleonskim brojevima $4n$, $4n+1$, $4n+2$ i $4n+3$.

Tablica 1. Radioaktivni raspadni nizovi

Ime niza	Vrsta	Konačna stabilna jezgra	Najduže živući član	
			Jezgra	Vrijeme poluraspada / god
Torijev	$4n$	^{208}Pb	^{232}Th	$1,41 \cdot 10^{10}$
Neptunijev	$4n+1$	^{209}Bi	^{237}Np	$2,14 \cdot 10^6$
Uranijev	$4n+2$	^{206}Pb	^{238}U	$4,47 \cdot 10^9$
Aktinijev	$4n+3$	^{207}Pb	^{235}U	$7,04 \cdot 10^8$

3. Dozimetrija

Poznavanje aktivnosti nekog izvora nije dovoljno za određivanje utjecaja zračenja na različite tvari, posebice nas zanima utjecaj određenog zračenja na ljudsko tkivo. Kako bismo to odredili definirane su veličine koje u obzir uzimaju i vrstu zračenja kojom je tkivo izloženo.

3.1. Dozimetrijske veličine i njihove mjerne jedinice

Apsorbirana doza (oznaka ***D***) je fizikalna veličina koja se definira kao omjer srednje energije $d\bar{\epsilon}$ predane ionizirajućim zračenjem u elementu volumena V i mase dm tvari u tom volumenu:

$$D = \frac{d\bar{\epsilon}}{dm} \quad (18)$$

Ona govori koliku energiju ionizirajuće zračenje prenese materijalu ili tvari na kojeg djeluje po jedinici mase. Mjerna jedinica SI sustava za apsorbiranu dozu je *gray* (Gy) i odgovara apsorpciji energije od jednog džula na jedan kilogram. Prije uvođenja SI jedinica, jedinica za apsorbiranu dozu je bila *rad* (radiation absorbed dose), a odnos između njih je:

$$1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}$$

Učinak određenog tipa zračenja (koje upada na tkivo) je opisan preko *radijacijskog težinskog faktora*, w_R . Taj faktor se zasniva na procjeni *relativne biološke učinkovitosti* (*RBE*) određenog tipa zračenja koja je omjer doze određenog zračenja i doze X – zračenja koje uzrokuje iste biološke učinke.

Težinska doza zračenja (ili **Ekvivalentna doza**), oznake ***H_T***, suma je svih srednjih apsorbiranih doza koje potječu od zračenja R u tkivu T pomnožena s težinskim faktorom zračenja w_R

$$H_T = \sum_R w_R \cdot D_{T,R} \quad (19)$$

Ukoliko je apsorbirana doza izražena u Gy, mjerna jedinica za ekvivalentnu dozu je J/kg, a naziva se *sievert* (Sv). Starija jedinica je *rem* (roentgen equivalent man) ako je D izražen u radima. Težinski faktor w_R računa se iz energije koju određena vrsta zračenja prenese po jedinici dužine.

Tablica 2. Težinski faktori zračenja, w_R , prema ICRP 1991.

Vrste i energije zračenja	Težinski faktori zračenja, w_R
Fotoni, svih energija	1
Elektroni i muoni, svih energija	1
Protoni	5
α čestice, fisijski produkti, teže jezgre	20
Neutroni, energije < 10 keV	5
Neutroni, energije 10 – 100 keV	10
Neutroni, energije 100 keV – 2 MeV	20
Neutroni, energije 2 MeV – 20 MeV	10
Neutroni, energije > 20 MeV	5

Težinska doza zračenja ne uzima u obzir na koje tkivo utječe zračenje. Različita tkiva različito reagiraju na zračenje te stoga uvodimo *težinski faktor tkiva*, w_T , koji ovisi o tzv. radiosenzitivnosti tkiva. Pomoću težinskih faktora definiramo novu dozimetrijsku veličinu – efektivnu dozu.

Efektivna doza (oznaka E) je suma težinskih doza zračenja H_T u svim tkivima T pomnožena s težinskim faktorima tkiva w_T :

$$E = \sum_T w_T \cdot H_T = \sum_T w_T \sum_R w_R \cdot D_{T,R} \quad (20)$$

Mjerna jedinica SI sustava za efektivnu dozu je *sievert* (Sv).

U tablici 3. dane su vrijednosti težinskih faktora za pojedine organe i tkiva ljudskog tijela iz čega je vidljiva kako se rastom spoznaja o biološkim efektima zračenja mijenjala i vrijednost težinskih faktora za pojedine organe odnosno tkiva.

Tablica 3. Težinski faktori tkiva w_T , prema publikacijama ICRP 1977., 1991., 2006.

Tkivo ili organ	Težinski faktori tkiva w_T		
	ICRP, 1977.	ICRP, 1991.	ICRP, 2006.
Gonade	0,25	0,20	0,08
Koštana srž (crvena)	0,12	0,12	0,12
Debelo crijevo		0,12	0,12
Pluća	0,12	0,12	0,12
Želudac		0,12	0,12
Mjehur		0,05	0,05
Grudi	0,15	0,05	0,08
Jetra		0,05	0,05
Jednjak		0,05	0,05
Štitna žlijezda	0,03	0,05	0,05
Koža		0,01	0,01
Površina kosti	0,03	0,01	0,01
Ostatak	0,30	0,05	0,12
UKUPNO:	1,00	1,00	1,00

Tijekom cijelog života, čovjek je izložen prirodnoj radioaktivnosti. Prosječna efektivna doza po stanovniku Zemlje je 2,4 mSv godišnje, no raspon vrijednosti individualnih doza je velik. Tako se za oko 65% populacije očekuje raspon vrijednosti od 1 do 3 mSv, oko 25% populacije primit će dozu manju od 1 mSv, a samo oko 10% populacije primit će dozu preko 3 mSv [UNSCEAR 2000].

4. Radon

Radon je otkrio 1900. godine njemački fizičar Friedrich Ernst Dorn. To je bio peti otkriveni radioaktivni element, nakon uranija, polonija, radija i torija. Ime je dobio po radiju jer nastaje pri njegovom α raspadu, iako je prvotno nazvan *niton* po latinskoj riječi *nitens* što znači sjajan.

4.1. Fizikalne i kemijske karakteristike radona

Radon je kemijski element atomskog broja 86 i simbola Rn. Radioaktivan je, jako radiotoksičan i kancerogen ako se udiše ili unese u tijelo ingestijom. Pri normalnim uvjetima radon je bez boje, okusa i mirisa, oko 8 puta gušći od zraka pri sobnoj temperaturi. Ovaj plemeniti plin je najteži poznati plin. Vrelište mu se nalazi na -71°C , a talište na -62°C . U čvrstom stanju intenzivno fosforescira žutom svjetlošću koja daljnjim hlađenjem prelazi u narančasto-crvenu. Zbog stabilne elektronske konfiguracije vrlo je inertan, ali pri određenim uvjetima može stvarati spojeve s fluorom.

Postoji preko trideset različitih izotopa radona. U prirodi postoje tri izotopa radona i svi su radioaktivni i nastaju kao proizvodi raspadnih nizova uranija, aktinija i torija. Zbog svog najduljeg vremena poluraspada je i najznačajniji izotop ^{222}Rn koji nastaje α raspadom izotopa ^{226}Ra i pripada uranijevom raspadnom nizu. Kada se govori o radonu uvijek se misli na upravo taj izotop, ^{222}Rn . Vrijeme poluraspada ^{222}Rn iznosi $T_{\frac{1}{2}} = 3,835$ dana, a prosječno vrijeme života mu je $\tau = 5,51$ dan. Ovaj izotop ima četiri kratkoživuća potomka: ^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi , ^{214}Po od kojih se oba polonija raspadaju alfa raspadom, a bizmut i olovo beta i gama raspadom.

Drugi značajan izotop radona je ^{220}Rn (toron) s vremenom poluraspada od $T_{\frac{1}{2}} = 55,6$ s i prosječnim vremenom života od $\tau = 80,2$ s. Ovaj izotop nastaje u raspadnom nizu torija po kojemu i nosi ime. ^{220}Rn , kao i ^{222}Rn također ima četiri kratkoživuća potomka: ^{216}Po , ^{212}Pb , ^{212}Bi , ^{212}Po . Zbog relativno kratkog vremena poluraspada, toron prevaljuje puno kraće udaljenosti nego radon te je njegov utjecaj manje zanimljiv jer predstavlja iznimno lokalni doprinos ukupnoj radioaktivnosti.

Treći izotop radona je aktinon ^{219}Rn s vremenom poluraspada $T_{\frac{1}{2}} = 3,9$ s i s prosječnim vremenom života od $\tau = 5,7$ s. Ovaj izotop nastaje u raspadnom nizu aktinija po kojemu i nosi ime.

Tablica 4. Vremena poluraspada izotopa radona i njihovih potomaka, vrste raspada te pripadajuće energije raspada

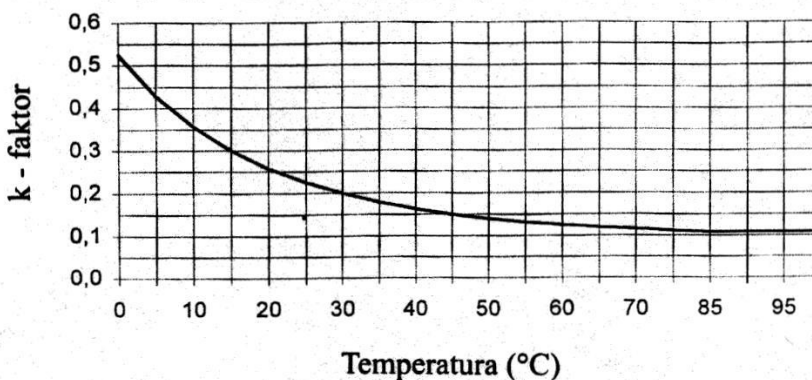
Jezgra	Vrijeme poluraspada	Vrste zračenja i energije (MeV)		
		α	β	γ
Radon				
^{222}Rn	3,825 d	5,4897		
^{218}Po	3,05 min	6,0026		
^{214}Pb	26,8 min		0,67; 0,73	0,2952; 0,3520
^{214}Bi	19,7 min		1,51; 1,54; 3,17; 3,27	0,6094; 1,1204; 1,7645
^{214}Po	163,7 μs	7,6869		
^{210}Pb	22,3 god		0,017; 0,061	
^{210}Bi	5, 013 d		1,161	
^{210}Po	138,38 d	5,3044		
Toron				
^{220}Rn	55,6	6,2883		
^{216}Po	150 ms	6,7785		
^{212}Pb	10,64 h		0,331; 0,569	0,2386; 0,3001
^{212}Bi	60,6 min	6,0510; 6,0901	2,251	0,7271
^{212}Po	0,298 μs	8,7844		
^{208}Tl	3,053 min		1,796; 1,280; 1,520	0,5106; 0,5831; 2,6146
Aktinon				
^{219}Rn	3,96 s	6,4250; 6,5531; 6,8193		0,2711; 0,4017
^{215}Po	1,78 ms	7,3136		
^{211}Pb	36,1 min		1,38	0,4049; 0,4270; 0,8319
^{211}Bi	2,14 min	6,279; 6,623		
^{207}Tl	4,77 min		1,43	0,8972

4.2. Radon u vodi

Većina radona koji ulazi u zgrade ili kuće dolazi iz tla ispod samog objekta. Budući da se radon nalazi u podzemnim vodama, može ući u stambeni objekt kad god se takva voda koristi. Uglavnom korištenjem vode prilikom tuširanja, pri pranju rublja i slično dolazi do oslobađanja radona iz vode i njegova miješanja sa zrakom u prostoriji. Na taj način radon iz vode doprinosi ukupnom riziku od udisanja radona u zatvorenim prostorima. Osim toga, voda za piće sadrži otopljeni radon te tako zračenje nastalo radioaktivnim raspadom radona i njegovih produkata također utječe na osjetljive stanice želuca kao i stanice ostalih organa do kojih dođe nakon što je apsorbiran radon u krvotok. Ukoliko prirodna, izvorska voda sadrži veće koncentracije aktivnosti radona, kada se konzumira direktno sa izvora postoji dvostruka izloženost: ingestija (od same vode koja se pije) i inhalacija (direktno udisanje para bogatih radonom nastalih isparavanjem vode, obzirom da radon u kontaktu sa zrakom vrlo brzo emanira iz vode i oslobađa se u okolni zrak).

Podzemne vode obično imaju mnogo veće koncentracije radona nego površinske vode poput jezera, potoka i rijeka.

U plinovitom stanju, radon je srednje topljiv u vodi. Pod djelovanjem Van der Waalsovih sila tvori metastabilne strukture, klatrate ($Rn \cdot 6H_2O$) u kojima je atom radona polariziran djelovanjem jakog dipolnog momenta vode. Razina otopljenosti radona ovisi o pH – vrijednosti i temperaturi vode. Više pH – vrijednosti ($pH > 7$) razaraju klatrate čime se radon vraća u plinovitu fazu. Ovisnost k – faktora, tj. omjera radona otopljenog u vodi i u plinovitoj fazi o temperaturi je prikazan na slici 7.



Slika 7. Ovisnost k – faktora radona o temperaturi

Koncentracija radona u prostoriji u kojoj je korištena voda opisana je tzv. transfer faktorom, T :

$$T = \frac{\overline{\Delta c_z}}{\bar{c}_v} \quad (21)$$

gdje je $\overline{\Delta c_z}$ prosječan prirast koncentracije radona u zraku u prostoriji uslijed korištenja vode

$\Delta c_z = c_{z,k} - c_{z,p}$, a $\bar{c}_v$ je prosječna koncentracija radona u vodi. Eksperimentalna istraživanja daju vrijednosti za transfer faktor od 10^{-4} [Committee on Risk Assessment of Exposure to Radon in Drinking Water, 1999].

4.3. Opasnost za zdravlje čovjeka

Radon se nakuplja u zatvorenim prostorijama te udisanjem zraka neizbježno udišemo radon koji se u plućima raspada i zbog velike energije oslobođene pri raspadu oštećuje stanice plućnog tkiva, odnosno ako je radon unesen tekućinom tada oštećuje unutrašnje organe.

Zbog relativno dugog vremena poluraspada, vjerojatnost da se raspadne u plućima je mala, no kod dovoljno velikih koncentracija radona doprinos izravnog raspada radona nije zanemariv. Puno veći doprinos imaju radonovi neposredni potomci u raspadnom nizu ^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi , ^{214}Po koji se nakon raspada radona unutar prostorije vežu za sitne čestice zraka (aerosole) te zatim udisanjem dospijevaju u pluća gdje se talože i radioaktivno raspadaju. Količina zračenja koju primimo od radona i njegovih potomaka ovisi i o veličini te koncentraciji aerosola u prostorima u kojima boravimo. Srednji dijelovi bronhijalnih grana su deset puta osjetljiviji od ostalih dijelova dišnog sustava, pa zbog radioaktivnog zračenja dolazi do anomalija u staničnim procesima i povećanja rizika od karcinoma.

Ako se radon ne stigne osloboditi u zrak prilikom konzumacije vode, onda ide izravno u želudac iz kojega se apsorbira u krvotok i dalje širi kroz tijelo. Tako se radon i njegovi potomci radioaktivno raspadaju u ostalim organima i oštećuju ili uništavaju stanice tkiva.

Godišnja primljena efektivna doza uslijed ingestije radona u vodi računa se pomoću konverzijskog faktora koji iznosi $0,35 \cdot 10^{-8}$ Sv/Bq [Committee on Risk Assessment of Exposure to Radon in Drinking Water, 1999] i uz pretpostavku da dojenčad, djeca i odrasli popiju redom 100, 75 odnosno 50 l vode godišnje.

Brojna istraživanja su izvršena kako bi se odredila povezanost koncentracije radona u zatvorenim prostorima te njen utjecaj na razvoj karcinoma pluća. Diljem svijeta, 3-20% svih smrti uzrokovane karcinomom pluća su vrlo vjerojatno izazvane zbog izloženosti radonu u zatvorenim

prostorima. Ove vrijednosti su povećane u zemljama koje imaju visoke koncentracije radona [Attributable risk of lung cancer deaths due to indoor radon exposure, 2016].

Istraživanje u Norveškoj je dovelo do zaključka da je konzumiranje cigareta povezano sa povećanim rizikom od karcinoma pluća. Za muškarce koji su pušili od 15-25 cigareta na dan, rizik od karcinoma pluća je bio 25,8 puta veći nego li je to za muškarce koji nisu bili pušači. Za žene koje su pušile od 15-25 cigareta na dan, rizik od karcinoma pluća je bio 11,4 puta veći nego li je to za žene koje nisu konzumirale cigarete [Lung cancer prevalence associated with radon exposure in Norwegian homes, 2017.].

Ukupni rizik od karcinoma pluća kod ljudi nepušača do 75 godina starosti i koji nisu bili izloženi radonu, porastao je za 0,41% te je kod osoba koje konzumiraju cigarete cijeli život (15-24 cigarete na dan) porastao za 10,1%. Za osobe koje žive na području koncentracije radona u zraku od 100 Bq/m³ rizik od karcinoma pluća je porastao za 0,47% za nepušače te 11,63% za pušače. Za osobe koje žive na području koncentracije radona u zraku od 800 Bq/m³ rizik od karcinoma pluća je porastao za 0,93% za nepušače te 21,6% za pušače [Lung cancer prevalence associated with radon exposure in Norwegian homes, 2017.].

Postotak koji povezuje smrt od karcinoma pluća sa izlaganjem radonu u zatvorenim prostorima iznosi između 3,3% (Velika Britanija) i 20% (Švedska). U Velikoj Britaniji je srednja vrijednost koncentracije radona u zatvorenim prostorima iznosila 21 Bq/m³, dok je u Švedskoj ona iznosila 110 Bq/m³ što povezuje veće koncentracije radona sa većim rizikom od nastanka karcinoma pluća. Zbog velike smrtnosti od karcinoma pluća koja se povezuje sa radonom, od 150 (Nizozemska) do 40 477 umrlih (Sjeverna Koreja), ovi rezultati su razlog za kontinuiranim istraživanjima koncentracije radona i utjecaja radona u zatvorenim prostorima na čovjeka te razvijanje metoda za sprečavanje povećanja koncentracija radona u zraku u zatvorenim prostorima [Attributable risk of lung cancer deaths due to indoor radon exposure, 2016].

Gledajući općenito, na nepušače izlaganje radonu djeluje više nego što ono djeluje na pušače, no rizik od dobivanja karcinoma pluća je veći kod pušača upravo zbog veće zastupljenosti karcinoma pluća kod pušača. Postotak rizika od smrti uzrokovane karcinomom pluća samo zbog izloženosti koncentracijama radona u zatvorenim prostorijama veći je kod nepušača nego kod pušača. Tako u Sjedinjenim Američkim Državama postotak smrtnosti od karcinoma pluća koji potječe od izlaganja koncentracijama radona u zatvorenim prostorima za oba spola iznosi od 19,1

do 26,4% među nepušačima te od 9,1 do 12.9 % među pušačima. Slični su rezultati istraživanja u Kanadi i Francuskoj. [Attributable risk of lung cancer deaths due to indoor radon exposure, 2016].

5. Eksperimentalni postupci – mjerenje radona u vodi

5.1. Uzorkovanje i metode

Sam proces uzorkovanja vode je glavni izvor nastanka pogrešaka u rezultatima mjerenja. Kako bi greške bile što manje potrebno je uzorkovati vodu tako da je voda u što manjem kontaktu sa zrakom. U nastavku će biti navedene metode i načini uzorkovanja vode za pojedinu metodu.

Pri mjerenju koncentracije radona u vodi u okviru ovog diplomskog rada korišteno je 5 metoda:

- 1) AlphaGUARD mjerni sustav
- 2) Alfa spektrometar DURRIDGE RAD 7
- 3) HPGe Gama spektrometar
- 4) Tekućinski scintilacijski detektor Quantulus 1220
- 5) Tekućinski scintilacijski detektor TriCarb 2900

5.2. AlphaGUARD mjerni sustav

AlphaGUARD (Genitron Instruments GmbH, Njemačka) (Slika 8.) je cjelovit sustav za kontinuirano mjerenje koncentracije radona i njegovih kratkoživućih potomaka u zraku, koncentracije radona u tlu i vodi kao i mjerenje određenih meteoroloških parametara (temperature zraka, barometarskog tlaka, relativne vlažnosti zraka). Uređaj je opremljen i tzv. relokacijskim detektorom koji registrira promjene položaja mjernog uređaja tijekom mjerenja.

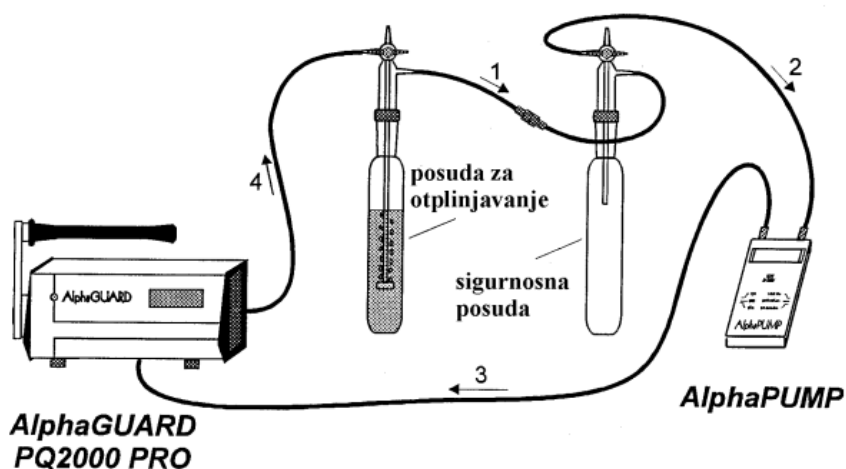
Središnji dio ovog modularnog sustava je uređaj AlphaGUARD PQ 2000 PRO kojemu je detektor radona pulsna ionizacijska komora aktivnog volumena $0,56 \text{ dm}^3$. Uređaj može raditi na dva operativna načina: difuzijski i pumpni. U difuzijskom načinu radon sam difuzijom ulazi u ionizacijsku komoru kroz filter od fiberglasa koji sprječava ulazak radonovim potomcima, odnosno aerosolima, dok se za pumpni režim rada upotrebljava uređaj AlphaPUMP (Slika 8.). Njome se može podesiti brzina strujanja zraka u detekcijsku komoru na neku od 6 vrijednosti: 0,03, 0,05, 0,1, 0,3, 0,5 i 1 l/min.

Kućiste detekcijske komore nalazi se na pozitivnom potencijalu od 750 V što čini anodu, a unutar komore se nalazi katoda koja je izolatorom pričvršćena na kućište. Radioaktivnim raspadom radona u komori nastaju α čestice koje ioniziraju zrak unutar komore. Katoda privlači pozitivno nabijene čestice koje na njoj uzrokuju slabu struju koju uređaj mjeri. Nastala struja je

proporcionalna količini raspadnutih atoma radona unutar komore. Za obradu izlaznog signala iz ionizacijske komore, mjerni uređaj AlphaGUARD koristi DSP tehnologiju (*Digital Signal Processing*). Simultanom primjenom tri različita sustava za oblikovanje impulsa dobivaju se različite informacije iz signala šuma. Uređaj AlphaGUARD omogućava promjenu intervala mjerenja od 10 do 60 minuta u difuznom modu rada i od 1 do 10 minuta u pumpnom načinu rada. Izmjereni podaci spremaju se u memoriju uređaja koja je takvog kapaciteta da u 60 minutnom intervalu mjerenja omogućuje čuvanje podataka nastalih za 4 mjeseca neprekidnog rada uređaja. Mjerno područje uređaja je od 2 Bq/m³ do 2 MBq/m³.

5.2.1. Mjerenje radona u vodi pomoću AlphaGUARD mjernog sustava

Određivanje koncentracije radona u uzorku vode temelji se na određivanju koncentracije radona u zraku. Eksperimentalni postav se osim uređaja AlphaGUARD i AlphaPUMP sastoji i od dviju staklenih posuda - posude za otplinjavanje i sigurnosne posude (AquaKIT). Shema eksperimentalnog postava je vidljiva na slici 8. Minimalni obujam vode koja se može analizirati je 100 ml, a sama procedura se izvodi na sljedeći način: Otvore se sigurnosni ventili na vrhu obje posude i plastičnom špricom se polagano usipa uzorkovana količina vode. Zatvorimo sigurnosne ventile na obje posude i postavimo AlphaGUARD u pumpni režim rada s mjernim ciklusom od 1 min. Na AlphaPUMP-u postavimo brzinu strujanja na vrijednost 0,1 l/min i uključimo u trajanju 10 minuta.



Slika 8. Mjerenje radona u vodi pomoću AlphaGUARD mjernog sustava

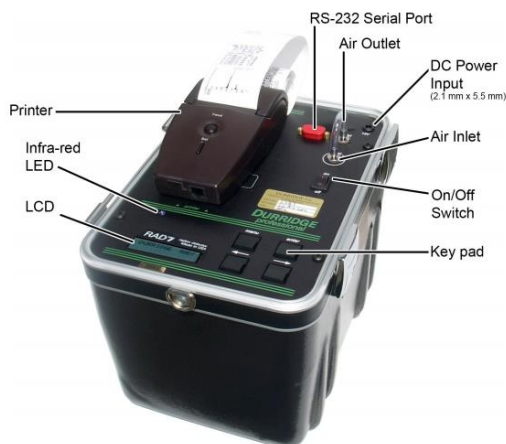
Nakon što prvi dio procedure završi, AlphaPUMPA se isključi a mjerenje s uređajem AlphaGUARD se nastavlja idućih 20 minuta. Ukupno trajanje procedure je 30 minuta. Izmjerena vrijednost nije i tražena vrijednost koncentracije radona u vodi jer je manji dio radona ostao u tekućoj fazi i nakon postupka otplinjavanja. Ova količina je opisana koeficijentom distribucije između tekuće i plinovite faze k , koji je ovisan o temperaturi, a prikazan je na slici 7. Koncentracija radona u vodi c_v (Bq/l) izračunava se iz slijedeće jednadžbe:

$$c_v = \frac{c_z \left(\frac{V_{sistem} - V_{uzorak}}{V_{uzorak}} + k \right) - c_0}{1000} \quad (22)$$

gdje je c_z (Bq/m³) izmjerena koncentracija radona u zraku, c_0 (Bq/m³) koncentracija radona u zraku prije početka mjerenja (koncentracija radona u prostoriji u kojoj se izvodi mjerenje), V_{sistem} (ml) je obujam zraka u zatvorenom sustavu, a V_{uzorak} (ml) obujam uzorka vode. Pritom se gubici radona iz zatvorenog sustava zbog difuzije kroz plastične cjevčice mogu zanemariti.

5.3. Mjerni uređaj Alfa spektrometar DURRIDGE RAD 7

RAD 7 (Slika 9.) je alfa spektrometar koji se može koristiti za mjerenje koncentracija radona u vodi, zraku i zemlji. Zahvaljujući baterijskom napajanju i svom kompaktnom dizajnu uređaj je moguće koristiti na terenu, izvan laboratorija. Upravo ta stavka daje prednost ovom uređaju za mjerenje koncentracija radona na licu mjesta (koncentracija radona u tlu, podzemnim prostorima, traženje pukotina,...).



Slika 9. Alfa spektrometar DURRIDGE RAD 7

Princip rada uređaja:

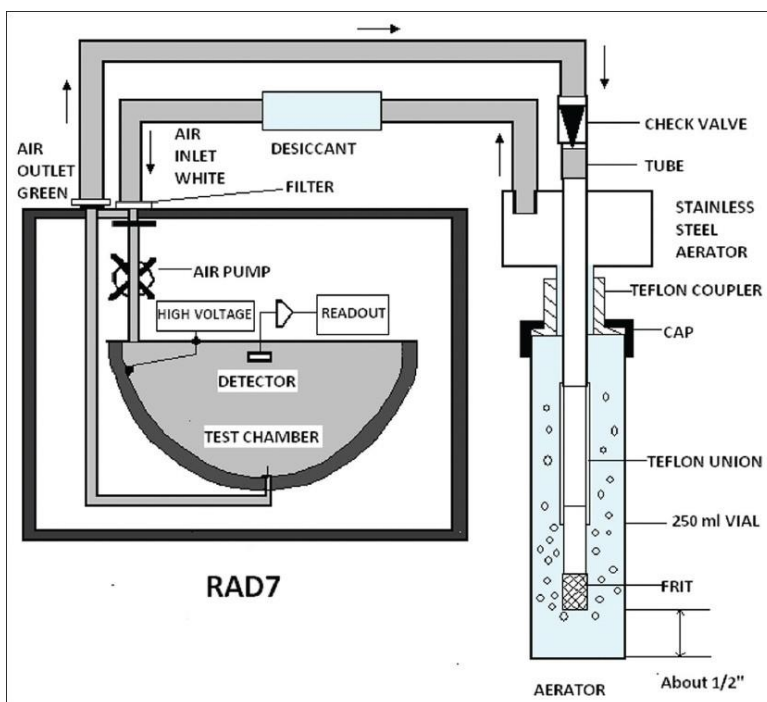
- 1) radon se ekstrahira iz uzorka vode strujanjem zraka (mjehurići zraka)
- 2) cirkuliranjem zraka radon ulazi u komoru
- 3) polonij se raspada iz radona te se sakuplja na silicijski detektor pomoću električnog polja
- 4) koncentracija radona se određuje iz koncentracije polonija

Shema ovog uređaja prikazana je na Slici 10. Središnji dio ovog sustava je polusferna komora zapremnine 0,7 litara koja je sa unutarnje strane obložena materijalom koji je dobar električni vodič. U središtu polusfere se nalazi silicijski α detektor. Visoki napon održava stalnu razliku potencijala od 2 kV do 2,5 kV, stvarajući na taj način električno polje unutar detektorske komore koje usmjerava pozitivno nabijene čestice prema površini silicijskog detektora. Automatska pumpa omogućava protok suhog zraka brzinom 1 l/min kroz komoru.

Na ulazu u komoru se nalazi filter koji sprječava ulazak radonovih potomaka u komoru i time omogućava mjerenje samo koncentracije radona u komori dok svi njegovi potomci ostaju nataloženi na filteru. Jezgre radona ^{222}Rn koje se nalaze unutar komore se raspadaju na jezgre polonija, ^{218}Po , koje su pozitivni ioni i one su električnim poljem usmjerene prema silicijskom α

detektoru na kojemu se talože. Nataloženi polonij se raspada α i β raspadom, a α čestice se detektiraju sa točno određenom energijom α čestice koja nastaje raspadom polonija ^{218}Po i ona iznosi 6,03 MeV. Svi ostali α raspad i će se detektirati sa drugom upadnom energijom, a raspad nastali β raspadom se neće detektirati. Alfa čestice nastale raspadom ^{222}Rn u zraku unutar komore se također neće detektirati jer su nastale u zraku a ne na površini detektora. Naime, na površini detektora se ne talože atomi radona jer su kemijski inertni i električki neutralni i ne mogu biti privučeni električnim poljem.

Za mjerenje koncentracije radona u vodi, osnovnom uređaju RAD 7 je potrebno dodati posebne adaptere i dodatke koji omogućavaju takvu vrstu mjerenja (mjerenje se vrši prema uputstvu proizvođača [RAD7 H₂O]). RAD – H₂O metoda koristi zatvorenu petlju kojom struji zrak pomiješan sa vodom gdje su volumen zraka i volumen vode konstantni. Zrak kontinuirano kruži kroz vodu i ekstrahira radon sve dok ne nastane ravnoteža u uzorku. Ovaj proces do nastanka ravnoteže u uzorku traje 5 minuta nakon čega više nema radona koji se može izdvojiti iz uzorka vode. Efikasnost tog postupka, odnosno postotak radona koji je izdvojen iz vode u petlju sa zrakom iznosi 99% za uzorak od 40 ml te 94% za uzorak od 250 ml. Točna vrijednost efektivnosti izdvajanja radona ovisi također i o temperaturi okoline, ali je uobičajeno da je njen iznos veći od 90%.



Slika 10. Shema unutrašnjosti uređaja RAD 7 za mjerenje radona u vodi

Neki od faktora koji utječu na točnost mjerenja radona detektorom RAD 7 su: tehnika uzimanja uzorka vode, koncentracija uzorka, veličina uzorka, vrijeme mjerenja, temperatura, relativna vlažnost te pozadinski efekti. Pokazalo se da je relativna vlažnost faktor koji najviše djeluje na konačne rezultate mjerenja i na samu pogrešku koja nastaje mjerenjem iz razloga što ona smanjuje efikasnost skupljanja atoma ^{218}Po koji nastaje kada dolazi do raspada radona u komori. Radi što preciznijih rezultata, prije početka mjerenja RAD 7 se treba temeljito isušiti, te se mora smanjiti relativna vlažnost zraka u samom uređaju tako da je vrijednost relativne vlažnosti ispod 10% za cijelo vrijeme trajanja mjerenja od 30 min. Ukoliko relativna vlažnost dosegne veću vrijednost tada ta mjerenja nisu relevantna. Najznačajniji udio u samom rezultatu donosi broj potomaka radona i tragovi radona koji su ostali od prethodnih mjerenja, posebice ukoliko je prethodno mjerenje bilo sa uzorkom vrlo aktivnog ^{222}Rn .

RAD-H₂O omogućuje mjerenje koncentracije radona u vodi manje od 0,37 Bq/l do koncentracija većih od $0,15 \cdot 10^5$ Bq/l.

Koncentracija radona u vodi, u vrijeme analize, je srednja vrijednost prikazana u ispisu rezultata. Ova vrijednost uzima u obzir kalibraciju RAD 7, veličinu bočice u kojoj se nalazi uzorak te ukupni volumen zraka u zatvorenoj petlji.

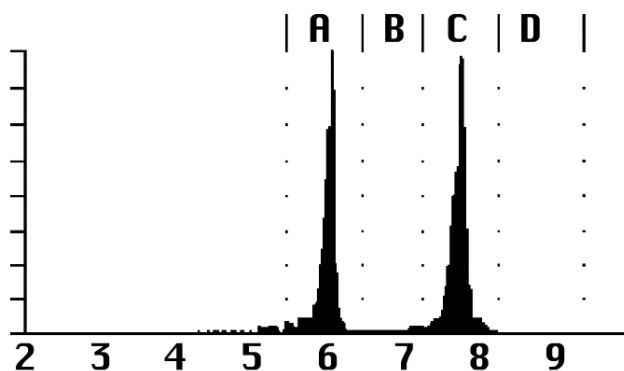
Ukoliko se uzorak analizira kasnije, dakle ne odmah nakon prikupljanja uzorka, koncentracija radona će se smanjiti radi radioaktivnog raspada stoga je potrebno ispraviti rezultat za raspad uzorka uzevši u račun razliku vremena kada je uzorak prikupljen te vremena kada je analiza započela. Također je značajno i u kojoj ambalaži će uzorak stajati do početka mjerenja.

Za određivanje koncentracije radona u vodi pomoću RAD 7 detektora (na slici 10. je prikazan postupak mjerenja radona u vodi detektorom RAD 7), uzorci su sakupljeni pomoću tehnike koje je predložio proizvođač. Koristili smo metodu direktnog sakupljanja vode sa izvora te metodu sa posudom u kojoj se posuda napuni vodom tako da voda preljeva iz posude te se bočica uroni u vodu do dna te se odmah pod vodom napuni i zatvori kako ne bi došlo do kontakta radona iz uzorka sa zrakom budući da radon u kontaktu sa zrakom odlazi iz vode. Za očekivane vrijednosti koncentracije radona uzoraka ispod 100 Bq/l koriste se bočice od 250 ml. Ukoliko se očekuju vrijednosti koncentracije radona veće od 100 Bq/l tada se koriste bočice od 40 ml.

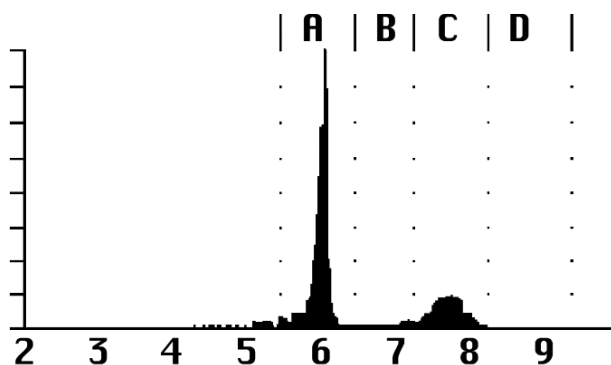


Slika 11. Mjerenje radona u vodi pomoći Alfa spektrometra DURRIDGE RAD 7

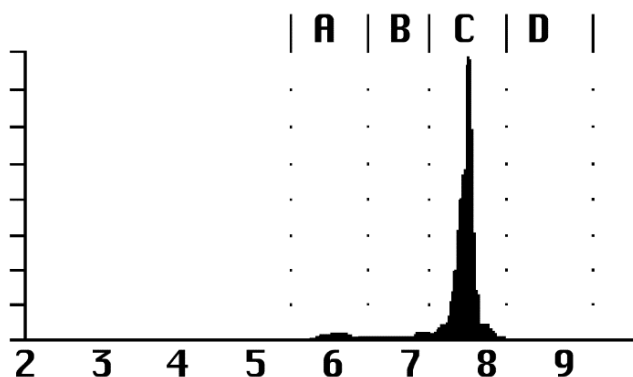
Prednost uređaja RAD 7 je i njegova mogućnost preciznog prikazivanja alfa spektra. To je omogućeno odvajanjem izmjerenih energija u osam „prozora“ od kojih svaki takav „prozor“ pokriva točno određene energijske nivoe. Grafičko prikazivanje tih spektara nam omogućava jednostavno tumačenje rezultata (Slika 12., 13., 14.).



Slika 12. Radon u ravnoteži



Slika 13. Novi radon



Slika 14. Stari radon

RAD 7 ima mogućnost spremanja podataka koji su izmjereni (do 100 mjerenja). Oni se čuvaju u internoj memoriji uređaja do kraja mjerenja, tada odlučujemo hoćemo li rezultate prebaciti na računalo ili ćemo ih isprintati na printeru koji dolazi uz uređaj. Na ispisanom izvještaju se nalaze između ostaloga slijedeće informacije: datum i vrijeme, srednja koncentracija aktivnosti radona za dani period mjerenja, standardna devijacija srednje koncentracije, najveća izmjerena vrijednost, najmanja izmjerena vrijednost, histogram srednjih koncentracija po zadanim ciklusima i kumulativni alfa spektar (slika 15).

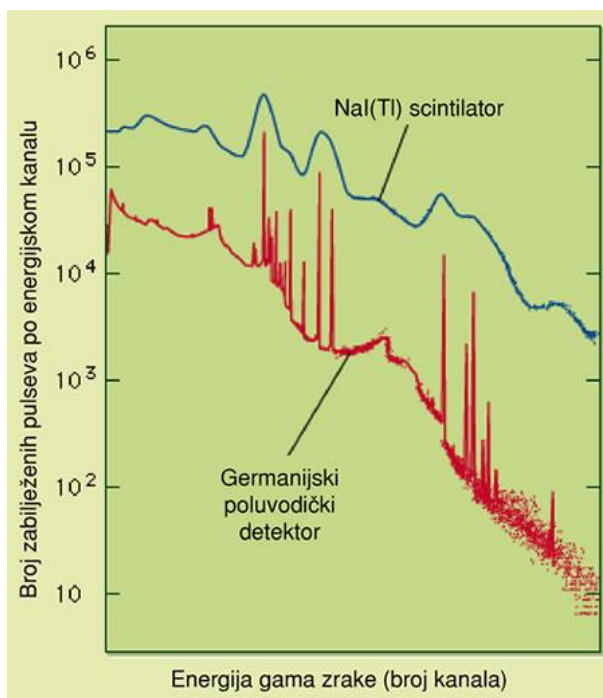


Slika 15. Izgled isprintanog izvještaja sa svim bitnim informacijama

5.4. Mjerni uređaj HPGe Gama spektrometar

Gama spektroskopija je tehnika koja proučava određeni radioaktivni uzorak pomoću analize spektra gama zraka koje radionuklidi emitiraju pri raspadu.

HPGe Gama spektrometar je poluvodički detektor koji funkcionira na slijedećem principu. Germanij, čisti (intrinzični) ili dopiran litijem – Ge(Li) formiran je u veliku PN diodu dopiranjem s atomima donora i akceptora. Između N-tipa i P-tipa germanija se formira osiromašeni sloj u kojem nema slobodnih nositelja naboja, kako elektrona tako i šupljina. Dodatno jako električno polje proširuje osiromašeni sloj te ga čisti od slobodnih nositelja naboja koji nastaju termičkim gibanjem atoma germanija. Da bi se optimiralo mjerenje i smanjio šum izazvan termičkim gibanje potrebno je tijekom mjerenja držati germanij na niskoj temperaturi od -200°C (pomoću tekućeg dušika). Apsorpcija gama zrake unutar osiromašenog područja dovodi do formiranja parova elektron-šupljina koji se priključuju N i P područjima formirajući na taj način kratki električni puls koji se potom pojačava, analizira i registrira.



Slika 16. Na slici se nalaze dva spektra koji prikazuju rezultat mjerenja germanijskim i scintilacijskim detektorom gdje se vidi znatno veća razlučivost poluvodičkog germanijskog detektora - scintilacijski detektor ne razlikuje bliske linije u spektru već ih svrstava unutar zajedničkog vrha u spektru

Mjerenja gama spektroskopijom su se radila koristeći visoko rezolucijski HPGe gama spektrometar proizvođača CANBERRA (Slika 17.) prema metodi ISO 13164-2:2013 (2013). Uzorak vode se sipa direktno u Marineli posudu (Slika 17.) i stavlja na vrh detektora za mjerenje.

Gama spektrometar ima relativnu efektivnost od 36% te energijsku rezoluciju od 1,79 keV. Kako postojanje kozmičkog mikrovalnog pozadinskog zračenja ne bi utjecalo na rezultate mjerenja te kako isto tako gama zračenje radioaktivnog izvora ne bi djelovalo na okolinu izvora, sami izvor i detektor se nalaze unutar 12 cm debelog sloja olova sa unutarnjim slojem bakra debljine 3 mm. Naime, gama zračenje kao i X zračenje najbolje prigušuju elementi visokog protonskog broja i velike gustoće, a te uvjete najbolje zadovoljava upravo olovo.

Signali prolaze kroz predpojačala i pojačala signala koji su povezani sa višekanalnim analizatorom (MCA) sa 8192 kanala koji pretvaraju analogni u digitalni signal. MCA je direktno povezan sa računalom gdje se izmjereni spektar pohranjuje i analizira. Gama spektar se analizira pomoću softvera Canberra Genie 2000 gdje program računa koncentracije aktivnosti izotopa istaknutih gama linija nakon što se oduzme vrijednost pozadinskog zračenja.



Slika 17. Mjerni uređaj HPGe Gama spektrometar (slika desno: pripadajuća Marineli posuda za tekućinu)

5.5. Scintilacijski detektori

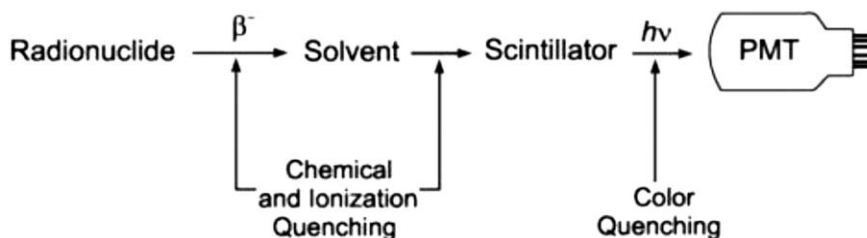
Scintilacijski detektori su detektori koji koriste pojavu scintilacija (materijal ozračen ionizirajućim zračenjem biva ioniziran i pobuđen te prilikom deekscitacije stvara fotone vidljive svjetlosti - scintilacije) za detektiranje zračenja. Takvi detektori mogu detektirati prodorne gama zrake kao i alfa te beta čestice.

Najveći problem je odabir materijala budući da je većina materijala neprozirna za vidljivu svjetlost. Scintilator mora biti proziran za valnu duljinu nastale svjetlosti tako da fotoni mogu putovati po scintilatoru, sve dok određeni dio njih ne dopiye na fotokatodu fotomultiplikatora gdje pri apsorpciji fotona dolazi do izbacivanja elektrona koji potom stižu na cijev fotomultiplikatora gdje se njihov broj višestruko povećava.

Materijali koji su prozirni za vidljivu svjetlost se dijele na organske i neorganske scintilatore. Organski scintilatori mogu biti u tekućem stanju ili u obliku plastike.

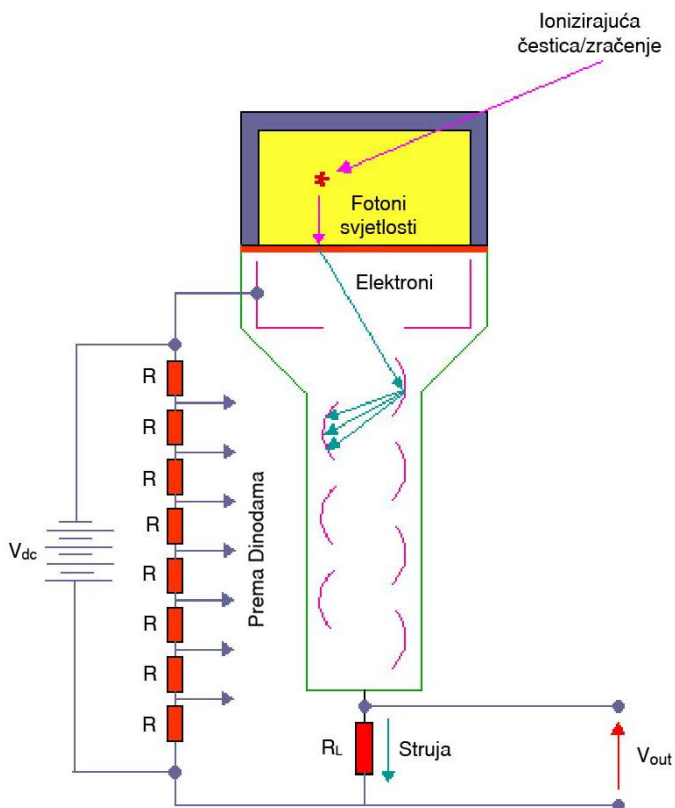
U LSC metodi za spektroskopiju alfa čestica su korišteni organski scintilacijski kokteli koji sadrže dodatak (male količine fluora) koji poboljšava detekciju zračenja.

Proces koji se odvija u scintilacijskom koktelu je slijedeći. Radioaktivni materijal se nalazi u bočici zajedno sa scintilacijskim koktelom koji se sastoji od otapala (S) i scintilatora koji emitira fluorescentnu svjetlost (F) (Slika 18.). Koncentracija otapala je veća u odnosu na molekule otapala te će ionizirajuće zračenje (npr. beta čestica) ionizirati ili pobuditi molekule otapala ($S \rightarrow S^+ + e^-$ ili $S \rightarrow S^*$). Ionizirane molekule otapala će zarobiti slobodni elektron i prelaze do neutralnih molekula ($S^+ + e^- \rightarrow S^*$) koje prenose dio energije drugim molekulama otapala ili scintilatora. Pobuđene molekule fluora se deekscitiraju pri čemu dolazi do emisije UV ili vidljive svjetlosti (plave) valnih duljina između 375 – 430 nm ($F^* \rightarrow F + h\nu$) za koje su scintilacijski koktel i površina bočice prozirni. Duljina svjetlosnog impulsa traje 5 ns.



Slika 18. Proces u scintilacijskom koktelu

Nastali fotoni padaju na fotokatodu gdje dolazi do fotoefekta te nastaju elektroni (Slika 19.) koji

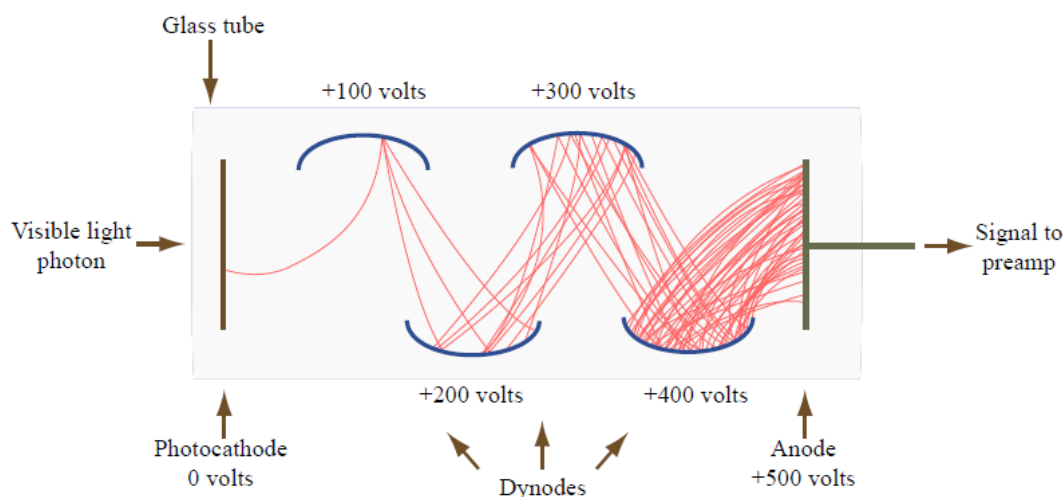


dolaze do fotomultiplikatorske cijevi koja multiplicira s velikim faktorom multiplikacije (10^7 - 10^8) početni broj elektrona. Elektroni s fotokatode udaraju u prvi red dioda te se umnožavaju (Slika 20.). Cijeli proces se nastavlja do elektronskog pojačala.

Po svakom keV uložene energije od strane beta čestice u koktelu će nastati oko 12,5 fotona.

Intenzitet svjetlosti koju emitiraju molekule scintilatora je proporcionalan energiji radioaktivnog raspada, a broj impulsa po jedinici vremena jer proporcionalan broju raspada po jedinici vremena, tj. radioaktivnosti uzorka.

Slika 19. Scintilacijski detektor s fotomultiplikatorom



Slika 20. Fotomultiplikatorska cijev – prikaz serijski vezanih dioda gdje se svaka slijedeća nalazi na višem potencijalu od prethodne

Tekući scintilatori su iznimno osjetljivi na nečistoće u otopini. Ukoliko one postoje u otopini, javlja se prigušenje tzv. quench koji smanjuje stvarnu količinu zračenja koju bi otopina emitirala što utječe na rezultate koji su manjih vrijednosti od realne. Stoga se prije svakog mjerenja radi standardni test (Standard Quenching Parametar – SQP) na prisustvo materijala koje bi mogle prouzrokovati quench. Ukoliko je SQP negativan tada je uzorak spreman za mjerenje.

5.5.1. Tekućinski scintilacijski detektor Quantulus 1220

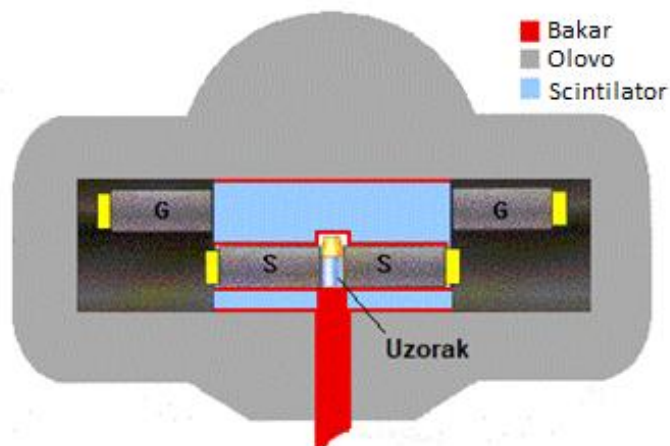
Alfa spektrometrijska mjerenja uzoraka vode su izvršena na tekućinskom scintilacijskom detektoru Quantulus 1220 (Slika 21.) prema metodi EPA Method 913.0. Quantulus ima visoku efikasnost detekcije te ostvaruje istovremenu analizu više radionuklida.



Slika 21. LSC Quantulus 1220

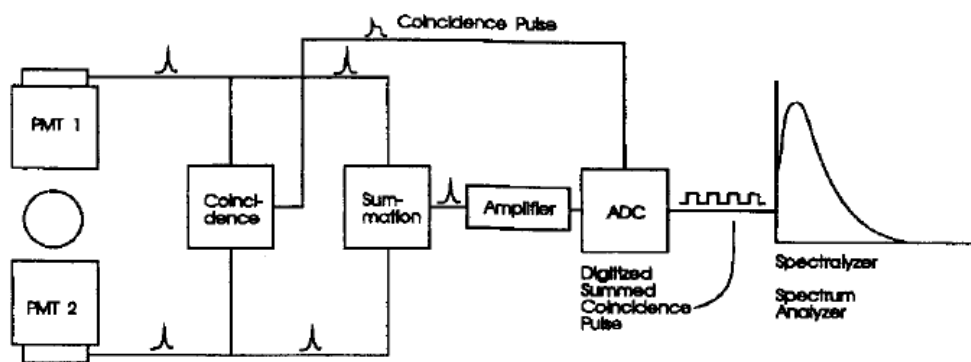
Quantulus 1220 ima vlastiti sustav koji omogućuje veliku redukciju pozadinskog zračenja oko komore sa uzorcima (Slika 22.). Takav sustav ima pasivnu i aktivnu zaštitu. Pasivna zaštita se sastoji od vanjskog olovnog štita i sloja bakra koji se nalazi kao obloga oko fotomultiplikatora i podizača bočica. Aktivnu zaštitu čini tekući scintilacijski antikoincidentni sustav koji u potpunosti okružuje dva fotomultiplikatora koji detektiraju scintilacije u uzorku. Aktivni štit ima dodatni par fotomultiplikatora koji su u antikoincidentnom sustavu sa fotomultiplikatorima koji detektiraju scintilacije u uzorku pri čemu dolazi do odbacivanja signala čiji je izvor pozadinsko zračenje.

Za konstrukciju Quantulusa su korišteni materijali koji su slabo aktivni što je pogodno za mjerenja niske alfa i beta radioaktivnosti.



Slika 22. Dva zaštitna fotomultiplikatora (G) i dva fotomultiplikatora koji detektiraju scintilacije u uzorku (S)

Signal poslan sa fotomultiplikatora je analogni signal sa visinom koja je proporcionalna energiji početnog nuklearnog raspada. Dva koincidentna signala iz fotomultiplikatora se skupljaju u jedan signal te se šalju u pojačivač i analogno-digitalni pretvarač (ADC). Digitalni signali se na kraju sortiraju u bazi na dva načina: analizom visine signala (PHA-*Pulse height analysis*) ili višekalnim analizatorom (MCA – *Multichannel Analyzer*), prikazano na slici 23.



Slika 23. Shema spektrometarskog sustava

Sustav pruža dvije vrste analize: PSA (*Pulse Shape Analysis*) te PAC (*Pulse Amplitude Comparator*). PSA detektira α i β zračenja razdvaja te ih usmjerava odvojeno u više kanalni analizator (MCA – *Multichannel Analyzer*). Quantulus ima dva višekanalna analizatora podijeljena u dva dijela, svaki po 1024 kanala, gdje se jedan koristi za aktivni štiti a drugi za snimanje spektra. Najvažniji dio za što pouzdanija i točnija mjerenja je podešavanje PSA parametra.

Prije samog mjerenja, uzorak vode je potrebno u bočici od 20 ml pomiješati sa scintilacijskim koktelom (10 ml uzorka vode + 10 ml scintilacijskog koktela). Uzorke promućkamo te ostavimo da stoje u tamnom prostoru tri sata prije mjerenja kako bi se ostvarila ravnoteža između radona i njegovih potomaka u uzorku. Ukoliko uzorak odmah pripremimo sa koktelom tada on može stajati duže vrijeme jer radon neće „pobjeći“ iz koktela, mjerenje se može napraviti kasnije uz korekciju na raspad. Naime, radon će difundirati iz uzorka u scintilacijski koktel jer ima znatno veći afinitet prema scintilacijskom koktelu za koji će se vezati. Preporučljivo je korištenje staklenih bočica jer se radon u plastičnim bočicama apsorbira na polietilenskim površinama, tj. dolazi do gubitka radona.

U mjerenjima su korištena četiri različita scintilacijska koktela: Mineral Oil Scintillator (MOS), Ultima Gold AB (UGAB), Ultima Gold F (UGF) te Opti Fluor O (OFO) . Ultima Gold AB je koktel specijalno napravljen da dobro razdvaja alfa od beta spektra te se potpuno miješa sa uzorkom vode te se kao rezultat dobiju zamućeni uzorci - monofazna metoda (Slika 24.). Mineral oil scintilacijski koktel se od strane proizvođača navodi kao najpogodniji koktel za mjerenje radona ^{222}Rn u vodi jer ima sposobnost da ekstrahira sav radon iz vode u koktel. Mineral Oil, Opti Fluor O kao i Ultima Gold F se za razliku od Ultima Gold AB ne miješaju sa vodom – dvofazna metoda (Slika 24.).



Slika 24. Dvofazna metoda - MOS (lijevo) i monofazna metoda - UGAB (desno)

5.5.2. Tekućinski scintilacijski detektor TriCarb 2900

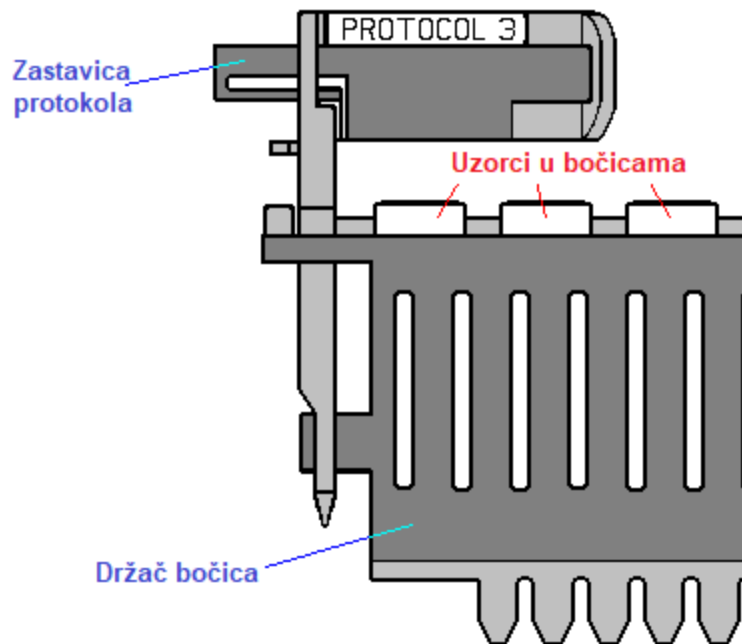
TriCarb 2900 detektor (Slika 25.) je računalno upravljani tekućinski scintilacijski detektor koji detektira alfa te beta radioaktivnost.



Slika 25. Tekućinski scintilacijski detektor TriCarb 2900

Namijenjen je za korištenje u zatvorenim prostorima, udaljen od prostora/uređaja koji zrače. Uređaj treba biti postavljen tako da sunčeva svjetlost ne dolazi do uzoraka jer može utjecati na optičke senzore unutar uređaja te na taj način dovesti do nepravilnosti pri radu uređaja.

Uređaj može držati uzorke u najviše 408 bočica od 20 ml (u jedan držač stane 15 bočica), ili 720 bočica od 4 ili 7 ml (u jedan držač stane 18 bočica) koje se postavljaju u plastične držače. Držači se obilježe zastavicom koja predstavlja protokol koji računalo prepoznaje te izvodi određene zadane operacije za pojedinačni uzorak (Slika 26.). Prije same analize zastavicu je potrebno pomaknuti sasvim lijevo od kraja držača kako bi uređaj prepoznao da se u tom držaču nalaze uzorci koji čekaju analizu. Svaki držač ima svoj jedinstveni broj koji se nalazi na kraju svakog držača bočica. Zastavica koja obilježava protokol te jedinstveni broj držača se automatski očitavaju te se u programu slažu u listu zadataka koji se trebaju provesti.

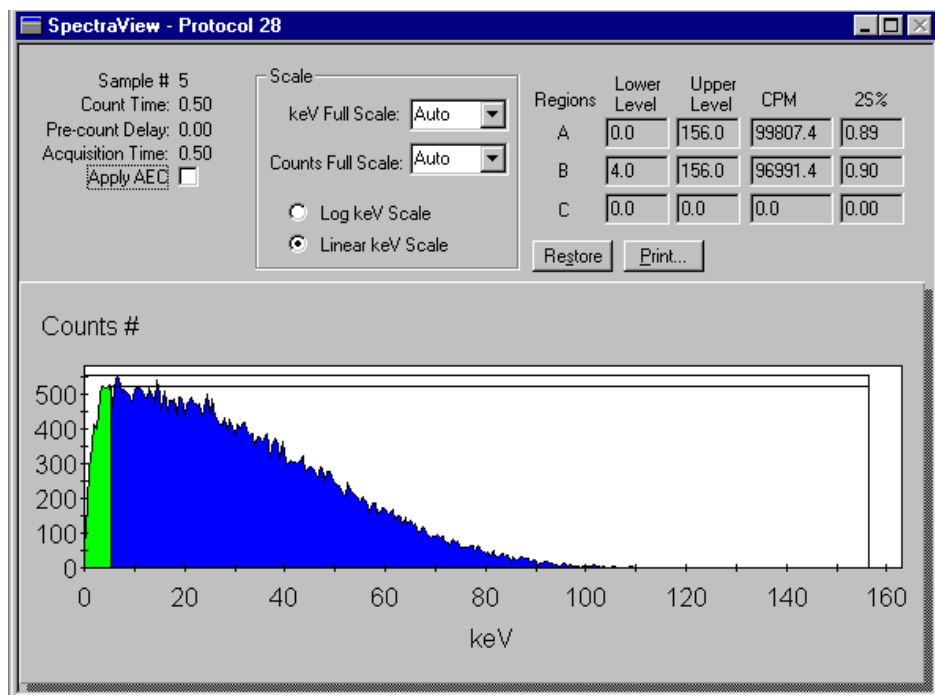


Slika 26. Držac bočica

Uzorci u držačima se automatski šalju u detektor na analizu. Držači se pokreću u smjeru obrnutom od kazaljke na satu, no ukoliko je potrebno, npr. nakon nestanka struje kada se treba ponovno pokrenuti uređaj, držači se mogu pokretati u smjeru kazaljke na satu kako bi se vratili u početni položaj i započeli novi ciklus. Nakon što je ciklus analize završen, bočice sa analiziranim uzorcima se vraćaju u držač i na njihovo mjesto dolaze novi uzorci koji se trebaju analizirati.

Detektor ovog uređaja se sastoji od dva fotomultiplikatora koji su postavljeni jedan nasuprot drugog u reflektirajućoj optičkoj komori. Detektori su postavljeni ispod uzoraka u pozadini uređaja te su okruženi sa slojem olova debljine 5 cm.

Softver QuantaSmart omogućava u spektralnom prozoru grafički 2D pregled spektra uzorka koji se analizira u stvarnom vremenu (Slika 27.). Spektar se obnavlja svakih šest sekundi te ga je moguće prikazati u linearnoj ili logaritamskoj skali te nam daje informacije o broju događaja zabilježenih u uzorku i području energije (keV) na kojoj su zabilježeni.



Slika 27. Spektralni prozor određenog protokola

Rezultati mjerenja se mogu isprintati, no isto tako i sačuvati u različitim formatima (npr. Rich Text Format).

6. Rezultati i rasprava

Prvi komplet rezultata se odnosi na mjerenja izvršena u lipnju 2017. godine u laboratoriju za nuklearnu fiziku, Prirodno-matematičkog fakulteta u Novom Sadu. Rezultati su dobiveni korištenjem nekoliko metoda: RAD 7, LSC Quantulus te HPGe Gama spektrometar.

Uzorkovanje se izvodilo dvjema tehnikama. Prva tehnika se odnosi na uzorkovanje direktno u bocu/vial sa izvora gdje se bočica postavi direktno ispod mlaza vode, pusti se da voda prelijeva i bočica se zatvara pod mlazom vode kako bi što manje mjehurića zraka bilo u uzorku. U drugoj tehnici se služimo kantom i crijevom pomoću kojeg se voda dovodi u kantu. Kada se voda počne prelijevati iz kante, bocu/vial potopimo, napunimo ju pod vodom i zatvorimo kako nebi bilo kontakta sa zrakom, odnosno da nam se ne pojavi mjehurić zraka u zatvorenoj bočici.

Budući da ne znamo točnu vrijednost aktivnosti radona u prirodnoj vodi izvora te ne možemo biti posve sigurni da je neka od metoda najtočnija, u tablicama 5. i 7. su ispod rezultata navedene i z-vrijednosti. Z-vrijednosti nam pomažu pri određivanju da li je metoda kojom je mjerenje izvršeno ispravna ili pak nije. Ukoliko je z-vrijednost unutar intervala vrijednosti ± 2 tada možemo reći da je metoda prihvatljiva.

U tablici 5. su prikazani rezultati uzorkovanja vode na izvorima vode u Novom Sadu (Spens te Limanski park).

Tablica 5. Rezultati mjerenja uzoraka vode sa dva izvora pitke vode u Novom Sadu (obje tehnike)

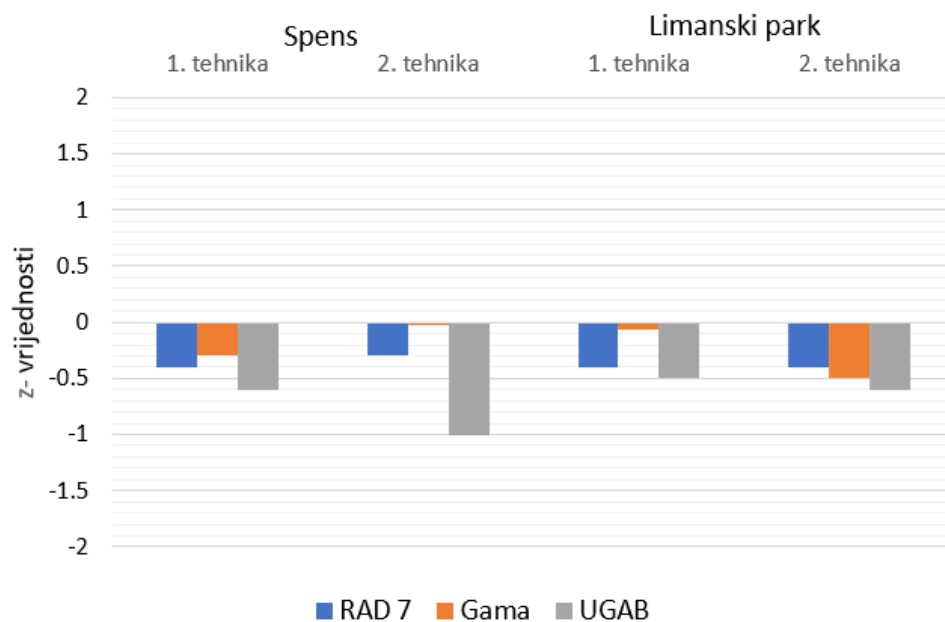
2017.		RAD 7 [Bq/l]	Gama [Bq/l]	LSC Quantulus [Bq/l]			
				MOS (PSA=30)		UGAB (PSA=70)	
Spens	direktno	$20,7 \pm 1,1$ $z = -0,4$	$21,0 \pm 0,7$ $z = -0,3$	vial	$28,6 \pm 2,8$ $z = 1,4$	vial	$19,7 \pm 1,7$ $z = -0,6$
		$20,7 \pm 1,1$ $z = -0,2$	$21,0 \pm 0,7$ $z = -0,1$	boca	$25,5 \pm 2,6$ $z = 1,3$	boca	$17,8 \pm 1,7$ $z = -1,1$
	kanta	$21,3 \pm 1,9$ $z = -0,3$	$22,3 \pm 1,2$ $z = -0,03$	vial	$27,8 \pm 2,5$ $z = 1,4$	vial	$18,4 \pm 2,1$ $z = -1,0$
		$21,3 \pm 1,9$ $z = -0,1$	$22,3 \pm 1,2$ $z = 0,2$	boca	$25,2 \pm 2,2$ $z = 1,1$	boca	$17,2 \pm 1,8$ $z = -1,2$
Limanski park	direktno	$27 \pm 1,0$ $z = -0,4$	$25,7 \pm 2,5$ $z = -0,6$	$40,1 \pm 2,6$ $z = 1,5$		$25,9 \pm 2$ $z = -0,5$	
	kanta	$24 \pm 1,0$ $z = -0,4$	$23,4 \pm 1,7$ $z = -0,5$	$35,7 \pm 3$ $z = 1,5$		$23,1 \pm 1,3$ $z = -0,6$	

Usporedbom rezultata koncentracija aktivnosti radona uzetih dvjema tehnikama sa dva izvora pitke vode u Novom Sadu (tablica 5.) može se zaključiti da je sa izvora Spens gdje je mlaz vode bio slabiji u redu koristiti obje tehnike. U slučaju Limanskog parka, gdje je zamijećen jači mlaz vode u odnosu na Spens, bolji su rezultati dobiveni punjenjem bočica direktno sa izvora. S obzirom na veći pritisak vode na izvoru Limanski park nemoguće je dobiti uzorak koji ne sadrži mjehuriće zraka zbog čega smo u slučaju druge tehnike dobili nešto niže rezultate, no u okviru eksperimentalne pogreške (Slika 29.). Kao što vidimo iz tablice 5., z-vrijednosti su unutar ± 2 intervala što znači da su sve metode korištene za ta mjerenja prikladne (grafički prikazano na slici 28.).

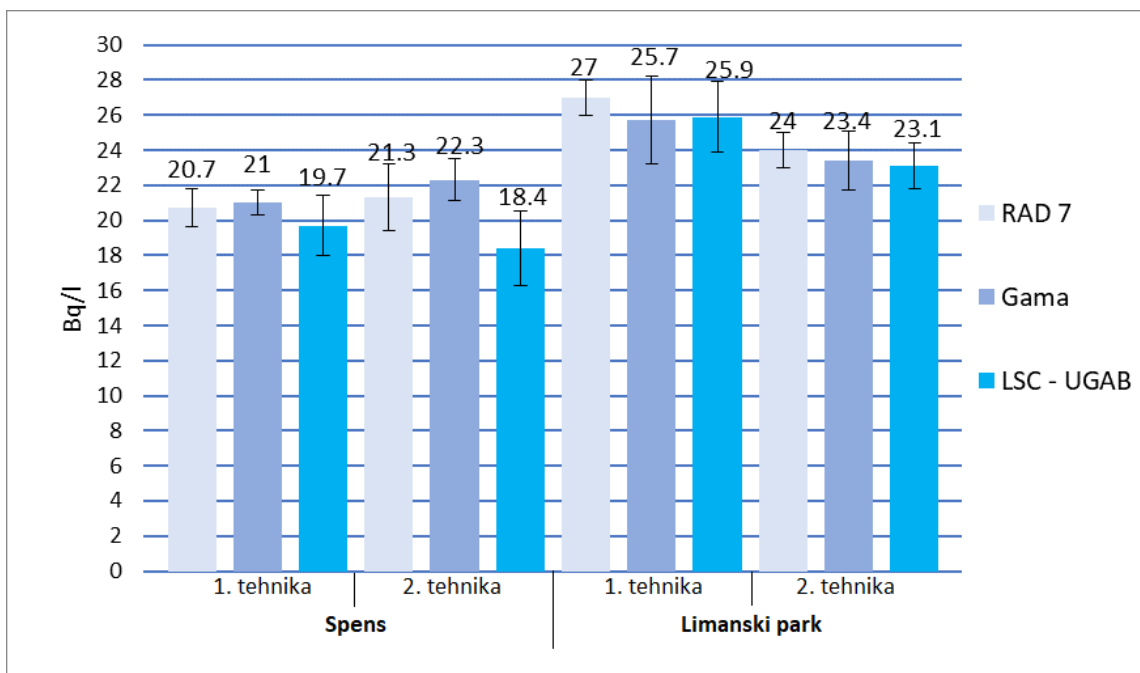
Kod LSC metode smo koristili dva načina uzorkovanja za obje tehnike. U prvom slučaju smo sipali vodu izravno u mjerne staklene bočice (vial), a u drugom slučaju u plastične boce te se ona presipavala u bočice za mjerenje. Isto smo napravili i za drugu tehniku uzorkovanja vode iz kante. Rezultati su približnih vrijednosti, no vidimo da u oba slučaja uzorkovanje u staklenim bočicama daje veći rezultat te su u slučaju UltimaGold AB koktela z-vrijednosti nešto manje (Slika 30.). Generalno u slučaju korištenja MOS koktela vidimo da su vrijednosti koncentracija aktivnosti radona znatno veće u odnosu na rezultate dobivene ostalim metodama (RAD 7, Gama, UGAB), no uzorci vode uzeti u plastične boce nam isto daju manje vrijednosti koncentracije aktivnosti radona.

Naime, određeni dio radona izgubi se u kontaktu sa zrakom što se svakako događa pri presipavanju vode iz boce u mjerne bočice no isto tako radon difundira kroz plastičnu površinu boce što objašnjava niže vrijednosti koncentracije radona pri uzorkovanju vode u plastičnim bocama u odnosu na uzorkovanje u staklenim mjernim bočicama.

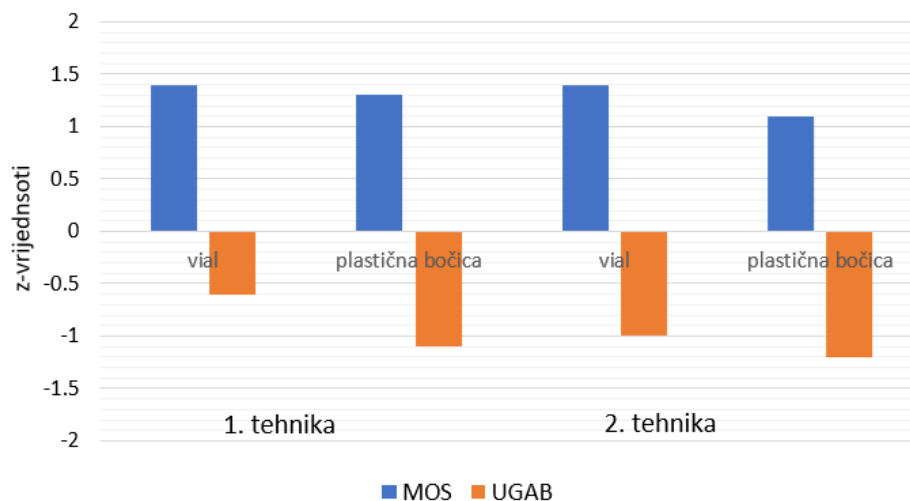
Razlika u rezultatima nije velika, u okviru je eksperimentalne pogreške, no pokazuje kako samo uzorkovanje odnosno različiti načini uzorkovanja mogu dovesti do različitih te neočekivanih rezultata. Možemo reći da ovisno o brzini istjecanja vode na izvoru, jedna odnosno druga tehnika daje bolje rezultate. Naime, ako je mlaz vode na izvoru jak, onda je bolje koristiti tehniku sa kantom jer će direktnim punjenjem boce dolaziti do izbacivanja djela vode iz boce i stalno će postojati mjehurić zraka. S druge strane, kada je mlaz vode na izvoru slabiji, onda je jednostavnije uzorkovati vodu direktno u mjernu bocu jer se može dobiti adekvatan uzorak koji ne sadrži mjehuriće zraka.



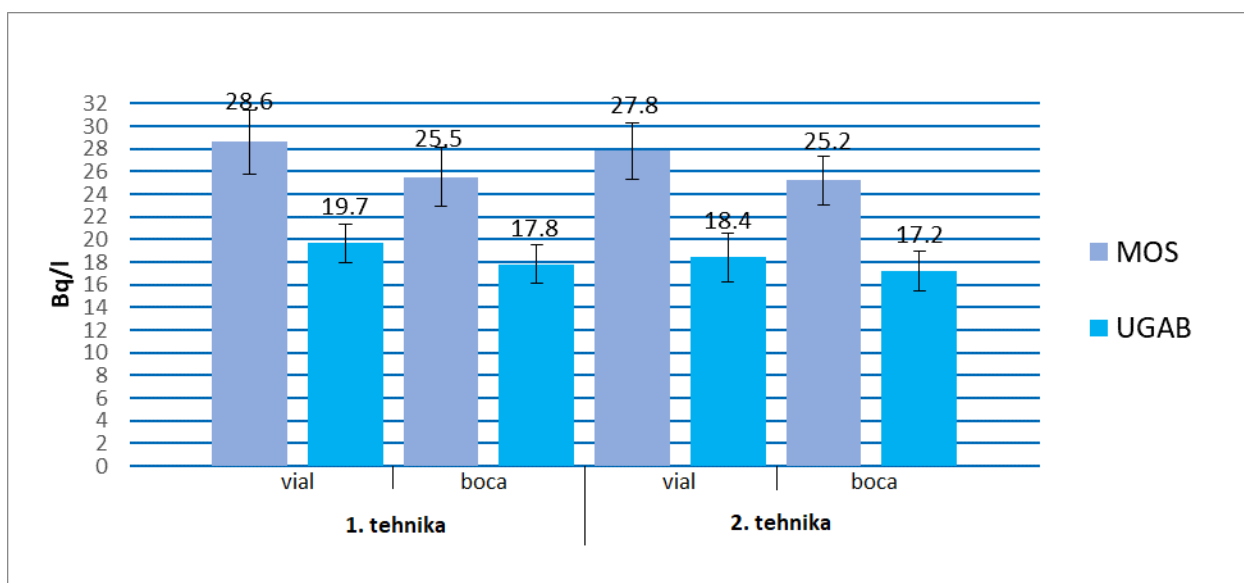
Slika 28. Prikaz z-vrijednosti rezultata dobivenih mjerenjima uzoraka vode sa izvora Spens i u izvora Limanskom parku koristeći obje tehnike



Slika 29. Grafički prikaz rezultata mjerenja koncentracija aktivnosti radona (te standardne devijacije pojedinih mjerenja) u uzorcima vode sa izvora u Limanskom parku te Spens (korištene obje tehnike)



Slika 30. Prikaz z-vrijednosti rezultata dobivenih mjerenjima uzoraka vode sa izvora Spens (Novi Sad) LSC metodom (vial/plastična bočica)



Slika 31. Grafički prikaz rezultata mjerenja (te standardne devijacije pojedinih mjerenja) koncentracija aktivnosti radona u uzorcima vode sa izvora Spens dobiveni pomoću LSC Quantulus uređaja pri čemu je voda uzorkovana u mjerne staklene bočice i obične plastične boce (korištene obje tehnike)

U tablici 6. su prikazani rezultati uzorkovanja vode direktnom tehnikom na izvorima vode u Niškoj Banji (Školska česma te Glavno vrelo) te su radi usporedbe prikazani i rezultati dobiveni pomoću uređaja RAD 7 i gama spektrometrijom.

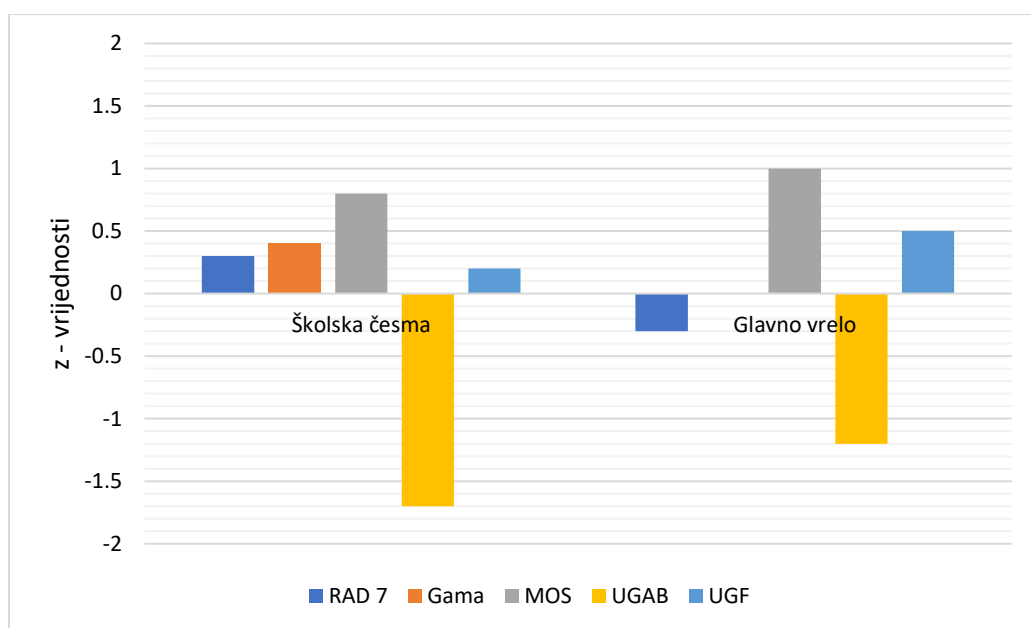
Tablica 6. Rezultati mjerenja LSC metodom uzoraka iz Niške Banje uzorkovanih prvom tehnikom (direktno u bocu)

2017.		RAD 7 [Bq/l]	Gama [Bq/l]	LSC Quantulus [Bq/l]		
Niška Banja				MOS (PSA=30)	UGAB (PSA=70)	UGF
Školska česma	direktno	622 ± 12 z = 0,3	634 ± 17 z = 0,4	674 ± 11 z = 0,8	429 ± 5 z = -1,7	612 ± 7 z = 0,2
		509 ± 17 z = -0,6	596 ± 34 z = 0,3	674 ± 11 z = 1,1	429 ± 5 z = -1,4	612 ± 7 z = 0,5
		614 ± 33 z = 0,5	512 ± 26 z = -0,6	674 ± 11 z = 1,1	429 ± 5 z = -1,4	612 ± 7 z = 0,5
Glavno vrelo	direktno	33,4 ± 2,4 z = -0,3	-*	41,4 ± 1,3 z = 1,0	27,6 ± 0,8 z = -1,2	38,5 ± 1,2 z = 0,5

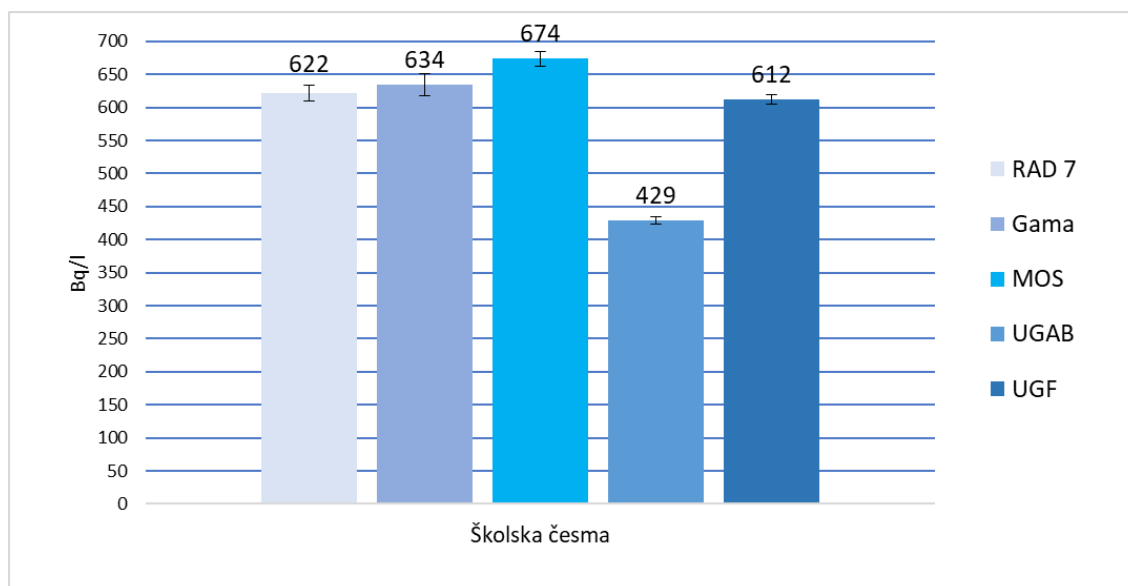
*Uzorak je izgubljen.

U tablici 6. vidimo rezultate mjerenja LSC metodom dobivene korištenjem različitih scintilacijskih koktela – monofazni scintilacijski koktel Ultima Gold AB (UGAB) te dvofazni scintilacijski kokteli Mineral Oil Scintillator (MOS) te Ultima Gold F (UGF). U tablicu su radi usporedbe stavljeni i rezultati dobiveni metodom RAD 7 i gama spektrometrijom. Sa izvora Školska česma su uzeta po tri uzorka za RAD 7 i gama metodu koji su mjereni kroz tri dana od dana uzorkovanja te je zbog toga primjetan pad koncentracije aktivnosti radona u uzorku. Kod RAD 7 metode možemo primijetiti nisku vrijednost koncentracije aktivnosti radona ((509 ± 17) Bq/l) koju možemo pripisati lošem uzorkovanju, naime u mjernim bočicama su primijećeni mjehurići zraka što dovodi do vezanja radona za zrak i nemogućnost mjerenja stvarne vrijednosti koncentracije radona u uzorku vode. Kod gama metode su uzorci stajali u plastičnim bocama te su potom presipani u Marineli posudu uslijed čega je došlo do dodatnog „bijega“ radona u okolni zrak te je posljedica toga znatno niža izmjerena koncentracija aktivnosti radona od (512 ± 26) Bq/l. U slučaju mjerenja metodom RAD 7 uzorci su stajali u staklenim bočicama te su rezultati znatno realniji iz čega možemo zaključiti da su staklene bočice za uzorkovanje prikladnije za mjerenje radona u vodi. Možemo zaključiti da je najbolje da se mjerenje vrši nedugo nakon samog uzorkovanja kako nebi došlo do gubitka uzoraka, ili pak dobivanja rezultata sa znatno manjom koncentracijom od stvarne. Ujedno je i korisno napraviti više uzoraka sa istog izvora kako bismo mogli potvrditi

valjanost metode na temelju rezultata, a i kako bismo u slučaju lošeg uzorkovanja ipak imali dodatne uzorke za mjerenje. Promotrimo li rezultate dobivene LSC metodom, uočavamo da vrijednosti dobivene koristeći Ultima Gold AB scintilacijski koktel daju znatno veće odstupanje od rezultata dobivenih koristeći druga dva dvofazna koktela, kao i od rezultata dobivenih sa metodama RAD 7 i gama sprektrometrom. Prema svojim karakteristikama, UGAB dobro razdvaja α -spektar od β -spektra, no nije dao očekivane rezultate već znatno niže vrijednosti koncentracija u odnosu na druge metode (Slika 33.). MOS i UGF – dvofazne metode, za razliku od UGAB daju puno bolje rezultate što dovodi do zaključka da oni bolje vežu radon iz vode. Z-vrijednosti su unutar intervala ± 2 (Slika 32.) što znači da su metode adekvatne.



Slika 32. Prikaz z-vrijednosti rezultata dobivenih mjerenjima uzoraka sa izvora u Niškoj Banji koristeći različite metode direktnom tehnikom



Slika 33. Grafički prikaz rezultata mjerenja koncentracija aktivnosti radona (te standardne devijacije pojedinih mjerenja) u uzorcima vode sa izvora „školska česma“ dobiveni pomoću LSC Quantulus uređaja pri čemu se za pripremu uzoraka koristilo tri scintilacijska koktela: MOS, UGAB, UGF (uzorkovano prvom tehnikom), radi usporedbe su prikazani rezultati dobiveni uređajima RAD 7 i HPGe Gama spektrometrom

U Niškoj Banji na izvoru Školska česma je direktno na mjestu uzorkovanja mjerena koncentracija aktivnosti radona u vodi pomoću RAD 7 te je dobiven rezultat (634 ± 41) Bq/l. Kako je relativna vlažnost bila 14%, te nismo ju mogli značajnije promijeniti isušivanjem zraka, vrijednost je dobivena sa nešto većom mjernom pogreškom.

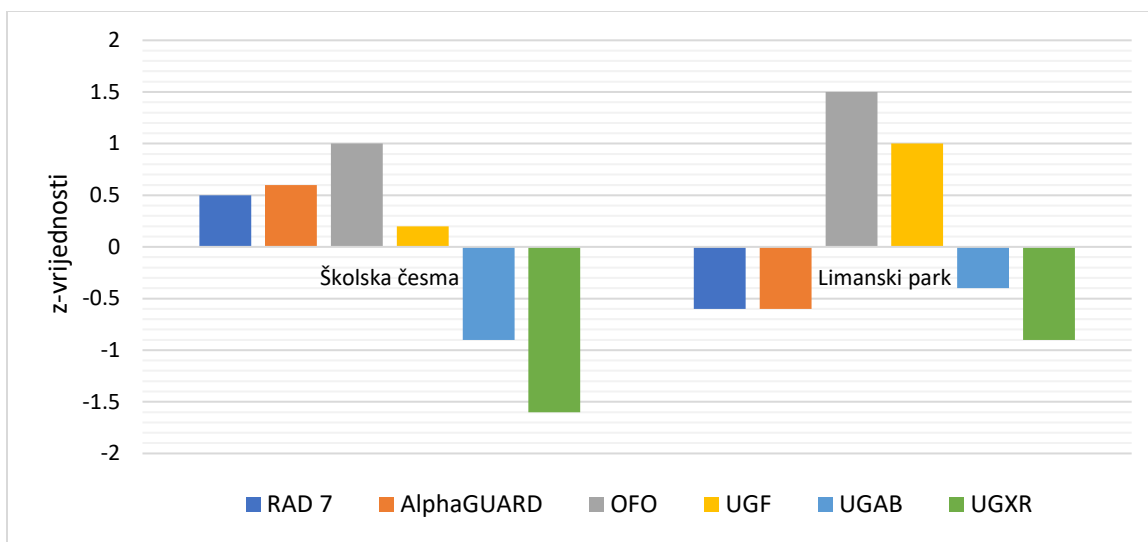
Drugi komplet rezultata se odnosi na mjerenja izvršena u ožujku 2018. godine. Interkomparacija je napravljena pomoću uređaja iz laboratorija u Novom Sadu (PMF-Departman za fiziku) te laboratorija za niske radioaktivnosti u Osijeku (Odjel za fiziku). Korišteni su slijedeći uređaji: RAD 7, AlphaGUARD, LSC Quantulus te LSC TriCarb.

U tablici 7. su prikazani rezultati uzorkovanja vode na izvorima vode u Niškoj Banji (Školska česma) i Novom Sadu (Limanski park) uzorkovani direktnom metodom.

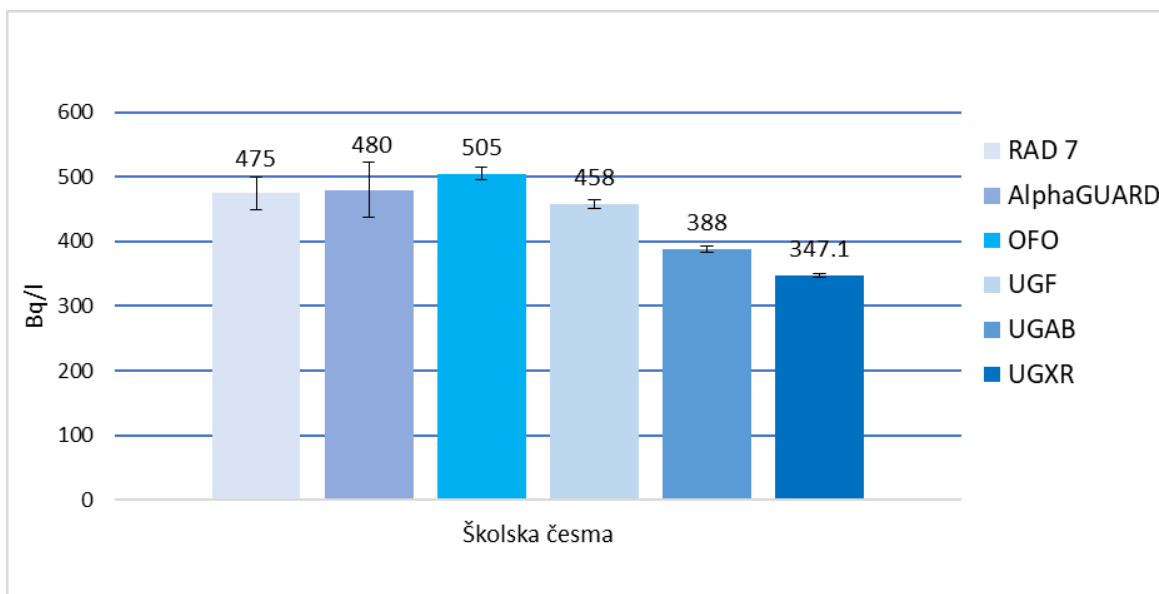
Tablica 7. Rezultati interkomparacije

2018.	RAD 7 [Bq/l]	AlphaGUARD [Bq/l]	LSC Quantulus [Bq/l]			LSC TriCarb [Bq/l]
			OFO	UGF	UGAB (PSA=70)	UGXR
Školska česma	475 ± 25 $z = 0,5$	480 ± 43 $z = 0,6$	505 ± 10 $z = 1,0$	458 ± 6 $z = 0,2$	388 ± 5 $z = -0,9$	$347,1 \pm 2,7$ $z = -1,6$
Limanski park	$23,6 \pm 2,5$ $z = -0,6$	$23,7 \pm 4,6$ $z = -0,6$	$32,8 \pm 1,1$ $z = 1,5$	$30,6 \pm 0,9$ $z = 1,0$	$24,5 \pm 0,6$ $z = -0,4$	$22,1 \pm 0,9$ $z = -0,9$

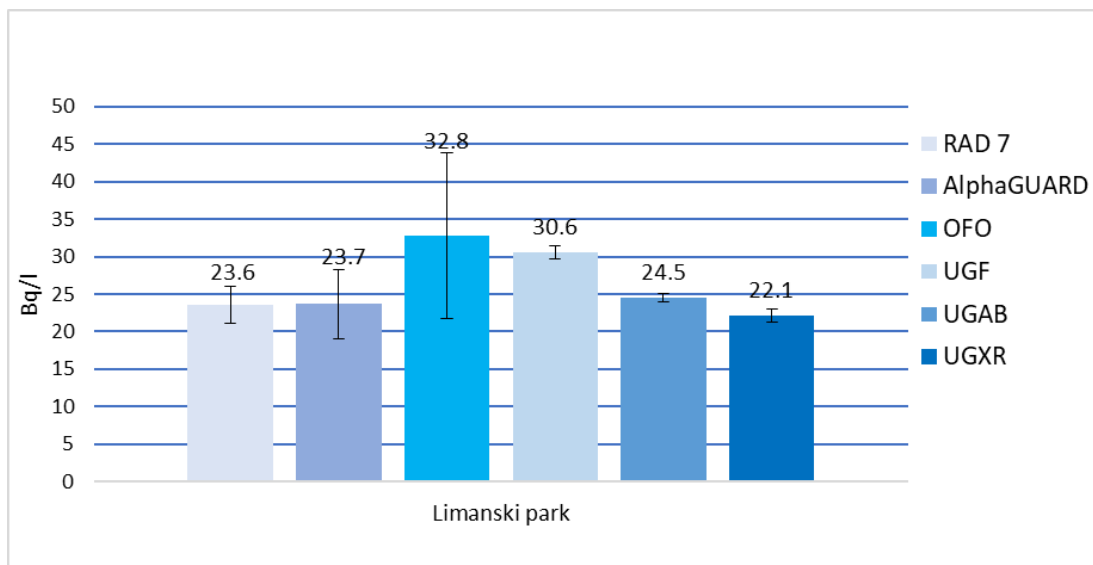
Iz tablice 7. možemo vidjeti kako se rezultati dobiveni alfa spektrometrima poklapaju dok kod rezultata dobivenih tekućinskim scintilacijskim detektorima postoji odstupanje. Nastalo odstupanje u rezultatima dobivene LSC metodom je posljedica korištenja različitih scintilacijskih koktela – monofaznih i dvofaznih. Naime, u prethodnim mjerenjima se pokazalo da monofazni scintilacijski kokteli daju nešto niže rezultate kao što je slučaj u ovoj interkomparaciji. S druge strane smo dobili lijepo slaganje vrijednosti koncentracija aktivnosti dvofaznog scintilacijskog koktela Opti Fluor O (OFO) sa drugim metodama (RAD 7, AlphaGUARD). Isto tako na temelju rezultata dobivenih na izvorima manje koncentracije radona vidimo da se rezultati lijepo preklapaju (kao u slučaju Limanskog parka – Slika 36.). Z-vrijednosti su unutar intervala ± 2 (Slika 34.) što znači da su metode i pri ovim mjerenjima kao i rezultati prihvatljivi.



Slika 34. Prikaz z-vrijednosti rezultata dobivenih mjerenjima uzoraka sa izvora u Niškoj Banji koristeći različite metode



Slika 35. Grafički prikaz rezultata interkomparacije (te standardne devijacije pojedinih mjerenja) u uzorcima vode sa izvora Školska česma dobiveni pomoću RAD 7, AlphaGUARD, LSC Quantulus uređaja pri čemu se za pripremu uzoraka koristilo tri scintilacijska koktela: OFO, UGF, UGAB, te LSC TriCarb gdje se kao scintilacijski koktel koristio UGXR (Ultima Gold XR) (uzorkovano prvom tehnikom)



Slika 36. Grafički prikaz rezultata interkomparacije (te standardne devijacije pojedinih mjerenja) u uzorcima vode sa izvora Limanski park dobiveni pomoću RAD 7, AlphaGUARD, LSC Quantulus te LSC TriCarb (uzorkovano prvom tehnikom)

7. Zaključak

Kako je već samo uzorkovanje pri mjerenju radona u vodi glavni uzrok mjernih pogrešaka potrebno je usavršiti metode kako bi rezultati bili korektni i upotrebljivi.

Temeljem rezultata mjerenja navedenih u eksperimentalnom dijelu diplomskog rada, može se donijeti nekoliko zaključaka o korektnosti korištenih metoda i tehnika mjerenja koncentracije aktivnosti radona u vodi.

Pri samom uzimanju uzorka, isti uzorak je potrebno i pohraniti u ambalažu određene zapremnine dok se uzorak ne analizira. Idealno bi bilo kada bi se uzorkovanje moglo uvijek vršiti u bočicama u kojima se mjeri. Iz dobivenih rezultata je vidljivo da veliku ulogu ima materijal bočice u kojoj se nalazi uzorak. Bolji rezultat se dobije kada je bočica staklena jer kroz plastiku radon lako pobjegne te rezultati ne mogu dati točnu koncentraciju radona u vodi. Prednost uređaja RAD 7 je upravo u tome što se uzorak može uzeti u mjernim staklenim bočicama te nije potrebno niti presipavati uzorak pri čemu inače dolazi do dodatnog gubljenja radona iz uzorka.

RAD 7 i AlphaGUARD su uređaji čija je prednost mogućnost njihova korištenja na terenu dakle omogućeno je mjerenje uzoraka direktno na mjestu uzorkovanja. Osim toga, obrada uzoraka je vremenski znatno kraća u odnosu na preostale metode. Rezultati dobiveni ovim uređajima su generalno korektni, a u interkomparaciji su se rezultati ova dva uređaja poklopili, te su z-vrijednosti dobre što podupire stajalište o tim metodama kao korektnim za mjerenje koncentracije aktivnosti radona u vodi. Ono što može umanjiti točnost rezultata kod ovih metoda, osim korištenje neadekvatne ambalaže (plastični materijal), je slabljenje pumpe za izvlačenje radona iz vode, no i to se može regulirati korekcijskim faktorom koji se uzima u obzir pri izračunima.

Gama spektrometrijska metoda se pokazala kao pouzdana no zbog vremenske ograničenosti, vremenski interval između trenutka uzorkovanja i mjerenja ne smije trajati dulje od tri dana, u suprotnom se dobije nepouzdana rezultati sa vrijednostima nižim od realnih. Bitno je napomenuti da je preporučljivo prilikom presipavanja uzorka u Marineli posudu istu napuniti do vrha i obložiti ju materijalom koji će umanjiti difuziju radona. Budući da smo uzorke uzimali u plastičnim bocama, preporučljivo je da se uzorci vode uzimaju u staklenim flašama volumena 1l ako se već ne može uzorkovanje vršiti direktno u Marineli posudu i izmjeriti u što kraćem roku kako bismo dobili što točnije rezultate.

Tekućinski scintilacijski detektori su uređaji čija su prednost scintilacijski kokteli koji mogu zarobiti radon u sebi, budući da se radon veže za fluor u koktelu, samim time tako odmah

pomiješan uzorak sa koktelom može stajati duže vrijeme do analize jer radon ne može “pobjeći” iz koktela. Najbolje bi bilo da se na mjestu uzorkovanja pripreme scintilacijski kokteli, no kako priprema za mjerenje LSC metodom zahtjeva kompliciraniju pripremu nego kod ostalih metoda, to nije u praksi. No ni svaki koktel ne djeluje jednako. Kao što se vidjelo iz rezultata, Ultima Gold AB je davao preniske vrijednosti koncentracija, dok je unatoč preporuci proizvođača Mineral Oil Scintillator davao previsoke rezultate u odnosu na ostale metode. LSC je stoga potrebno kalibrirati za svaki scintilacijski koktel posebno kako bi rezultati bili korektni.

Rezultati iz Niške Banje pokazuju da je LSC Quantulus dao prihvatljive rezultate, ovisno o korištenom koktelu dok je LSC TriCarb (Ultima Gold XR koktel) dao veće odstupanje vrijednosti od ostalih metoda.

Rezultati mjerenja sa različitim tehnikama uzorkovanja (direktno/kanta) nisu pomogli u donošenju zaključka o tome koja je tehnika bolja. Uzorkovanje na izvoru Spens je dalo bolje rezultate u slučaju 2. tehnike, dok je uzorkovanje u Limanskom parku dalo bolje rezultate u slučaju 1. tehnike. Potrebno je raditi na daljnjim istraživanjima koja će utvrditi koja je tehnika bolja kako bi se mjerne nesigurnosti prilikom uzorkovanja spomenutim tehnikama smanjile.

Pri uzorkovanju se svakako može pripaziti na određene načine. Kada se uzorak vode uzima sa izvora, ukoliko se koristimo tehnikom pomoću kante, bočica svakako mora biti sasvim uronjena u vodu i zatvorena pod vodom na taj način da nema prisutnih mjehurića zraka jer svaki prazan prostor u bočici predstavlja gubitak radona iz uzorka vode i daje loš rezultat mjerenja. Ukoliko se koristimo direktnom tehnikom, voda se mora prelijevati preko rubova bočice te isto tako mora biti pažljivo zatvorena da nema mjehurića zraka u bočici.

Sve korištene metode u mjerenjima imaju svojih prednosti i mana, postoji razlika u brzini mjerenja te preciznosti dobivenih rezultata, no generalno su sve izvedive i prikladne za korištenje te nam daju korektne informacije o vrijednostima koncentracija aktivnosti radona u uzorcima vode što nam ukazuju izračunate z-vrijednosti.

Osim mjerenja koncentracija radona u zraku potrebno je provoditi mjerenja radona u vodi budući da postoje područja koja imaju visoke koncentracije radona, kako u zraku tako i u vodi za piće. Jedno od njih je i izvor u Niškoj Banji (Školska česma) gdje je na mjestu uzorkovanja određena koncentracija radona u vodi 6 puta veća od dozvoljene koncentracije aktivnosti radona u vodi za piće (100 Bq/l) koju je predložila Europska komisija. Koncentracija aktivnosti u zraku na istom mjestu je iznosila 1940 Bq/m³.

U daljnjem radu na razvoju tehnike mjerenja koncentracije aktivnosti radona u vodi sa tekućinskim scintilacijskim detektorom potrebno je ispitati razloge zbog kojih se dobivaju niže koncentracije aktivnosti kada se uzorak pripremi sa monofaznim scintilacijskim koktelom.

U svrhe ovog diplomskog rada rađena su mjerenja radona ^{222}Rn koji je bio prisutan u vodi, dakle u radu nije ispitivan utjecaj radija ^{226}Ra ukoliko ga je bilo u uzorku. Još jedan razlog zašto je bolje vršiti mjerenja odmah nakon uzorkovanja je taj da ukoliko ima radija ^{226}Ra u uzorku vode, doprinos ^{222}Rn koji bi nastao raspadom radija ^{226}Ra možemo zanemariti. Mjerenje koncentracija radija-226 je tema sama za sebe čija se analiza može napraviti u nekim od budućih radova.

Tablica 8. U tablici su navedene smjernice kako bi se što bolje izvršilo uzorkovanje, transport i mjerenje ^{222}Rn u uzorcima vode.

Uzorkovanje
• Prije samoga uzorkovanja mora se znati koliko uzoraka će se uzeti te je potrebno napraviti raspored uzorkovanja te o njima voditi bilješke. Obavezno je označiti uzorke, navesti mjesto i vrijeme uzorkovanja kako se uzorci nebi pomiješali te kako bi se mogla napraviti korekcija na raspad radona ukoliko se mjerenje ne radi odmah poslije uzorkovanja. • Bitno je odlučiti u čemu će se uzorkovati voda. Najbolje je da su to mjerne bočice u kojima se odmah i vrši mjerenje radona. Staklene bočice imaju prednost ispred plastičnih bočica pogotovo ako se mjerenje vrši nakon nekoliko sati/dana od uzorkovanja. • Mjesto na kojem će se uzorkovati voda mora biti dostupno. • Prilikom uzorkovanja mora se pripaziti na jačinu mlaza vode izvora kako bi izbjegli mjehuriće zraka u uzorku. Treba biti strpljiv prilikom uzorkovanja kako bismo dobro uzorkovali o čemu ovise rezultati i vjerodostojnost mjerenja. • Obavezno dobro zatvoriti bočice, jednom otvoren uzorak je kasnije neiskoristiv za mjerenja.
Transport
• Ukoliko se mjerenje ne vrši odmah nakon uzorkovanja, potrebno je osigurati uzorke, provjeriti jesu li svi uzorci na broju, bočice dobro zatvorene i označene kako se nebi izgubile u transportu. • Najbolje da se uzorci nalaze u staklenim bočicama budući da radon može „pobjeći“ kroz plastične bočice te nam mjerenja ne mogu dati realne koncentracije radona.

Mjerenje

- Nakon pravilnog uzorkovanja u odgovarajuće mjerne bočice slijedi se postupak mjerenja koji je karakterističan za određene metode opisane u radu.
- Potrebno je pažljivo pripremiti uzorke za mjerenje (postupak pravljenje koktela opisan u radu - LSC metode).
- Najbolje bi bilo da se naprave probna mjerenje ukoliko se prvi put radi sa određenim metodama kako bi se pri mjerenjima prikupljenih uzoraka znalo služiti uređajima.

8. Literatura

Committee on Risk Assessment of Exposure to Radon in Drinking Water. *Risk Assessment of Radon in Drinking Water*. Washington, D.C.: National academy press, 1999.

Detekcija i zaštita od zračenja

(<http://www.nemis.hr/index.php/radioaktivnost/detekcija-i-zastita-od-zracenja.html>)

[Dostupno 14.4.2018.]

EPA Method 913.0., *Determination of radon in drinking water by liquid scintillation counting*, Radioanalysis Branch, Nuclear Radiation Assessment Division, Environmental Monitoring Systems Laboratory, U.S., Environmental Protection Agency, 89119, 1991.

Faj, Z., *Pregled povijesti fizike*, Drugo dopunjeno izdanje, Sveučilište J.J.Strossmayera, Pedagoški fakultet, Osijek, 1999.

Hassfjell C.S., Grimsrud T.K, Standring W. J.F., *Lung cancer prevalence associated with radon exposure in Norwegian homes*, 2017.

James, A. Lung Dosimetry // Nazaroff, W.; Nero, Jr., *Radon and its decay products in indoor air: An Overview*. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1988., Str. 259-304.

Kim Si-Heon, Hwang Won Ju, Cho Jeong-Sook, Kang Dae Ryong, *Attributable risk of lung cancer deaths due to indoor radon exposure*, 2016.

Knežević J., *Master rad, Metode mjerenja ^{222}Rn u vodi*, Prirodno-matematički fakultet, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad, 2017.

Nazaroff, W.; Nero, Jr., A. *Radon and its decay products in indoor air: An Overview*. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1988., Str. 1-47.

Nikolov J, Todorović N, Petrović Pantić T, Forkašić S, Mrđa D, Bikit I, Krmar M, Vesković M, *Exposure to radon in the radon spa Niška Banja, Serbia*, Radiation Measurements 47: 443-450., 2012.

RAD7 H₂O, *Durridge radon instrumentation*, Manual (Stainless Steel Aerator), 2016.

Stojković I., *Doktorska disertacija, Optimizacija tečnog scintilacionog spektrometra za ispitivanje alfa i beta emitera u vodama*, Prirodno-matematički fakultet, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad, 2015.

United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), *Report to the General Assembly with scientific annexes: Sources and Effects of Ionising Radiation*. Volume I: Sources. UNSCEAR 2000. New York: United Nations, 2000.

Todorović N, Jakonić I, Nikolov J, Hansman J, Vesković M, *Establishment of a method for ²²²Rn determination in water by low-level liquid scintillation counter*, Radiation Protection, Dosimetry , 1-5. doi:10.1093/rpd/ncu240., 2014.

QuantaSmart For The TriCarb Liquid Scintillation Analyzer Reference Manual, PerkinElmer, Inc., 2004.

Water Quality-Radon 222., *Part 2: Test method using gamma-ray spectrometry*, BS ISO 13164-2:2013, pp. 3-4., 2013.

9. Životopis

Ana Pavlačić je rođena 2. listopada 1993. godine u Osijeku. Završila je osnovnu školu „Tin Ujević“ u Osijeku te 2008. godine upisuje Prirodoslovno-matematičku gimnaziju u Osijeku. Nakon završetka gimnazije, akademske godine 2012./2013. upisuje preddiplomski studij fizike na Odjelu za fiziku Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku i završava ga akademske godine 2014./2015. te dobiva titulu prvostupnice fizike. Akademske godine 2015./2016. upisuje diplomski studij fizike i informatike na Odjelu za fiziku Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku. U slobodno vrijeme se bavi fotografijom te prati i pomaže u radu lokalnih udruga za zaštitu životinja koje se brinu za napuštane pse i mačke.