

Radon u prirodnim mineralnim vodama

Bošnjaković, Matea

Master's thesis / Diplomski rad

2019

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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:160:845016>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-12-03**



Repository / Repozitorij:

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



☒ ČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
ODJEL ZA FIZIKU

MATEA BOŠNJAKOVIĆ

RADON U PRIRODNIM MINERALNIM VODAMA

Diplomski rad

Osijek, 2019.

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU

ODJEL ZA FIZIKU

MATEA BOŠNJAKOVIĆ

RADON U PRIRODNIM MINERALNIM VODAMA

Diplomski rad

predložen Odjelu za fiziku Sveučilišta J. J. Strossmayera u Osijeku radi
stjecanja akademskog naziva **MAGISTRA EDUKACIJE FIZIKE I
INFORMATIKE**

Osijek, 2019.

"Ovaj diplomski rad je izrađen u Osijeku pod vodstvom izv. prof. dr. sc. Vanje Radolića i doc. dr. sc. Marine Poje Sovilj u sklopu Sveučilišnog diplomskog studija fizike i informatike na Odjelu za fiziku Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku".

Predgovor

Zahvalila bih se izv. prof. dr. sc. Vanji Radoliću i doc. dr. sc. Marini Poje Sovilj za mentorstvo, pomoć pri izradi diplomskog rada te provedbi eksperimentalnog dijela rada.

Sadržaj

| | |
|--|----|
| UVOD..... | 1 |
| 1. RADIOAKTIVNOST..... | 2 |
| 1.1. VRSTE RADIOAKTIVNOG RASPADA..... | 3 |
| 1.1.1. α RASPAD..... | 3 |
| 1.1.2. β RASPAD..... | 4 |
| 1.1.3. γ RASPAD..... | 6 |
| 1.2. ZAKON RADIOAKTIVNOG RASPADA..... | 7 |
| 2. DOZIMetriJA..... | 11 |
| 2.1. DOZIMetriJSKE VELIČINE I NJIHOVE MJerNE JEDINICE..... | 11 |
| 2.2. EFEKTIVNA DOZA RADONA PRIMLJENA INGESTIJOM..... | 13 |
| 3. RADIOAKTIVNOST NA ZEMLJI..... | 14 |
| 4. RADON..... | 15 |
| 4.1. FIZIKALNE I KEMIJSKE KARAKTERISTIKE RADONA..... | 15 |
| 4.2. RADON U TLU I VODI..... | 16 |
| 4.3. OPASNOST ZA ZDRAVLJE..... | 18 |
| 5. PRIRODNE MINERALNE VODE U HRVATSKOJ..... | 21 |
| 5.1. POTROŠNJA FLAŠIRANE VODE U HRVATSKOJ..... | 21 |
| 6. EKSPERIMENTALNI POSTUPCI - MJerENJE RADONA U VODI..... | 23 |
| 6.1. SCINTILACIJSKI DETEKTORI..... | 23 |
| 6.2. TRICARB 2900..... | 25 |
| 6.3. PRIPREMANJE UZORAKA I MJerENJE..... | 28 |
| 6.4. AlphaGUARD MJerNI SUSTAV..... | 31 |
| 6.5. MJerENJE RADONA U VODI..... | 32 |
| 7. REZULTATI I RASPRAVA..... | 34 |
| 8. ZAKLJUČAK..... | 40 |
| LITERATURA..... | 41 |
| ŽIVOTOPIS..... | i |

RADON U PRIRODNIM MINERALNIM VODAMA

MATEA BOŠNJAKOVIĆ

Sažetak

U teorijskom dijelu diplomskog rada navedene su i opisane vrste radioaktivnog raspada. Opisane su dozimetrijske veličine, te utjecaj ionizirajućeg zračenja na čovjeka. Navedene su fizikalno-kemijske karakteristike radona i razlog njegova proučavanja. Nadalje, u radu je opisano i značenje naziva prirodna mineralna voda.

U eksperimentalnom dijelu rada opisane su metode određivanja koncentracije radona u vodi tekućinskim scintilacijskim detektorom TriCarb 2900 i AlphaGUARD mjernog uređaja kao i njihov princip rada. Dobiveni rezultati mjerenja su uspoređeni, te su izračunate godišnje efektivne doze primljene ingestijom takve vode. Zatim su uspoređene vrijednosti s dozama primljenima inhalacijom i ingestijom vode iz gradskih vodovoda.

40 stranice, 16 slika, 9 tablica, 21 literaturnih navoda

Rad je pohranjen u knjižnici Odjela za fiziku

Ključne riječi: radioaktivnost / dozimetrijske veličine / radon / prirodna mineralna voda / TriCarb 2900 / AlphaGUARD

Mentor: doc. dr. sc. Marina Poje Sovilj

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

Ocjenjivači: doc. dr. sc. Maja Varga Pajtler

mr. sc. Slavko Petrinšak

Rad prihvaćen: 27. veljače 2019.

RADON IN NATURAL MINERAL WATERS

MATEA BOŠNJAKOVIĆ

Abstract

In theoretical part of this thesis the types of radioactivity are described. Dosimetric quantities are described as well as the influence of ionising radiation on humans. The physical and chemical properties of radon are described and many reason for it's study are emphasized. Furthermore, the term natural mineral water is described in this thesis.

In the experimental part of this thesis the methods of determination of concentration radon in water by TriCarb 2900 and AlphaGuard measuring system are described as well as their principle of operation. Furthermore, the sampled natural mineral waters that are available on the Croatian market are presented as well as the obtained results. Effective annual doses due to water ingestion were calculated and the results of measurement comparison were given. The obtained values were compared with the doses received due to inhalation and ingestion of water from waterworks.

40 pages, 16 figures, 9 tables, 21 references

Thesis deposited in Department of Physics library

Keywords: radioactivity / dosimetric quantities / radon / natural mineral water / TriCarb 2900 / AlphaGUARD

Supervisor: Marina Poje Sovilj, PhD, Assistant professor

Vanja Radolić, PhD, Associate professor

Reviewers: Maja Varga Pajtler, PhD

Slavko Petrinšak, MSc

Thesis accepted: 27th February 2019

UVOD

Živimo izloženi prirodnoj radioaktivnosti koju primamo putem vode, hrane, zraka. Najveći udio primljene doze zračenja (oko 50% ukupne doze) potječe od radona, prirodnog radioaktivnog plina te njegovih potomaka [1]. Radon nastaje radioaktivnim raspadom $^{226}_{88}\text{Ra}$ koji je potomak uranijeva radioaktivna niza.

Intenzivnije proučavanje i istraživanje radona započelo je u drugoj polovici 20. stoljeća kada su izmjerene visoke koncentracije radona u kućama, usporedive s onima u rudnicima uranija. Na koncentraciju radona u zatvorenima prostorijama i objektima najviše utječe tlo nad kojim su objekti sagrađeni. Također utjecaj ima i građevinski materijal od kojeg je objekt izgrađen i voda iz vodovoda.

Radon je jedan od glavnih uzročnika pojave karcinoma pluća jer udisanjem aerosola s kojima je vezan, dolazi do njegova alfa raspada, a samim time i razaranja plućnog tkiva. Osim što je uzročnik pojave karcinoma pluća (inhalacijom), može uzrokovati i rak želuca (ingestijom). Naime, topiv je u vodi, te ga pijući vodu unosimo u naš organizam što može uzrokovati razne bolesti unutarnjih organa.

U ovom radu provedeno je istraživanje koncentracije radona u prirodnim mineralnim vodama koje su dostupne na hrvatskom tržištu dvjema metodama: tekućinskim scintilacijskim detektorom TriCarb 2900 i uređajem AlphaGUARD. Naime, kako korištenje vode u kojoj su prisutne visoke koncentracije radona može uzrokovati razne maligne bolesti unutarnjih organa, važno ih je pratiti i proučavati. Nadalje, izračunate su primljene godišnje efektivne doze zračenja pijenjem takve vode, te su dobivene vrijednosti uspoređene s vrijednostima primljene doze zračenja inhalacijom radona i ingestijom vode iz gradskog vodovoda.

1. RADIOAKTIVNOST

Pojava u prirodi pri kojoj dolazi do raspada nestabilne jezgre nekog atoma emitiranjem energije u obliku ionizirajućeg zračenja što dovodi do promjene u strukturi atomske jezgre naziva se radioaktivni raspad ili radioaktivnost.

Otkriću radioaktivnosti, prethodilo je otkriće rendgenskih zraka isprva nazvanih X-zrake. Wilhelm Conrad Röntgen 1895. godine otkriva X-zrake izvođenjem pokusa s katodnim zrakama u Crooksovoj cijevi pri čemu je opazio svjetlucanje fluorescentnog zastora. Otkriva kako se X-zrake šire pravocrtno, prolazeći kroz materiju izazivaju fluorescenciju te kako se ne otklanjaju u magnetskom polju. Navedena otkrića objedinjuje u radu "O jednoj novoj vrsti zraka".

Vođen radom Röntgena, 1896. godine, Antoine Henri Becquerel isprva je pretpostavio kako je sjaj minerala koji je izložen jakom svjetlu povezan s rendgenskim zrakama. Svoju pretpostavku pokušao je dokazati radom sa soli kalijev-uranil-sulfat koju je postavio na fotografsku ploču, te ju izložio sunčevu svjetlu. Nakon što je razvio fotografsku ploču, vidio je jasan otisak soli, čime je smatrao kako je potvrdio početnu pretpostavku, te je svoj rad želio prikazati Pariškoj akademiji uz jednako provođenje navedenog eksperimenta. Vrijeme mu pak tih dana nije išlo u prilog. Naime, bilo je oblačno te je sol omotao tamnom tkaninom i zajedno ju s fotografskom pločom, spremio dok ne dođe sunčano vrijeme. Začuđujuće, nakon nekoliko dana shvatio je kako je fotografska ploča pocrnjela iako sol nije bila izložena sunčevu svjetlu. Time je zaključio kako sol emitira zrake posebnih svojstava koje je isprva nazvao "uranijeve zrake", a nakon toga postale su poznate i kao "Becquerelove zrake".

Potaknuti Becquerelovim radom i otkrićem, 1897. godine Marie i Pierre Curie počeli su provoditi istraživanja s mineralima koji zrače. Iako radeći u lošim uvjetima, Marie je istraživanjem pokazala kako torij također emitira "Becquerelove zrake". Takvo ponašanje minerala nazvala je radioaktivnost.

Istraživanjem uranijeva smolinca, Marie Curie je otkrila kako postoje neki neotkriveni elementi koji mu daju veliku radioaktivnost. Daljnjom preradom i proučavanjem uranijeva smolinca, bračni par Curie otkrio je dva, do tada, neotkrivena elementa. Jedan od elemenata nazvali su polonij prema Marieinoj domovini (Poljska), a drugi radij prema latinskoj riječi za zraku - radius. Već 1903. godine Becquerel i bračni par Curie dobivaju Nobelovu nagradu za fiziku za ova otkrića.

Nadalje, veliku ulogu u razvoju radioaktivnosti imao je i Ernest Rutherford. Naime, istraživanjem "Becquerelovih zraka" uočio je kako se one sastoje od dviju komponenti. Komponentu koja se lako apsorbira nazvao je alfa zrake, a komponentu koja bolje prodire u tvari nazvao je beta zrake. Paul Villard pak, otkriva treću vrstu zraka - gama zrake koje su prodornije od alfa i beta zraka, a u odnosu na rendgenske zrake viših energija. Rutherford je u suradnji sa Soddyjem objasnio kako se jedan kemijski element pretvara u drugi uz emitiranje alfa ili beta čestica, te su formulirali zakon radioaktivnog raspada.

U povijesti razvoja radioaktivnosti, veliku ulogu imala je i kćer bračnog para Curie, Irene Joliot Curie. Naime, ona je zajedno sa suprugom Fredericom Joliotom 1935. godine otkrila umjetnu radioaktivnost na način da su bombardirali aluminij alfa česticama, dobivajući pri tome izotop fosfora koji se dalje radioaktivno raspadao. Za ovo otkriće, dobili su Nobelovu nagradu za kemiju.

1.1. VRSTE RADIOAKTIVNOG RASPADA

Kroz povijest, kao što je već i navedeno, otkriveno je tri vrste radioaktivnih raspada, a to su alfa (α), beta (β) i gama (γ) raspad. Pri α i β raspadu dolazi do pretvaranja jednog kemijskog elementa u drugi pri čemu jezgra emitira α ili β česticu kako bi prešla u stabilnije stanje. Kod γ raspada, ne dolazi do pretvorbe kemijskog elementa, već jezgra emitira energiju kako bi iz pobuđenog stanja prešla u stabilnije stanje.

1.1.1. α RASPAD

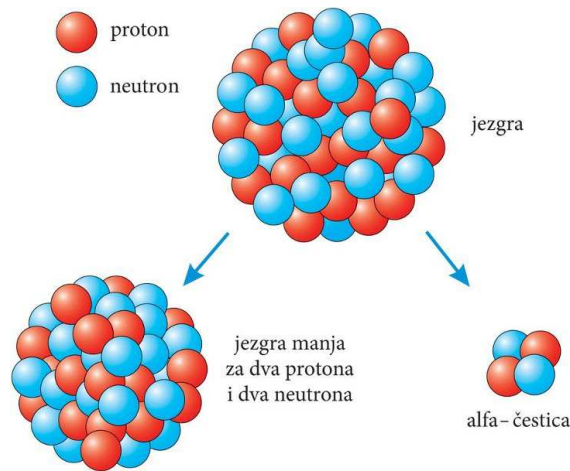
α raspad (Slika 1.) karakterističan je za jezgre koje su prevelike da bi bile stabilne. Kod takvih jezgara dolazi do emitiranja α čestica koje su zapravo jezgre helija i sadrže dva protona i dva neutrona, te odnose veliki dio energije prvotno nestabilne jezgre. Nakon raspada, nastaje nova atomska jezgra čiji je atomski broj umanjen za dva, a nukleonski za četiri u odnosu na jezgru koja se raspala.

Proces α raspada možemo zapisati kao:



odnosno kao:





Slika 1. Prikaz α raspada.

Primjer α raspada je:



pri čemu je ${}_{86}^{222}\text{Rn}$ radioaktivni plin o kojemu će biti riječi u daljnjem radu.

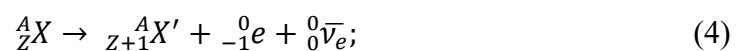
Alfa zračenje ima linijski energijski spektar. Iako alfa čestice imaju točno određenu energiju (uglavnom između 4-10 MeV), zbog svoje velike mase i dva protona od kojih su građene, vrlo jako međudjeluju sa tvari kroz koju prolaze, pa im je domet u zraku vrlo mali (tek nekoliko cm). Zbog izrazito malog doseg, ovo zračenje primljeno izvana nije opasno za čovjeka jer ga već koža zaustavi, no opasno je ukoliko uđe u organizam osobe. Naime, tada dolazi do razarajućeg djelovanja u tkivima organa zbog velikih energija α čestica.

1.1.2. β RASPAD

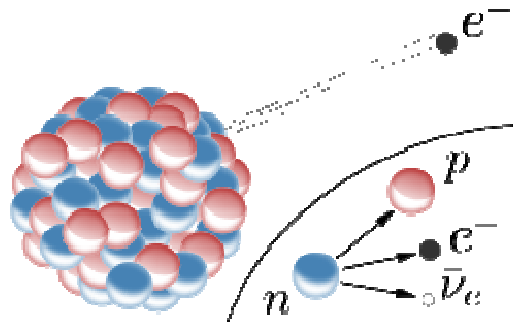
β raspad obuhvaća tri tipa raspada: β^- raspad, β^+ raspad i elektronski uhvat.

β^- raspad (Slika 2.) karakterističan je za jezgre koje imaju višak neutrona. Iz tog razloga, kod takve jezgre, neutron se pretvara u proton, a nastaje β^- čestica (elektron) i antineutrino. Nakon raspada, nastaje nova atomska jezgra čiji je atomski broj uvećan za jedan, no nukleonski broj ostaje jednak kao kod jezgre koja se raspala.

Proces β^- raspada možemo zapisati kao:



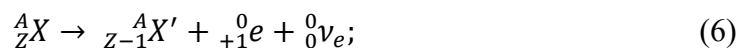
odnosno kao:



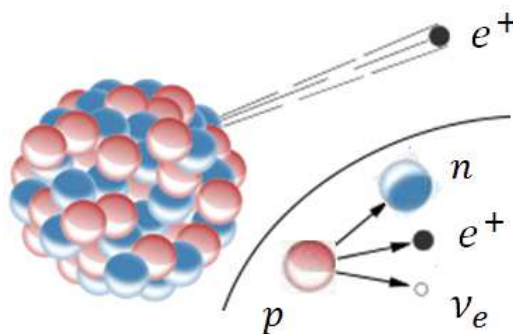
Slika 2. Prikaz β^{-} raspada.

β^{-} raspad (Slika 3.) je karakterističan za jezgre koje imaju manjak neutrona. Kod takvih jezgara, proton se raspada na neutron, β^{+} česticu (pozitron¹) i neutrino. Nakon raspada, nastaje nova atomska jezgra čiji je atomski broj umanjen za jedan, no nukleonski broj ostaje jednak kao kod jezgre koja se raspala.

Proces β^{+} raspada možemo zapisati kao:



odnosno kao:



Slika 3. Prikaz β^{+} raspada.

Sam naziv procesa: uhvat elektrona govori o procesu u kojem dolazi do uhvata slobodnih elektrona iz K - ljuske (najbliža jezgri). Nastaje kao posljedica slabe nuklearne sile (jedna od četiri osnovne sile u prirodi) kada proton u jezgri privlači slobodni elektron, te zajedno tvore neutron.

¹ Pozitron je antičestica elektrona koja ima jednaku masu, ali suprotni naboj naspram elektrona.

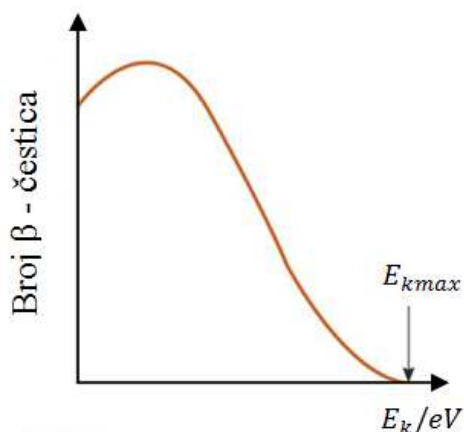
Proces uhvata elektrona možemo zapisati kao:



odnosno kao:



Kod β raspada, β čestice poprimaju bilo koju kinetičku energiju od 0 eV do neke maksimalne vrijednosti (Slika 4.).



Slika 4. Kontinuirani spektar beta raspada.

Upravo je zbog kontinuirane energije koju β čestice mogu poprimiti, otkrivena još jedna vrsta čestica, neutrino, čije je postojanje predvidio Wolfgang Pauli, koja se označava s ν i odnosi "višak" energije, te tako ostaje očuvana energija. Antičestica neutrino je antineutrino. Neutrino i antineutrino su čestice bez naboja i gotovo bez mase, te iz tog razloga slabo međudjeluju s materijom.

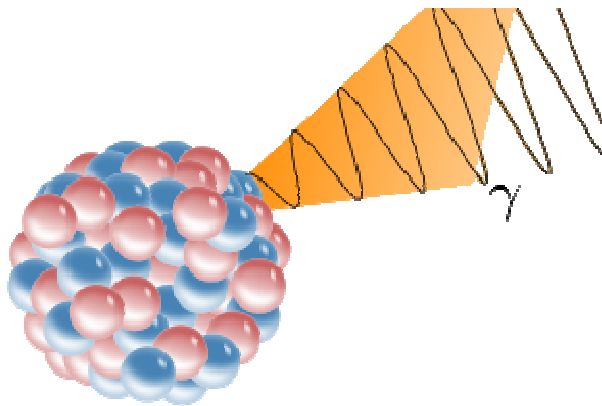
Ovisno o energiji β čestica, toliki će biti i njihov doseg u zraku. Za razliku od α čestica, β čestice su prodornije te ih sloj aluminija. Unatoč tome, β čestice u odnosu na α čestice nisu toliko razorne zbog manjih energija.

1.1.3. γ RASPAD

Kada kažemo γ raspad, ne smatramo ga u smislu riječi raspad kao što je α raspad ili β raspad. Naime, kod γ raspada ne dolazi do promjene niti atomskog niti nukleonskog broja što znači da se ne dolazi do promjene strukture jezgre.

Gama zračenje (Slika 5.) nije ništa drugo nego elektromagnetsko zračenje. Vrlo često pri α ili β raspadu jezgre, jezgra ostaje u pobuđenom stanju. Prilikom prijelaza jezgre koja se nalazi u pobuđenom stanju u stabilnije stanje, jezgra emitira γ zračenje, odnosno čistu energiju. Ta energija jednaka je razlici između konačnog i početnog energetskeg stanja u kojim se jezgra nalazila.

Proces γ raspada možemo zapisati kao:



Slika 5. Prikaz γ raspada.

Kako su poluživoti γ raspada vrlo kratki (vrlo često i kraći od $10^{-9}s$), za gama zračenje možemo reći da se ono emitira gotovo trenutno po raspadu. Ipak, postoji jedan dio raspada kod kojih radioaktivni potomci ostaju u metastabilnom² stanju kod kojih γ raspadi imaju duži poluživot (od nekoliko sati ili dana).

Gama zračenje nosi vrlo velike energije koje su i milijun puta veće od fotona vidljivog dijela spektra. Upravo zbog toga, oni su vrlo prodorni (prodorniji od α i β zračenja), te prolazom kroz materiju i sudarima s elektronima u omotaču atoma, predaju joj energiju pri čemu djeluju razorno. Gama zračenje može proći velike udaljenosti, a najbolje ga apsorbiraju materijali koji imaju veliki atomski broj i veliku gustoću poput olova.

1.2. ZAKON RADIOAKTIVNOG RASPADA

Raspad nestabilnih jezgara je statističke prirode i ne može se predvidjeti. Ipak moguće je odrediti broj jezgara koje će se raspasti u nekom vremenu t .

² Metastabilna ili izomerna stanja označavamo kao: ${}^AX^m$ ili ${}^{Am}X$.

Naime, eksperimenti su pokazali da je broj nestabilnih (radioaktivnih) jezgri koje se raspadnu u vremenu t , ukoliko ne dodajemo nove jezgre u uzorak, proporcionalan broju jezgri na početku i razlikuje se za svaku vrstu radionuklida. Dakle, brzina raspada jezgri $\frac{dN}{dt}$ proporcionalna je broju neraspadnutih jezgri N , pri čemu je konstanta proporcionalnosti λ , konstanta raspada karakteristična za svaki radioaktivni nuklid. To možemo zapisati na sljedeći način:

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

pri čemu predznak minus pokazuje kako se broj jezgri smanjuje.

Zapišemo li izraz (11) kao:

$$\frac{dN}{N} = -\lambda dt; \quad (12)$$

te ga integriramo:

$$\int \frac{dN}{N} = -\lambda \int dt; \quad (13)$$

dobivamo:

$$\ln N = -\lambda t + C; \quad (14)$$

Uvrstimo li početne uvjete u (14): $t = 0$ i $N = N_0$, možemo dobiti konstantu C :

$$\ln N_0 = \lambda \cdot 0 + C; \quad (15)$$

iz čega slijedi:

$$C = \ln N_0 \quad (16)$$

Uvrstimo li (16) u (14), dobivamo:

$$\ln N = -\lambda t + \ln N_0 \quad (17)$$

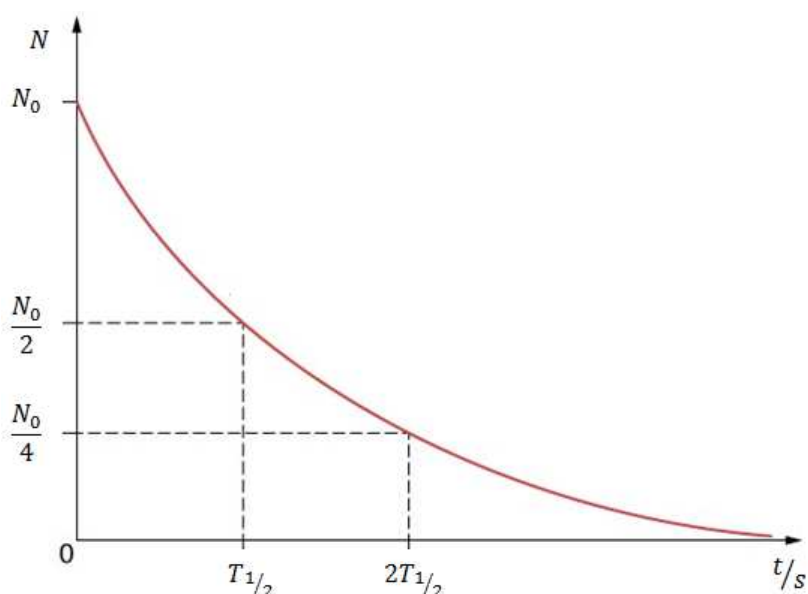
Sređivanjem izraza (17) dobivamo:

$$\ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t, \quad (18)$$

odnosno:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (19)$$

pri čemu je N_0 početni broj jezgri u trenutku $t = 0$ (Slika 6.).



Slika 6. Grafički prikaz radioaktivnog raspada: $N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$.

Uz zakon radioaktivnog raspada, valja definirati i vrijeme poluraspada. Vrijeme poluraspada $T_{1/2}$ je vrijeme potrebno da se početni broj radioaktivnih jezgri raspadne za polovicu. Što možemo zapisati kao:

$$N = \frac{N_0}{2} \quad (20)$$

Ukoliko izraz (20) uvrstimo u (19), dobivamo:

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}} \quad (21)$$

Sređivanjem izraza (21), dobivamo izraz za vrijeme poluraspada:

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda} \quad (22)$$

Nadalje, definiramo aktivnost radioaktivnog uzorka kao mjeru pojave raspada u uzorku, odnosno kao broj raspada koji se dogodi u jedinici vremena:

$$A(t) = \lambda N(t) = A_0 \cdot e^{-\lambda t}; \quad (23)$$

u izrazu (13) A_0 predstavlja početnu aktivnost u vremenu $t = 0$, odnosno $A_0 = \lambda N_0$.

Mjerna jedinica u SI sustavu za aktivnost je *bekereel* (Bq) i ona označava jedan raspad u sekundi. Osim ove mjerne jedinice, još se koristi i mjerna jedinica *kiri* (Ci) koja je u početku bila definirana kao aktivnost jednog grama radija, a danas se definira na sljedeći način:

$$1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}.$$

2. DOZIMETRIJA

Interakcijom radioaktivnog zračenja i živog organizma, živi organizam apsorbira energiju zračenja što izaziva razne kemijske i biološke promjene. Kako bismo proučili utjecaj zračenja na žive organizme, točnije na ljudsko tkivo, potrebno je objasniti nekoliko veličina koje u obzir uzimaju i vrstu zračenja.

2.1. DOZIMETRIJSKE VELIČINE I NJIHOVE MJERNE JEDINICE

Dakle, samo onaj dio energije zračenja koji neko tkivo apsorbira, uzrokuje promjene u njemu.

Apsorbirana doza ionizirajućeg zračenja je fizikalna veličina koja se definira kao omjer između srednje energije $d\bar{\epsilon}$ koja je predana ionizirajućim zračenjem u nekom elementu tvari volumena V i mase dm tog volumena, a označava se s D :

$$D = \frac{d\bar{\epsilon}}{dm} \quad (24)$$

Ona pokazuje kolika je količina energije zračenja apsorbirana po jedinici mase neke tvari. Mjerna jedinica apsorbirane doze u SI sustavu je *gray* (Gy). Dakle, apsorbirana doza ionizirajućeg zračenja je 1 Gy ukoliko je tijelu mase 1 kg ionizirajuće zračenje predalo energiju od 1 J. Stara jedinica apsorbirane doze je *rad* (radiation absorbed dose) koja je jednaka:

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

Relativnu biološku učinkovitost (RBE) koristimo kako bi odredili utjecaj pojedine vrste zračenja na ljudsko tkivo, a određuje se kao omjer doze neke vrste zračenja i doze rendgenskog zračenja koje uzrokuje jednake biološke učinke.

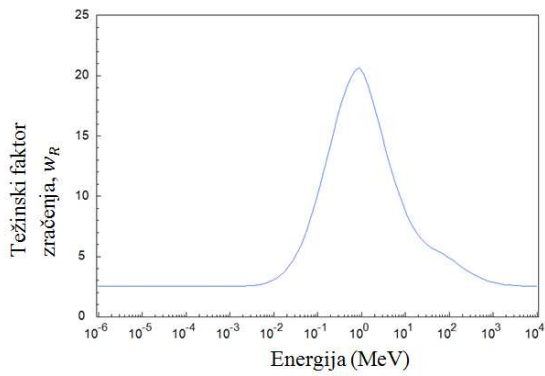
Nadalje, težinska doza zračenja ili ekvivalentna doza koju označavamo kao H_T , predstavlja sumu svih srednjih apsorbiranih doza koje su potekle od zračenja R u nekom tkivu ili organu T pomnoženih s težinskim faktorima zračenja w_R :

$$H_T = \sum_R w_R \cdot D_{T,R} \quad (25)$$

Mjerna jedinica za ekvivalentnu dozu je *sievert* (Sv) kada je apsorbirana doza izražena u Gy. U prošlosti se koristila mjerna jedinica *rem* (roentgen equivalent man) ukoliko je apsorbirana doza izražena u radima. Težinski faktor se pak određuje iz energije koju pojedina

vrsta zračenja prenese po jedinici dužine. U Tablici 1. možemo vidjeti težinske faktore zračenja.

Tablica 1. Težinski faktori zračenja prema ICRP 2007.

| Vrste i energije zračenja | Težinski faktori zračenja, w_R |
|--|---|
| Fotoni | 1 |
| Elektroni i muoni | 1 |
| Protoni i nabijeni pioni | 2 |
| α čestice, fisijski produkti, teže jezgre | 20 |
| Neutroni | Kontinuirana krivulja kao funkcija energije neutrona  |

Kako na različita tkiva zračenje različito reagira, a ekvivalentna doza to ne uzima u obzir, uvodi se još i težinski faktor tkiva koji pokazuje mogući rizik od nastanka bolesti ili karcinoma. Težinski faktor tkiva omogućava definiranje nove dozimetrijske veličine, a ona jest efektivna doza.

Efektivna doza predstavlja sumu težinskih doza zračenja H_T u svim tkivima i organima T koje su pomnožene s težinskim faktorima tkiva w_T , a označava se s E . Računamo ju na sljedeći način:

$$E = \sum_T w_T \cdot H_T = \sum_T w_T \sum_R w_R D_{T,R} \quad (26)$$

Mjerna jedinica efektivne doze u SI sustavu je *sievert* (Sv). U Tablici 2. navedeni su težinski faktori tkiva.

Čovjek je tijekom svog života izložen prirodnoj radioaktivnosti. Prosječna efektivna doza koju primi svaki stanovnik Zemlje iznosi 2,4 mSv godišnje, no raspon efektivne doze koji pojedinac primi je vrlo velik. Prema podacima UNSCEAR-a iz 2000. godine, za oko 65% stanovništva se očekuju vrijednosti primljene efektivne doze od 1 do 3 mSv, za oko 25% stanovništva manje od 1 mSv, a za 10% stanovništva se očekuje primljena efektivna doza od preko 3 mSv.

Tablica 2. Težinski faktori tkiva prema ICRP 1977., 1991. i 2006. godine.

| 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 |

2.2. EFEKTIVNA DOZA RADONA PRIMLJENA INGESTIJOM

Kako bismo odredili primljenu efektivnu dozu pijenjem vode, koristit ćemo se sljedećom jednadžbom:

$$E = K \cdot C \cdot KM \cdot T \quad (27)$$

gdje E označava primljenu godišnju efektivnu dozu, K je konverzijski faktor, KM godišnja količina ispijene vode, C je koncentracija radona, a T je vrijeme (godina dana).

3. RADIOAKTIVNOST NA ZEMLJI

Nestabilna jezgra koja se radioaktivno raspada nazivamo jezgra roditelj. Jezgre koje nastaju radioaktivnim raspadom jezgre roditelja, nazivamo jezgre potomci ili jezgre kćeri. Nadalje i potomci se dalje mogu radioaktivno raspadati, te se tvore nizovi elemenata koji se raspadaju sve dok jezgra potomak nije stabilna jezgra.

Na Zemlji postoje četiri takva glavna raspadna niza koja započinju teškim elementima koji se raspadaju α ili β raspadom. Razlikujemo četiri niza s nukleonskim brojevima $4n$, $4n + 1$, $4n + 2$ i $4n + 3$ s obzirom da se α raspadom nukleonski broj jezgre smanjuje za četiri. U tablici 3. navedena su četiri glavna raspadna radioaktivna niza.

Tablica 3. Četiri glavna raspadna radioaktivna niza.

| Ime niza | Vrsta | Konačna stabilna jezgra | Najduže živući član | |
|------------|--------|-------------------------|---------------------|---------------------------|
| | | | Jezgra | Vrijeme poluraspada / god |
| Torijev | $4n$ | $^{208}_{82}Pb$ | $^{232}_{90}Th$ | $1,41 \cdot 10^{10}$ |
| Neptunijev | $4n+1$ | $^{209}_{83}Bi$ | $^{237}_{93}Np$ | $2,14 \cdot 10^6$ |
| Uranijev | $4n+2$ | $^{206}_{82}Pb$ | $^{238}_{92}U$ | $4,47 \cdot 10^9$ |
| Aktinijev | $4n+3$ | $^{207}_{82}Pb$ | $^{235}_{92}U$ | $7,04 \cdot 10^8$ |

4. RADON

Njemački fizičar Friedrich Ernst Dorn otkrio je radon 1900. godine. Nakon uranija, polonija, radija i torija, to je bio peti otkriveni radioaktivni element. Nastaje α raspadom radija ${}^{226}_{88}\text{Ra}$ pa je po njemu i dobio ime.

4.1. FIZIKALNE I KEMIJSKE KARAKTERISTIKE RADONA

Radon (${}^{222}_{86}\text{Rn}$) je prirodni, plemeniti, radioaktivni plin, bez boje, okusa i mirisa. Najteži je plemeniti plin i pri sobnoj temperaturi čak osam puta gušći od zraka. Kako ima stabilnu elektronsku konfiguraciju, vrlo je inertan, no može stupati u reakcije s fluorom. Vrelište radona je pri -71°C , a talište pri -62°C .

Tri su radioaktivna izotopa radona: ${}^{222}_{86}\text{Rn}$, ${}^{220}_{86}\text{Rn}$, ${}^{219}_{86}\text{Rn}$ koji postoje u prirodi, a nastaju kao međuproizvodi radioaktivnim raspadom uranija, torija i aktinija. Od ova tri izotopa, nama je najvažniji ${}^{222}_{86}\text{Rn}$ zbog svog, relativno velikog, vremena poluraspada od $T_{1/2} = 3,825$ dana i upravo na njega pomislimo kada kažemo radon. ${}^{222}_{86}\text{Rn}$ nastaje α raspadom ${}^{226}_{88}\text{Ra}$ i pripada uranijevom raspadnom nizu. Kako je ${}^{222}_{86}\text{Rn}$ radioaktivan, on se dalje raspada i nastaju četiri kratkoživača potomka: ${}^{218}_{84}\text{Po}$, ${}^{214}_{82}\text{Pb}$, ${}^{214}_{83}\text{Bi}$ i ${}^{214}_{84}\text{Po}$ od kojih su ${}^{218}_{84}\text{Po}$ i ${}^{214}_{84}\text{Po}$ α emiteri, a ${}^{214}_{82}\text{Pb}$, ${}^{214}_{83}\text{Bi}$ β i γ emiteri. Kao takvi, predstavljaju veliku opasnost za nastanak i razvoj karcinoma pluća zbog relativno kratkog vremena poluraspada.

Još jedan izotop radona je ${}^{220}_{86}\text{Rn}$ koji je poznat po svom nazivu toron jer pripada torijevom raspadnom nizu. Kako je vrijeme poluraspada torona relativno kratko i iznosi: $T_{1/2} = 55,6$ s, prelazi kraće udaljenosti u odnosu na ${}^{222}_{86}\text{Rn}$, te je njegov utjecaj gotovo zanemariv. Njegovim raspadom nastaju četiri kratkoživača potomka: ${}^{216}_{84}\text{Po}$, ${}^{212}_{82}\text{Pb}$, ${}^{212}_{83}\text{Bi}$ i ${}^{212}_{84}\text{Po}$.

Aktinon je treći izotop radona, ${}^{219}_{86}\text{Rn}$ koji je dobio ime jer pripada aktinijevom raspadnom nizu. Zbog svog vrlo kratkog vremena poluraspada koje iznosi $T_{1/2} = 3,9$ s većinom nije predmet istraživanja.

U Tablici 4. navedena su vremena poluraspada izotopa radona i njihovih potomaka, ali i energije raspada za svaku vrstu zračenja.

Tablica 4. Vremena poluraspada izotopa radona i pripadajućih potomaka, te energije raspada za pojedinu vrstu zračenja.

| Jezgra | Vrijeme poluraspada | Vrste zračenja i energije (MeV) | | |
|------------------------|---------------------|---------------------------------|------------------------|------------------------|
| | | α | β | γ |
| Radon | | | | |
| $^{222}_{86}\text{Rn}$ | 3,825 d | 5,4897 | | |
| $^{218}_{84}\text{Po}$ | 3,05 min | 6,0026 | | |
| $^{214}_{82}\text{Pb}$ | 26,8 min | | 0,67; 0,73 | 0,2952; 0,3520 |
| $^{214}_{83}\text{Bi}$ | 19,7 min | | 1,51; 1,54; 3,17; 3,27 | 0,6094; 1,1204; 1,7645 |
| $^{214}_{84}\text{Po}$ | 163,7 μs | 7,6869 | | |
| $^{210}_{82}\text{Pb}$ | 22,3 god | | 0,017; 0,061 | |
| $^{210}_{83}\text{Bi}$ | 5,013 d | | 1,161 | |
| $^{210}_{84}\text{Po}$ | 138,38 d | 5,3044 | | |
| Toron | | | | |
| $^{220}_{86}\text{Rn}$ | 55,6 | 6,2883 | | |
| $^{216}_{84}\text{Po}$ | 150 ms | 6,7785 | | |
| $^{212}_{82}\text{Pb}$ | 10,64 h | | 0,331; 0,569 | 0,2386; 0,3001 |
| $^{212}_{83}\text{Bi}$ | 60,6 min | 6,0510; 6,0901 | 2,251 | 0,7271 |
| $^{212}_{84}\text{Po}$ | 0,298 μs | 8,7844 | | |
| $^{208}_{81}\text{Tl}$ | 3,053 min | | 1,796; 1,280; 1,520 | 0,5106; 0,5831; 2,6146 |
| Aktinon | | | | |
| $^{219}_{86}\text{Rn}$ | 3,96 s | 6,4250; 6,5531; 6,8193 | | 0,2711; 0,4017 |
| $^{215}_{84}\text{Po}$ | 1,78 ms | 7,3136 | | |
| $^{211}_{82}\text{Pb}$ | 36,1 min | | 1,38 | 0,4049; 0,4270; 0,8319 |
| $^{211}_{83}\text{Bi}$ | 2,14 min | 6,279; 6,623 | | |
| $^{207}_{81}\text{Tl}$ | 4,77 min | | 1,43 | 0,8972 |

4.2. RADON U TLU I VODI

Raspadom uranija nastaje radioaktivni radij čijim raspadom nastaje radioaktivni plin radon. Koliko se radona nalazi u tlu, ovisi o raspodjeli i količini uranija u stijenkama i tlu. Tako uranij možemo naći u sastavu minerala poput kofinita i uranitita čijom erozijom dolazi do otpuštanja uranija. Različita raspodjela uranija u različitim vrstama tla, a samim time i

njegovih potomaka (nama važan radon) upravo ovisi o tome kako će se erozijom stvorena zrnca minerala povezati. Tako mekana zrnca koja su u dodiru s vodom stvaraju čestice gline, a čvršća zrnca se povezuju u pješčane dijelove.

Tablica 5. Koncentracije radona [3].

| Lokacija | Koncentracija (atom cm-3) |
|---------------------------------------|---------------------------|
| Zrak iznad oceana | 0,04 |
| Zrak neposredno iznad površine zemlje | 4 |
| Tipična kuća | 20 |
| Plin u zemlji | 20 000 |
| Unutrašnjost tipičnog minerala | 500 000 |

U zatvorene prostorije, radon ulazi uglavnom iz tla koji se nalaze ispod građevinskih objekata, ali isto tako može potjecati i iz građevinskih materijala, prirodnog plina ili pak iz vode koja se koristi u kućanstvu. Velike koncentracije radona u zatvorenim prostorijama potječu ipak najčešće iz tla (ovisno je li tlo velike permeabilnosti poput krasa ili pjeskovitog tla, odnosno manje permeabilnosti poput glinovitog tla).

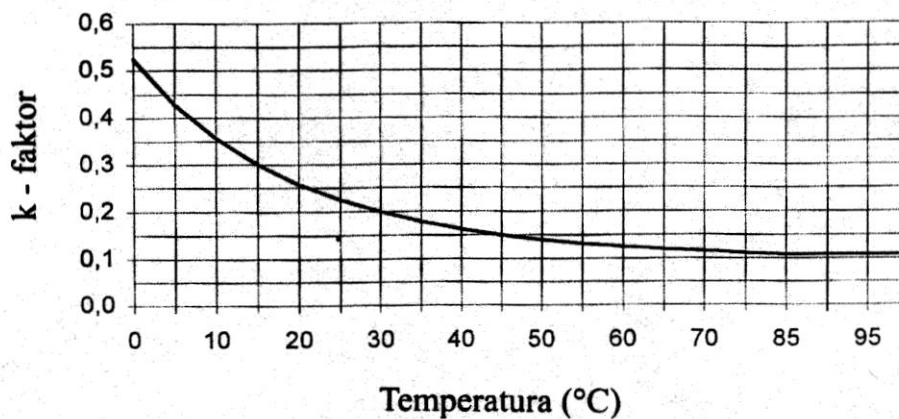
Za ovaj rad, važno nam je bilo proučavanje radona u vodi. U zatvorenim prostorijama, koncentracija radona može se znatno povećati njegovim oslobađanjem iz vode koja dolazi iz podzemnih izvora. Vrlo su male koncentracije radona u površinskim vodama, te one neznatno utječu na povećanje koncentracija u prostorijama. Nasuprot njima, u podzemnim vodama se nakuplja radon oslobođen iz tla, te tako one nose velike koncentracije radona. Upotreba takvih voda, primjerice pri pranju rublja, tuširanju gdje dolazi do uzburkavanja vode dovodi do oslobađanja radona iz vode, što može znatno povećati njegovu koncentraciju u prostorijama. Uz to, važno je napomenuti kako korištenje takvih voda za piće može utjecati na organe, jer se otopljeni radon u vodi raspada, te nastaju njegovi kratkoživući potomci. Isto tako, prilikom konzumiranja takvih voda na samom izvoru, može doći do unošenja radona putem ingestije³, ali i inhalacije⁴.

Radon u plinovitom stanju srednje je topiv u vodi, te tako djelovanjem Van der Waalsovih sila stvara metastabilne strukture, klatrate ($Rn \cdot 6H_2O$). Kod takvih struktura,

³ Unos radona ingestijom - pijući vodu.

⁴ Unos radona inhalacijom - udisajući pare koje nastaju isparavanjem vode koja je bogata radonom.

radon je polariziran zbog djelovanja jakog dipolnog momenta vode. Koliko će radona biti otopljeno u vodi, ovisit će o pH-vrijednosti i o temperaturi vode. Naime, pH-vrijednosti iznad 7, razorit će klatrate, te će se tako osloboditi radon u svoju plinovitu fazu. Na Slici 7. prikazana je ovisnost k-faktora o temperaturi. k-faktor predstavlja omjer radona otopljenog u vodi i u plinovitoj fazi.



Slika 7. Ovisnost k-faktora o temperaturi.

Transfer⁵ faktorom kojeg označavamo sa T , prikazuje se kako se mijenja koncentracija radona u prostoriji u kojoj se koristi voda. Tako se pomoću omjera između $\overline{\Delta c_z}$ koji označava prosječan prirast koncentracije radona u prostoriji prilikom korištenja vode, te $\overline{c_v}$ koji označava prosječnu koncentraciju radona u vodi može odrediti transfer faktor kao:

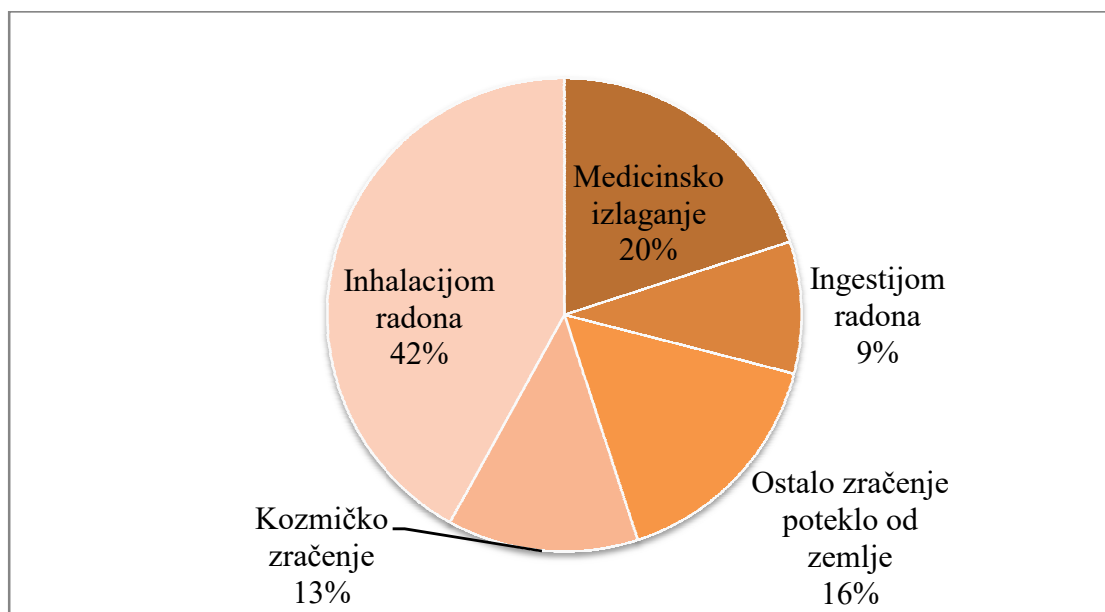
$$T = \frac{\overline{\Delta c_z}}{\overline{c_v}} \quad (28)$$

pri čemu je $\Delta c_z = c_{z,k} - c_{z,p}$. Istraživanja su pokazala kako je vrijednost transfer faktora od 10^{-4} [2].

4.3. OPASNOST ZA ZDRAVLJE

Više od 50% zračenja koje potječe iz prirodnih izvora odnosi se upravo na radon [1]. Kako se nakuplja u zatvorenim prostorijama, povećane koncentracije mogu uzrokovati pojavu različitih bolesti i karcinoma. Tako radon u tijelo može biti unesen ingestijom ili inhalacijom što je prethodno i opisano.

⁵ Vrijednost transfer faktora je 10^{-4} što su pokazala eksperimentalna istraživanja [2].



Slika 8. Primljena godišnja doza zračenja iz različitih izvora [1].

Iako radon ima relativno kratko vrijeme poluraspada i malu vjerojatnost da će doći do raspada u plućima, udisanje zraka u kojem se nalazi visoka koncentracija radona može dovesti do toga da se radon ipak raspadne u plućima i pri tome oslobodi velike energije (α raspad) što dovodi do oštećenja tkiva. Opasniji su radonovi kratkoživući potomci: $^{218}_{84}\text{Po}$, $^{214}_{82}\text{Pb}$, $^{214}_{83}\text{Bi}$ i $^{214}_{84}\text{Po}$ koji se vežu za čestice zraka (aerosole) što može biti vrlo opasno ukoliko udisanjem dođu do pluća jer se tada ondje talože i dolazi do njihovog raspada, te oštećenja plućnog tkiva. Time vidimo kako količina zračenja primljena od radona i njegovih kratkoživućih potomaka ovisi o koncentraciji i veličini aerosola koji se nalaze u prostorijama. Zbog velike osjetljivosti bronhijalnih grana u odnosu na ostale dijelove dišnog sustava, primljene doze zračenja mogu uzrokovati promjene u stanicama te postoji mogućnosti pojave karcinoma. Naime, istraživanja su pokazala kako je 3-20% smrti koje je uzrokovao karcinom pluća, vjerojatno izazvala izloženost visokim koncentracijama radona u zatvorenim prostorijama [3]. Iz tog razloga, važno je redovito provjetravati prostorije u kojima se boravi, a u područjima vrlo visokih koncentracija radona preporuča se i ugradnja ventilacijskih odvoda kako bi se one smanjile.

Još jedan od načina kojim radon ulazi u organe i krvotok je konzumacija vode. Naime, konzumacijom vode, radon koji se još uvijek nije oslobodio u zrak, završava u želudcu iz kojega se širi dalje kroz krvotok. Kao i u plućima, dolazi do njegova raspada kao i raspada njegovih potomaka što dovodi do oštećenja stanica.

Upravo se konverzijskim faktorom⁶ od $0,35 \cdot 10^{-8}$ Sv/Bq može izračunati primljena efektivna doza uslijed konzumacije vode u kojoj se nalazi radon. U ovom slučaju, pretpostavka je da dojenčad, djeca i odrasli popiju redom 100 l, 75 l, te 50 l vode godišnje.

Vjerojatnost nastanka karcinoma kod osobe izložene zračenju je $1,65 \cdot 10^{-2}$, no kako su pluća uglavnom najviše pogođena to se odnosi na vjerojatnost nastanka karcinoma pluća. Rizik koji se odnosi na mogućnost oboljenja od karcinoma pluća povećava se za 0,1% za svakog pojedinca koji je izložen zračenju od 1mSv/ godišnje nastalim od radona i njegovih potomaka. U zatvorenim prostorima europskih i sjevernoameričkih zemalja, prosječne koncentracije radona se kreću od 20 do 60 Bq/m³, dok u Republici Hrvatskoj iznose oko 70 Bq/m³ [4]. Takve koncentracije dakle, povećavaju rizik oboljenja pojedinaca od karcinoma pluća od 0,1 do 0,5% [5].

⁶ Konverzijski faktor prema [3].

5. PRIRODNE MINERALNE VODE U HRVATSKOJ

Prema Pravilniku o prirodnim mineralnim, prirodnim izvorskim i stolnim vodama koje izdaje Ministarstvo poljoprivrede (NN 48/2015), Članku 7. prirodne mineralne vode definiraju se kao vode koje zadovoljavaju propisane mikrobiološke kriterije koji su propisani člancima 13., 14. i 15. iz navedenog Pravilnika. Prirodne mineralne vode uzimaju se i pune iz izvora. Razlikuju se od voda za potrošnju prema sadržaju i količini određenih mineralnih tvari, elementima u tragovima ili drugih tvari, prema određenim fiziološkim učincima kao i prema izvornoj čistoći. Ova svojstva su očuvana zbog podzemnog podrijetla prirodne mineralne vode koje je zaštićeno od svih rizika onečišćenja. Dok su prirodne izvorske vode, prema Članku 29., vode namijenjene konzumaciji u svojem prirodnom stanju.

Prema Članku 10., prirodna mineralna voda može biti podvrgnuta obradi samo ukoliko je potrebno odvojiti nestabilne elemente poput spojeva željeza, mangana, sumpora, fluorida ali na takav način da je obrada u skladu s uvjetima korištenja koje je utvrdila Europska komisija, te da ne dolazi do mijenjanja sastava vode (anioni i kationi). Također, zabranjen je postupak dezinfekcije [6].

Prema količini ugljikova dioksida, prirodna mineralna voda dijeli se na: Prirodno gaziranu mineralnu vodu koja ima jednak udio CO₂ kao što je i CO₂ na izvoru, Prirodnu mineralnu vodu s povećanom količinom ugljikovog dioksida iz izvora koja ima veći udio CO₂ nego na izvoru punjenja, te Gaziranu prirodnu mineralnu vodu kojoj je dodan CO₂ koji nije podrijetlom iz izvora s kojeg potječe voda.

Kako bi se prirodna mineralna voda našla na Popisu priznatih mineralnih voda, prema Članku 21., potrebno je dostaviti Ministarstvu analitičko izvješće o provedenim fizikalnim, kemijskim i fizikalno-kemijskim te mikrobiološkim ispitivanjima nakon čega kreće postupak priznavanja. Na stranicama Ministarstva poljoprivrede može se naći popis priznatih prirodnih mineralnih voda u Republici Hrvatskoj.

5.1. POTROŠNJA FLAŠIRANE VODE U HRVATSKOJ

Hrvatska je jedna od zemalja Europske Unije, prema Eurostatu, koja ima najveće zalihe pitke vode. Podaci iz 2015. kažu da je Hrvatska proizvela 374 milijuna litara vode, od čega je 193 milijuna litara prirodne mineralne vode [7]. Za flaširanje pitke vode u Hrvatskoj "zaslužno" je nekoliko kompanija, od kojih je među najvećima Jamnica d.d. koja je dio Agrokora i Podravka d.d.

Hrvatska se, prema analizi crpljenja vode radi flaširanja koju su objavili Institut za političku ekologiju i Zelena akcija, nalazi na 12. mjestu [8] po količini popijene flaširane vode. Korištenje flaširane vode u stalnom je porastu. Stoga neki podaci kažu da u Hrvatskoj prosječno svaki stanovnik popije i do 110 litara flaširane vode [8].

6. EKSPERIMENTALNI POSTUPCI - MJERENJE RADONA U VODI

6.1. SCINTILACIJSKI DETEKTORI

Scintilacijski detektori, kao što im i sam naziv kaže, rade na principu scintilacija⁷. Ova vrsta detektora može detektirati sve vrste zračenja, odnosno alfa i beta zračenje, ali i gama zračenje.

Pri izradi scintilacijskih detektora, vrlo je važno odabrati materijal koji će biti proziran za valnu duljinu svjetlosti koja je nastala. Time se omogućava fotonima kretanje po scintilatoru sve do fotokatode fotomultiplikatora. Prilikom apsorpcije fotona, fotoni predaju energiju elektronima s fotokatode koji se kreću prema cijevi fotomultiplikatora gdje im se broj višestruko povećava.

Postoje dvije vrste scintilatora, a oni su organski i neorganski scintilatori. Danas se najviše koriste: NaI (TI), CsI (TI) i LiI (Eu). Ove neorganske scintilatore odlikuje velika gustoća, te veliki svjetlosni doprinos čime je omogućena vrlo visoka detekcijska efikasnost. Organski scintilatori mogu biti u obliku plastike ili tekućem stanju. Ovi scintilatori su vrlo dobri za detektiranje naelektriziranih čestica, no energetska rezolucija za γ zračenje im je vrlo loša.

Za potrebe ovog rada korišteni su organski scintilacijski kokteli kako bi se detektirale alfa čestice. Ovi kokteli sadržavaju male količine fluora kako bi se poboljšala detekcija zračenja.

Za početak, kod scintilacijskih koktela imamo radioaktivni materijal i scintilacijski koktel kojeg miješamo u staklenim bočicama. Scintilacijski koktel (za potrebu ovog diplomskog rada korišten je Ultima Gold XR) sastoji se od otapala (S) i scintilatora koji ima sposobnost emitiranja fluorescentne svjetlosti (F). Budući da je koncentracija molekula u otapalu S znatno veća u odnosu na molekule otapala F u koktelu, ionizirajuće zračenje će ionizirati molekule u otapalu ($S \rightarrow S^+ + e^-$ ili $S \rightarrow S^*$). Tada, ionizirane molekule u otapalu mogu "uhvatiti" slobodni elektron i time se pretvaraju u neutralne molekule ($S^+ + e^- \rightarrow S^*$) čime vrše prijenos dijela energije prema drugim molekulama u otapalu ili pak molekulama scintilatora pri čemu ne dolazi do zračenja ($S_1^* + S_2 \rightarrow S_1 + S_2^*$ ili $S_2^* + F \rightarrow S_2 + F^*$). Pobuđene molekule scintilatora (fluora) prelaze iz pobuđenih stanja u niža stanja ($F^* \rightarrow F +$

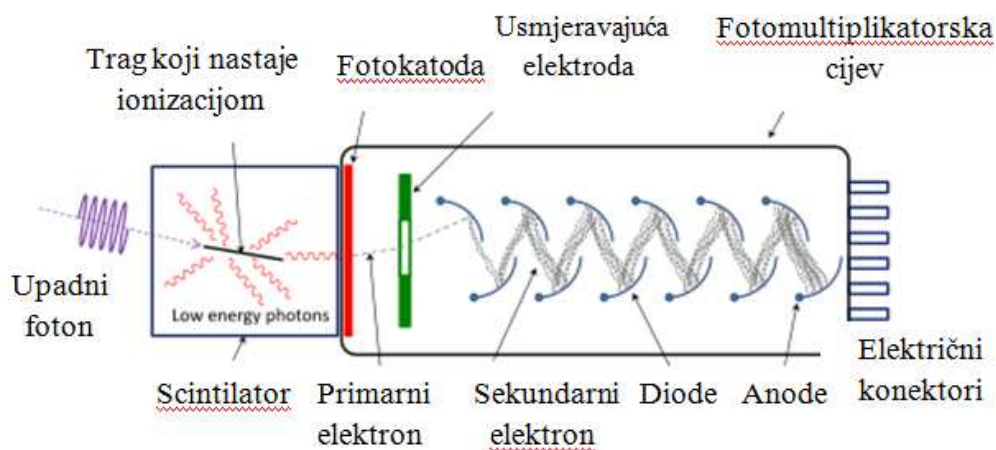
⁷ Neki materijali koji bivaju ozračeni ionizirajućim zračenjem, postaju ionizirani te njegovi atomi prelaze u pobuđena stanja. Nakon povratka atoma u stabilnija stanja, materijal stvara fotone vidljive svjetlosti koje nazivamo scintilacije, a takav materijal scintilator.

$h\nu$) pri čemu emitiraju UV ili vidljivu plavu svjetlost (valne duljine 375-430 nm). Za emitiranu UV i plavu svjetlost su scintilacijski koktel i bočica prozirni. Tako nastali fotoni, dalje padaju na katodu pri čemu izbijaju elektrone (fotoelektroni) koji se gibaju prema fotomultiplikatorskoj cijevi koja višestruko umnaža njihov broj. Trajanje tako dobivenog svjetlosnog signala traje 5 ns. Dobiveni intenzitet svjetlosti u koktelu je proporcionalan energiji radioaktivnog raspada. Nasuprot tome, broj impulsa u jedinici vremena proporcionalan je broju raspada u jedinici vremena [9].

Nadalje, važno je objasniti što se događa, odnosno na koji način radi fotomultiplikatorska cijev. Scintilacije koje nastaju unutar samog koktela su vrlo slabe kako bismo ih mi uočili, stoga ih je važno pojačati i pretvoriti obradiv signal. Fotomultiplikatorska cijev nam to i omogućava. Naime, ona se sastoji od cijevi na čiju jednu od strana, koja je prozirna za dobivenu valnu duljinu svjetlosti scintilacija, pada svjetlost dobivena scintilacijama. Odmah potom se nalazi fotokatoda na koju padaju scintilacije (snop fotona) iz koje se izbijaju elektroni (fotoelektroni) koji se nadalje ubrzavaju električnim poljem prema drugim diodama⁸ fotomultiplikatorske cijevi (Slika 9.). Broj elektrona se umnaža sve do posljednje diode, kada je njihov broj veći za nekoliko redova veličine u odnosu na početan broj. Na kraju cijevi se nalazi anoda koja prikuplja sve elektrone.

Scintilator mora biti povezan sa fotomultiplikatorskom cijevi na način da na fotokatodu pada samo svjetlost scintilacija dobivena zračenjem, a ne i vanjska svjetlost kako bi izlazni signal bio rezultat samo scintilacija [9].

⁸ U fotomultiplikatorskoj cijevi nalazi se od 10 do 20 dioda, a svaka dioda se nalazi na višem potencijalu od one prethodne diode. Postizanje takvog stanja dobiva se povezivanjem niza otpornika.



Slika 9. Prikaz procesa sa scintilacijskim detektorom i fotomultiplikatorskom cijevi.

Emitirana svjetlost je proporcionalna energiji čestice zračenja koja je uzrokovala scintilaciju. Dakle, postoji proporcionalnost između dobivenog naponskog signala i energije koja je opažena u scintilatoru. Ukoliko je foton scintilacije svoju ukupnu energiju predao scintilatoru, te na taj način je došlo do fotoelektričnog efekta, naponski signal koji se dobije na kraju fotomultiplikatorske cijevi odgovarat će energiji fotona.

Važno je za istaknuti kako su tekućinski scintilatori vrlo osjetljivi na nečistoće koje se nalaze u otopini. Naime, one uzrokuju prigušenja (tzv. quench) pa tako zapravo dolazi do smanjivanja one stvarne količine zračenja koja bi potekla iz otopine. Iz tog razloga se prije svakog mjerenja radi standardni, SQP test (Standard Quenching Parametar) kojim se ispituju nečistoće koje bi mogle prouzrokovati to prigušenje. Nastavak mjerenja vršimo ukoliko je SQP negativan.

6.2. TRICARB 2900

Tekućinski scintilacijski detektor korišten za mjerenja u ovom radu je TriCarb 2900 (Slika 10.). Jedna od značajki detektora iz TriCarb serije je da se svim funkcijama može potpuno računalno upravljati. Naime, detektor je priključen na računalo, te samim time u mogućnosti je automatski obrađivati podatke, provjeravati i vrednovati dobivene rezultate, ali isto tako moguće ga je povezati s internetskom mrežom. Pomoću TriCarb 2900 detektora moguće je detektirati niske doze zračenja potekle od alfa, beta i gama zračenja [10].

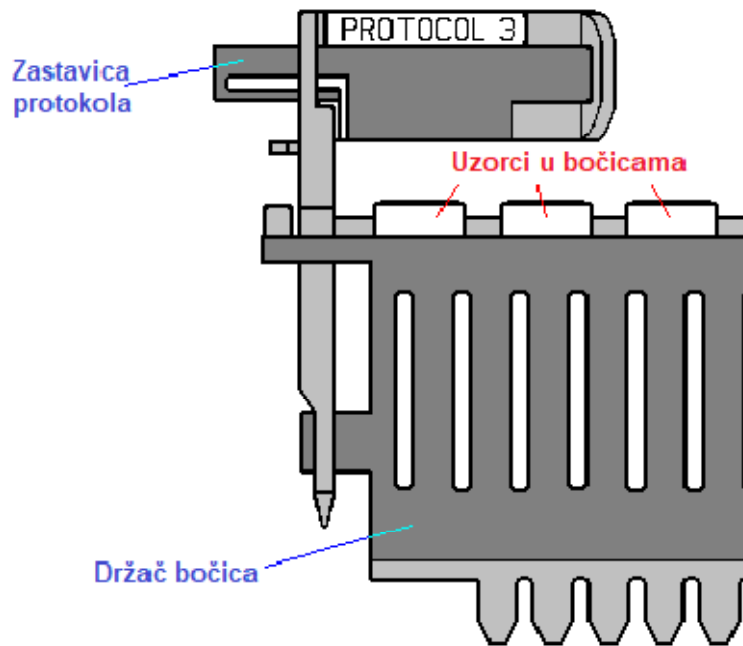


Slika 10. TriCarb 2900 tekućinski scintilacijski detektor.

Kako se rad TriCarb 2900 detektora temelji na scintilacijama, potrebno ga je koristiti u zatvorenim prostorijama udaljenog od ostalih uređaja ili mjesta koji bi mogli zračiti te time utjecati na njegov rad. Zbog optičkih senzora od kojih se sastoji, potrebno je spriječiti dolazak sunčeve svjetlosti zbog mogućnosti utjecaja i nepravilnosti u njihovom radu.

U uređaj se mogu smjestiti uzorci u manjim i većim bočicama. Ukoliko koristimo veće bočice od 20 ml tada stane njih 408, dok onih manjih bočica od 4 ili 7 ml stane 720. Bočice se smještaju u držače (tzv. kazete). Tako u jedan držač stane 12 većih bočica, ili 18 manjih bočica.

Računalu moramo zadati što ćemo raditi sa uzorcima, odnosno ono mora znati koje će operacije pri tome izvoditi. Stoga je važno na držač postaviti zastavicu kojom je određeno koji protokol će računalo izvoditi nad svakim uzorkom. Zastavica s protokolom se postavlja na početak držača (krajnje lijevo) kako bi uređaj prepoznao uzorke koji su spremni za analiziranje (Slika 11.). Svakom držaču pridružen je točno određeni broj koji se može iščitati na njemu. Stoga, prilikom analize uzoraka, uređaj prepoznaje protokol koji je potrebno izvoditi, ali i broj držača, te se u računalnom programu nižu zadaci koje je potrebno provesti nad njima [10].

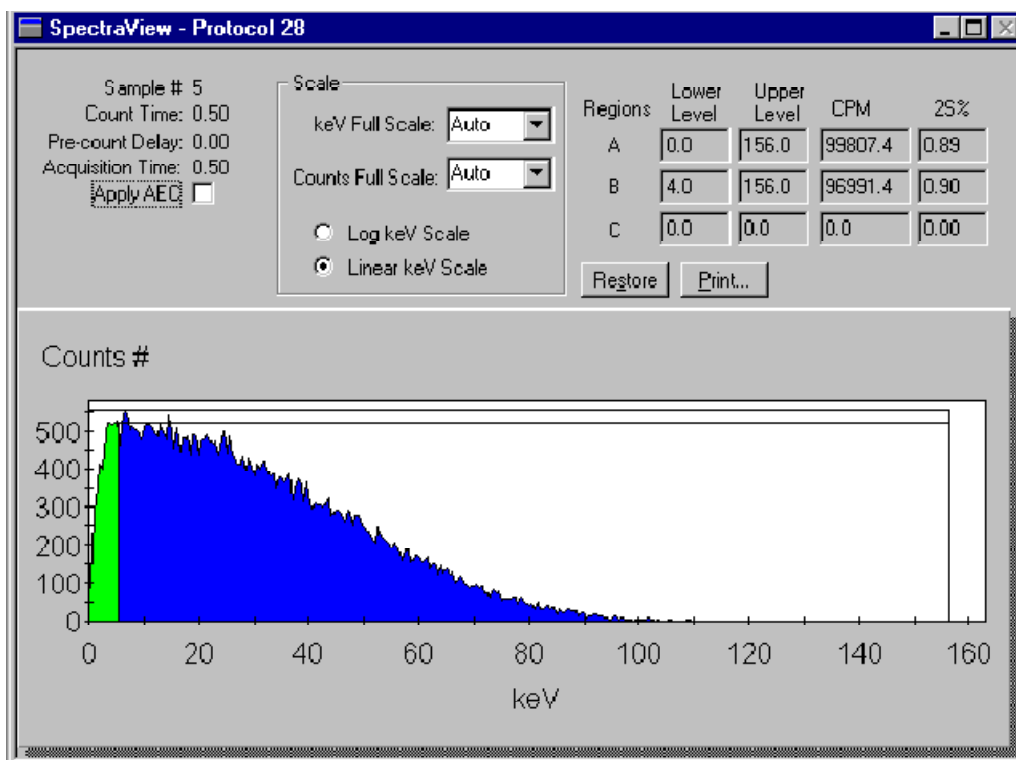


Slika 11. Držač bočica i postavljanje protokola.

Prilikom postavljanja uzoraka u držače, a zatim i u detektor, odmah se kreće u njihovo analiziranje. Unutar uređaja, držači se kreću u smjeru obrnutom od kazaljke na satu. Bočice s uzorcima bivaju "uvučene", jedna po jedna, između dvije fotomultiplikatorske cijevi koje se nalaze u uređaju ispod uzoraka (u pozadinskom dijelu uređaja), te su okružene slojem olova čime se smanjuje utjecaj mogućeg pozadinskog zračenja na provedena mjerenja. Fotomultiplikatorske cijevi postavljene su jedna nasuprot druge i nalaze se u reflektirajućoj optičkoj komori.

Scintilacijski kokteli koji se koriste u TriCarb 2900 tekućinskom scintilacijskom detektoru, napravljeni su na način da maksimiziraju detekciju emitiranih fotona, te se odabiru u ovisnosti o nuklidu kojeg promatramo. Za ispitivanje $^{222}_{86}\text{Rn}$ vrlo dobar se pokazao scintilacijski koktel Ultima Gold XR. Naime, pokazao je visoku učinkovitost pri apsorpiranju izračene energije ionizirajućih čestica.

Softver koji se koristi za proučavanje spektra uzorka je QuantaSmart. Naime, on nam u svom spektralnom prozoru omogućava prikaz 2D spektra uzorka koji se analizira. Nakon svakih šest sekundi dolazi do obnove spektra. Spektrom dobivamo informacije o broju događaja koji su se dogodili u uzorku, ali i o energiji na kojoj su ti događaji zabilježeni te ih je moguće prikazati u linearnoj i logaritamskoj skali. Dobivene rezultate možemo spremiti i po potrebi ispisati (Slika 12.).



Slika 12. Prozor programa QuantaSmart.

6.3. PRIPREMANJE UZORAKA I MJERENJE

U ovom diplomskom radu, proučavane su koncentracije radona, ^{222}Rn , u prirodnim mineralnim vodama koje su dostupne na hrvatskom tržištu: Bistra, Romerquelle, Sveti Rok, Dana, De spar goccia di carnia sorrente di fleon, Saguaro, Spar Vital, Evian, Santa, Jana, Fiji, Cetina, Studena, Gorska, Vöslauer, Akvia, Vöslauer baby (Tablica 6.). Ono na što smo obraćali pažnju prije kupovine što većeg broja voda različitih proizvođača, jest datum punjenja. Naime, gledali smo da datum punjenja bude što noviji.

Prije samog početka mjerenja morali smo provesti kalibraciju sustava (*Self Normalization and Calibration - SNC*) kako bi dobili informacije o radu uređaja što smo učinili na sljedeći način. U držač smo postavili redom bočicu sa standardom ^{14}C , zatim praznu bočicu koju koristimo za uzorke, na treće mjesto u držaču postavili smo bočicu sa standardom tricija, te zadnja bočica je bila bočica u kojoj se nalazila destilirana voda kojom smo odredili pozadinsko zračenje, tzv. background. Zatim smo držač s bočicama postavili u uređaj i pokrenuli mjerenje.

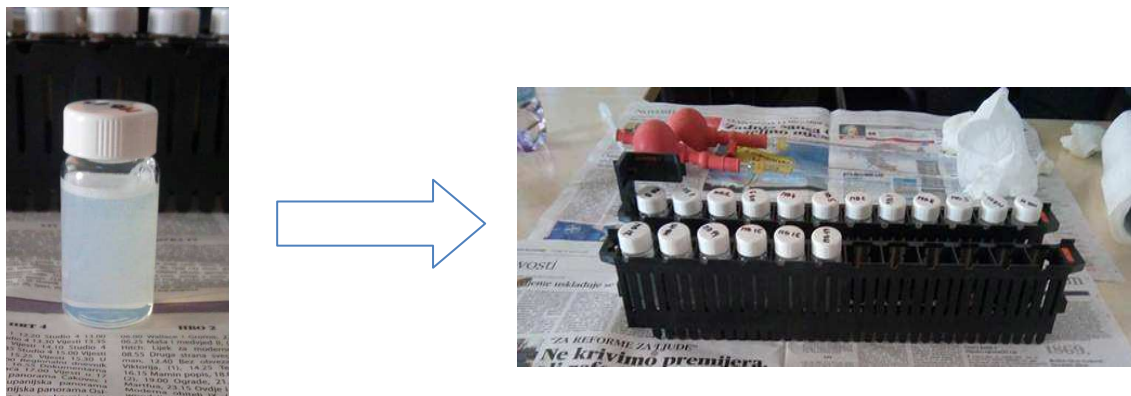
Tablica 6. Ispitivane prirodne mineralne vode.

| BROJ UZORKA | PRIRODNA MINERALNA VODA |
|-------------|--|
| 1. | BISTRA |
| 2. | ROMERQUELLE |
| 3. | SVETI ROK |
| 4. | DANA |
| 5. | DE SPAR GOCCIA DI CARNIA SORRENTE DI FLEONS |
| 6. | SAGUARO |
| 7. | SPAR VITAL |
| 8. | EVIAN |
| 9. | SANTA |
| 10. | JANA |
| 11. | FIJI |
| 12. | CETINA |
| 13. | STUDENA |
| 14. | GORSKA |
| 15. | VÖSLAUER |
| 16. | AKVIA |
| 17. | VÖSLAUER BABY |

Za kalibraciju samog uređaja koristili smo EPA protokol. U navedenom protokolu koristi se 100 ml otopine radija $^{226}_{88}\text{Ra}$ čija je aktivnost približno 1295 Bq/l. Prvo se u posudu od 100 ml ulije 20 ml destilirane vode i 0,5 ml koncentrirane HNO_3 te se analitičkom vagom odredi početna masa. Pipetom se prenese potrebna masa otopine radija u posudu i zabilježi se konačna masa. Dobivenu otopinu razrijedimo destiliranom vodom do oznake od 100 ml. U staklene bočice ulijemo 10 ml ulja, te dodamo još 10 ml pripremljene otopine što zatim miješamo. Nakon postizanja sekularne ravnoteže (nakon 30 dana), ostavljamo dobivene uzorke u mraku na 3 sata, te provodimo mjerenje po 50 minuta.

Nakon prethodno opisanog dijela, počeli smo pripremati uzorke za mjerenje. Na računalu smo pripremili što ćemo raditi. Kako znamo da je radon alfa emiter, prvo smo odabrali kako želimo proučavati alfa zračenje (alfa/beta). Odredimo ime datoteci koju ćemo dobiti na kraju analize, te gdje želimo da nam se spremi.

Uzorke smo pripremali na sljedeći način. Prvo smo uzeli 18⁹ bočica od 20 ml, te smo svakoj bočici pridružili odgovarajući broj, koji smo povezali sa pojedinom vodom proizvođača, kako bismo pri analizi rezultata znali o kojoj se radi. Nakon toga smo u svih 18 bočica pipetom ulili 10 ml Ultima Gold XR ulja. Drugom pipetom započeli smo ulijevanje vode. U prvu bočicu s uljem, ulili smo destiliranu vodu kako bismo odredili pozadinsko zračenje, te smo ju mučkali kako bi dobili homogenu otopinu (za to vrijeme radon se oslobađa u plinovitu fazu iz vode pri čemu ostaje "zarobljen" u koktelu). Zatim smo za sve ostale uzorke napravili jednak postupak, te smo ih redom postavljali u držač (Slika 13.). Na početak držača postavili smo zastavicu s protokolom kako je već bilo opisano. Nakon obavljenog postupka, uzorci su u uređaju mirovali tri sata, nakon kojeg je započelo mjerenje.



Slika 13. Priprema uzoraka za analiziranje.

U samom uređaju događa se sljedeće. U postavkama uređaja postavili smo da mjerenje svakog uzorka traje 60 minuta. U tom postupku svaka bočica uzorka biva uvučena između dvije fotomultiplikatorske cijevi (o čemu je prethodno već bilo govora). Radon se prilikom miješanja oslobodio iz vode u scintilacijski koktel (Ultima Gold XR). Dobivene scintilacije, samo ukoliko su opažene s obje fotomultiplikatorske cijevi, bivaju brojane kao događaj (*count*).

Rezultate o koncentraciji radona dobivamo kao događaje u minuti (*count per minute*). Iz tog razloga potrebno ih je pretvoriti u *Bq/l*. To smo učinili pomoću formule:

$$c \left[pCi/L \right] = \frac{G-B}{CF \cdot D \cdot V} \quad (29)$$

⁹ 17 bočica u kojoj su se nalazili uzorci različitih proizvođača voda, i 1 bočica kojom smo odredili background.

gdje G označava broj događaja u uzorku, a B događaje pozadinskog zračenja. CF je kalibracijski faktor dobiven prema EPA metodi¹⁰. D predstavlja faktor korekcije na raspad radona između vremena koje je proteklo od punjenja bočica (datum punjenja) do mjerenja, a V je volumen uzorka vode koji smo koristili [11]. Rezultat je dobiven u pCi/L pa ga je bilo potrebno pretvoriti u Bq/l .

Zatim smo izračunali standardnu pogrešku odredili kao totalni diferencijal jednadžbe (30):

$$\sigma = \sqrt{\frac{\partial c}{\partial G} \sigma_G + \frac{\partial c}{\partial B} \sigma_B + \frac{\partial c}{\partial CF} \sigma_{CF}} \quad (30)$$

odnosno:

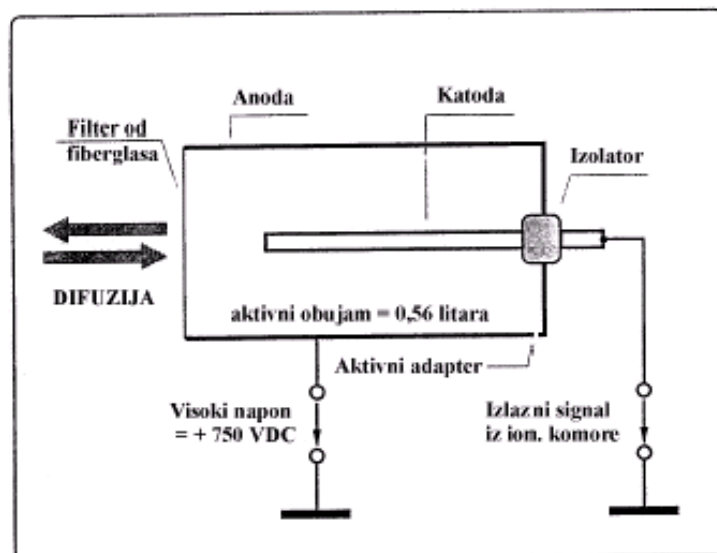
$$\sigma = \sqrt{\left(\frac{1}{CF \cdot D \cdot V}\right)^2 \sigma_G^2 + \left(\frac{1}{CF \cdot D \cdot V}\right)^2 \sigma_B^2 + \left(\frac{(B-G) \cdot D \cdot V}{(CF \cdot D \cdot V)^2}\right)^2 \sigma_{CF}^2} \quad (31)$$

6.4. AlphaGUARD MJERNI SUSTAV

AlphaGUARD (Genitron Instruments GmbH, Njemačka) je cjelovit sustav koji se koristi za neprekidno mjerenje koncentracije radona, ali i njegovih potomaka. Osim što se njime mogu mjeriti koncentracije radona u tlu i u vodi, mogu se mjeriti i neki meteorološki parametri poput temperature zraka i relativne vlažnosti tlaka. Relokacijski detektor unutar uređaja omogućava registraciju promjene položaja uređaja koje se dogodi tijekom mjerenja.

Glavni dio ovog sustava čini AlphaGUARD PQ 2000 PRO koji se sastoji od pulsne ionizacijske komore kojom se detektira radon. Ukoliko uređaj radi na principu difuzije, radon u ionizacijsku komoru ulazi, kao što sam naziv kaže, difuzijom kroz filter od fiberglasa. Navedeni filter služi kako bi se spriječio ulazak radonovim potomcima. Također, AlphaGUARD PQ 2000 PRO može raditi i na pumpni način pri čemu se koristi AlphaPUMPOM kojom se određuje brzina strujanja zraka u detekcijskoj komori (0,03, 0,05, 0,1, 0,3, 0,5 i 1 l/min). Kućište ionizacijske komore spojeno je na pozitivni potencijal od 750 V i tako čini anodu, dok je unutar kućišta izolatorom pričvršćena katoda (Slika 14.).

¹⁰ EPA - United States Environmental Protection Agency.



Slika 14. AlphaGUARD sustav - ionizacijska komora

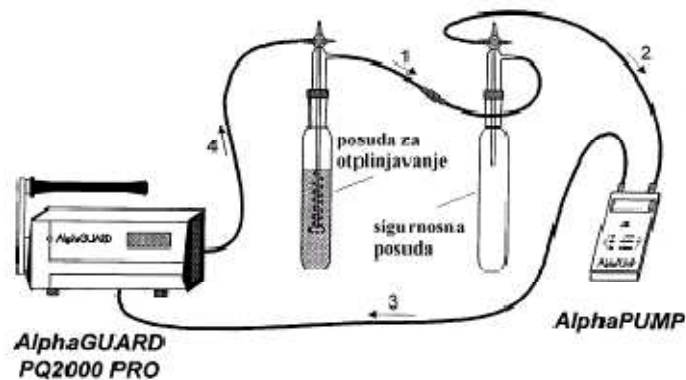
Radon se u ionizacijskoj komori radioaktivno raspada na α čestice koje ioniziraju zrak koji se nalazi unutar komore. Negativno nabijena katoda privlači tada pozitivno nabijene čestice, te tako mjeri slabu struju koja je proporcionalna količini raspadnutih atoma radona. Kako bi se obradio dobiveni signal koristi se DSP tehnologija (*Digital Signal Processing*). Istovremenim korištenjem triju različitih sustava kako bi se oblikovao signal, iz signala šuma dobivaju se različite informacije.

AlphaGUARD kod difuznog načina rada omogućava promjenu intervala mjerenja od 10-60 minuta, dok kod pumpnog načina rada od 1-10 minuta. Dobivene koncentracije spremaju se u memoriju koja ima takav kapacitet da u 60 minutnom intervalu mjerenja čuva podatke nastale za 4 mjeseca neprekidnog rada sustava. Mjerno područje uređaja je od 2 Bq/m^3 do 2 MBq/m^3 .

6.5. MJERENJE RADONA U VODI

Određivanjem koncentracije radona u zraku moguće je odrediti koncentraciju radona u nekom uzorku vode. Uz AlphaGUARD i AlphaPUMPU, postav za mjerenje koncentracije radona sastoji se od dvije staklene posude (AquaKIT). Jedna staklena posuda koristi se za otplinjavanje, a druga je sigurnosna posuda (Slika 15.). Postupak započinje otvaranjem sigurnosnih ventila na vrhu obje posude nakon čega se u njih plastičnom injekcijom ulijeva oko 100 ml uzorkovane vode. Nakon toga zatvaraju se sigurnosni ventili obje posude, te se AlphaGUARD postavlja u pumpni način rada pri čemu je mjerni ciklus postavljen na 1 min.

Pri tom na AlphaPUMPI postavimo brzinu strujanja na 0,3 l/min, te ju se uključi na trajanje od 10 min.



Slika 15. AlphaGuard sustav- mjerenje radona u vodi

Nakon 10 min isključimo AlphaPUMPU, te mjerenje nastavljamo AlphaGUARDOM. AlphaGUARDOM mjerimo sljedećih 20 min, što znači ukupnih 30 min mjerenja. Dobivena vrijednost radona nije tražena koncentracija radona u vodi, jer je, i nakon otplinjavanja, jednim manjim dijelom radon još uvijek ostao u tekućoj fazi. Koliko ga je ostalo u tekućoj fazi, opisano je faktorom k , čija je ovisnost o temperaturi opisana Slikom 7. Tako se koncentracija radona u vodi računa po jednadžbi:

$$c_v = \frac{c_z \left(\frac{V_{sistem} - V_{uzorak}}{V_{uzorak}} + k \right) - c_0}{1000} \quad (32)$$

gdje je c_v koncentracija radona u vodi izražena u Bq/l, c_z koncentracija radona u zraku u Bq/m³, c_0 koncentracija radona u zraku u prostoriji u kojoj se provodi mjerenje, prije početka mjerenja u Bq/m³, V_{sistem} obujam zraka u zatvorenom sustavu izražen u ml, a V_{uzorak} je obujam uzorka vode koji se analizirao u ml. Radon koji je difuzijom "otišao" iz zatvorenog sustava kroz plastične cjevčice se zanemaruje.

7. REZULTATI I RASPRAVA

Mjerenja su provedena u travnju 2018., te u siječnju 2019. godine na Odjelu za fiziku u Osijeku. Rezultati su dobiveni korištenjem tekućinskog scintilacijskog detektora TriCarb 2900 (Tablica 7.) i uređajem AlphaGUARD (Tablica 8.). U Tablici 7. navedeni su datumi punjenja i mjerenja, dobiveni događaji u minuti kroz tri mjerenja, te dobivene koncentracije radona i standardna pogreška. U Tablici 8. navedene su koncentracije radona u zraku potrebne za izračun koncentracije radona AlphaGUARDOM iz jednadžbe (32).

Tablica 7. Rezultati mjerenja dobiveni tekućinskim scintilacijskim detektorom TriCarb 2900.

| UZORAK | DATUM PUNJENJA | DATUM MJERENJA | G_1 [dogadaji/min] | G_2 [dogadaji/min] | G_3 [dogadaji/min] | \bar{G} [dogadaji/min] | σ_G [dogadaji/min] | c [Bq/l] | σ [Bq/l] |
|--------|----------------|----------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------------|------------------------------|----------|-----------------|
| 1. | 16.8.2017 | 23.4.2018 | 44 | - | - | - | - | 0,39 | - |
| 2. | 18.12.2017 | 23.4.2018 | 45 | - | - | - | - | 0,62 | - |
| | 9.3.2018 | 11.1.2019 | 49,97 | 49,08 | 50,65 | 49,90 | 0,79 | 1,93 | 0,29 |
| | | 16.1.2019 | 47,20 | 46,08 | 46,07 | 46,45 | 0,65 | 1,15 | 0,27 |
| 3. | 17.1.2018 | 23.4.2018 | 44 | - | - | - | - | 0,39 | - |
| | 15.8.2018 | 13.1.2018 | 47,42 | 45,63 | 47,23 | 46,76 | 0,98 | 1,22 | 0,32 |
| | | 18.1.2018 | 46,08 | 45,12 | 46,42 | 45,87 | 0,67 | 1,01 | 0,28 |
| 4. | 11.9.2017 | 24.4.2018 | 45 | - | - | - | - | 0,62 | - |
| | 1.10.2018 | 12.1.2019 | 45,42 | 46,27 | 45,92 | 45,87 | 0,43 | 1,01 | 0,25 |
| | | 17.1.2019 | 46,28 | 46,92 | 45,83 | 46,34 | 0,55 | 1,12 | 0,26 |
| 5. | 3.10.2017 | 24.4.2018 | 44 | - | - | - | - | 0,39 | - |
| | 12.3.2018 | 12.1.2019 | 48,77 | 45,73 | 46,32 | 46,94 | 1,61 | 1,26 | 0,43 |
| | | 17.1.2019 | 45,67 | 47,43 | 47,63 | 46,91 | 1,08 | 1,25 | 0,34 |
| 6. | 20.12.2017 | 24.4.2018 | 45 | - | - | - | - | 0,62 | - |
| | 24.10.2018 | 13.1.2019 | 48,40 | 46,72 | 42,25 | 46,79 | 1,58 | 1,22 | 0,43 |
| | | 18.1.2019 | 46,90 | 45,10 | 44,70 | 45,57 | 1,17 | 0,94 | 0,35 |
| 7. | 28.8.2017 | 24.4.2018 | 45 | - | - | - | - | 0,62 | - |
| | 15.8.2018. | 12.1.2019 | 45,95 | 46,50 | 45,73 | 46,06 | 0,40 | 1,06 | 0,25 |
| | | 17.1.2019 | 45,55 | 45,60 | 44,32 | 45,16 | 0,73 | 0,85 | 0,28 |
| 8. | 26.12.2017 | 24.4.2018 | 45 | - | - | - | - | 0,62 | - |
| | 3.5.2018. | 12.1.2019 | 46,42 | 46,02 | 45,97 | 46,14 | 0,25 | 1,07 | 0,24 |
| | | 17.1.2019 | 45,50 | 45,62 | 44,97 | 45,36 | 0,35 | 0,90 | 0,24 |
| 9. | 25.3.2017 | 24.4.2018 | 45 | - | - | - | - | 0,62 | - |
| | 19.3.2018 | 11.1.2019 | 46,30 | 44,58 | 45,55 | 45,48 | 0,86 | 0,92 | 0,30 |
| | | 16.1.2019 | 44,74 | 45,59 | 44,78 | 45,04 | 0,48 | 0,82 | 0,26 |
| 10. | 15.2.2018 | 24.4.2018 | 44 | - | - | - | - | 0,39 | - |
| | 4.11.2018 | 12.1.2019 | 46,1 | 45,65 | 44,05 | 45,27 | 1,08 | 0,88 | 0,34 |
| | | 17.1.2019 | 46,18 | 45,22 | 45,40 | 45,60 | 0,51 | 0,95 | 0,26 |

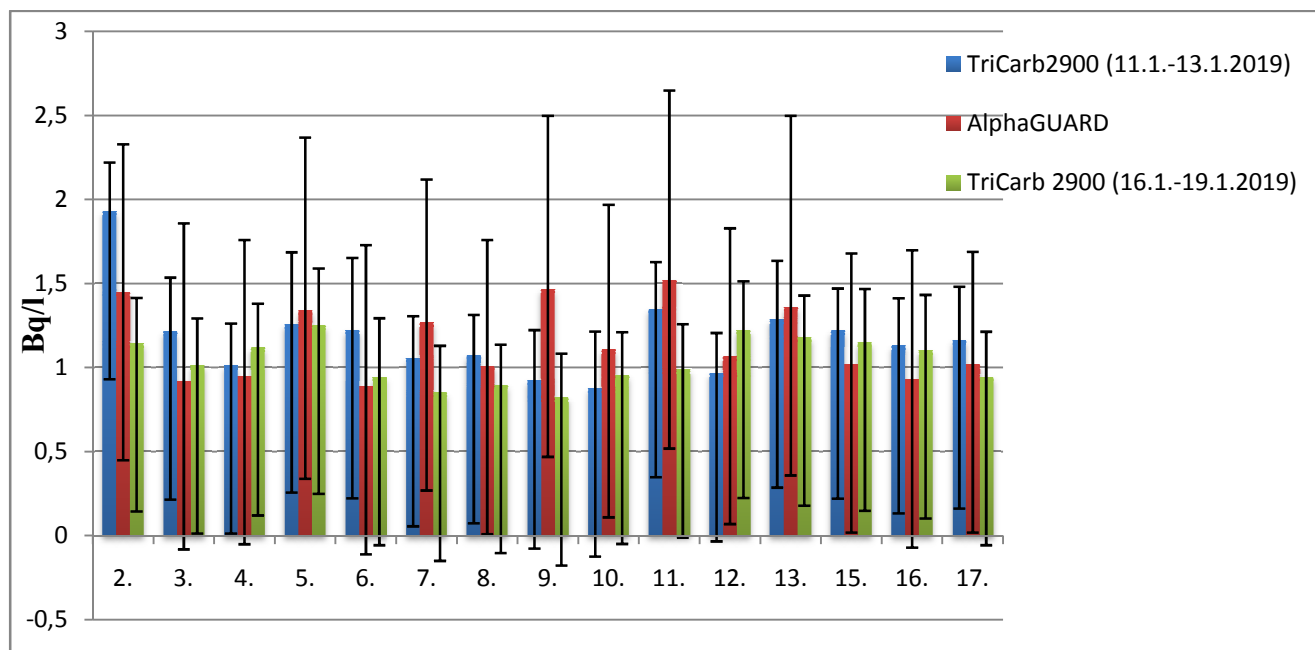
Tablica 7.(nastavak) Rezultati mjerenja dobiveni tekućinskim scintilacijskim detektorom TriCarb 2900.

| UZORAK | DATUM PUNJENJA | DATUM MJERENJA | G_1 [dogadjaji/min] | G_2 [dogadjaji/min] | G_3 [dogadjaji/min] | \bar{G} [dogadjaji/min] | σ_G [dogadjaji/min] | c [Bq/l] | σ [Bq/l] |
|--------|----------------|----------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------------|-------------------------------|----------|-----------------|
| 11. | 13.7.2017 | 24.4.2018 | 44 | - | - | - | - | 0,39 | - |
| | 29.12.2017 | 12.1.2019 | 47,72 | 47,80 | 46,50 | 47,34 | 0,73 | 1,35 | 0,28 |
| | | 17.1.2019 | 46,00 | 46,20 | 45,10 | 45,77 | 0,59 | 0,99 | 0,27 |
| 12. | 22.1.2018 | 24.4.2018 | 45 | - | - | - | - | 0,62 | - |
| | 19.10.2018 | 12.1.2019 | 45,43 | 45,65 | 45,92 | 45,67 | 0,25 | 0,97 | 0,24 |
| | | 17.1.2019 | 46,48 | 47,67 | 46,24 | 46,80 | 0,77 | 1,22 | 0,29 |
| 13. | 18.8.2017 | 24.4.2018 | 46 | - | - | - | - | 0,84 | - |
| | 15.10.2018. | 11.1.2019 | 47,23 | 45,83 | 48,15 | 47,07 | 1,17 | 1,29 | 0,35 |
| | | 16.1.2019 | 46,68 | 47,02 | 46,10 | 46,60 | 0,47 | 1,18 | 0,25 |
| 14. | 20.6.2017 | 24.4.2018 | 44 | - | - | - | - | 0,39 | - |
| 15. | 15.2.2018 | 24.4.2018 | 45 | - | - | - | - | 0,62 | - |
| | 15.10.2018 | 13.1.2019 | 46,45 | 47,27 | 46,63 | 46,78 | 0,43 | 1,22 | 0,25 |
| | | 18.1.2019 | 47,15 | 45,38 | 46,87 | 46,47 | 0,95 | 1,15 | 0,32 |
| 16. | 10.1.2018 | 24.4.2018 | 43 | - | - | - | - | 0,16 | - |
| | 15.10.2018. | 11.1.2019 | 47,12 | 46,27 | 45,81 | 46,40 | 0,66 | 1,13 | 0,28 |
| | | 16.1.2019 | 47,43 | 46,00 | 45,37 | 46,27 | 1,06 | 1,10 | 0,33 |
| 17. | 15.2.2018 | 24.4.2018 | 45 | - | - | - | - | 0,62 | - |
| | 15.10.2018 | 13.1.2019 | 46,82 | 45,42 | 47,33 | 46,52 | 0,99 | 1,16 | 0,32 |
| | | 18.1.2019 | 45,60 | 44,95 | 46,15 | 45,57 | 0,60 | 0,94 | 0,27 |

Tablica 8. Rezultati mjerenja dobiveni uređajem AlphaGUARD.

| UZORAK | T [°C] | k | V_{uzorak} [ml] | V_{sistem} [ml] | c_z [Bq/l] | σc_z [Bq/l] | c_v [Bq/l] | σc_v [Bq/l] |
|--------|----------|------|-------------------|-------------------|--------------|---------------------|--------------|---------------------|
| 2. | 20 | 0,26 | 102 | 1122 | 141,1 | 85,3 | 1,45 | 0,88 |
| 3. | 18 | 0,27 | 105 | 1122 | 92,7 | 94,9 | 0,92 | 0,94 |
| 4. | 21 | 0,25 | 103 | 1122 | 94,1 | 79,9 | 0,95 | 0,81 |
| 5. | 20 | 0,26 | 100 | 1122 | 127,8 | 98,3 | 1,34 | 1,03 |
| 6. | 21 | 0,25 | 104 | 1122 | 88,6 | 83,4 | 0,89 | 0,84 |
| 7. | 21 | 0,25 | 102 | 1122 | 123,7 | 83,2 | 1,27 | 0,85 |
| 8. | 20 | 0,26 | 107 | 1122 | 104,0 | 77,3 | 1,01 | 0,75 |
| 9. | 20 | 0,26 | 103 | 1122 | 144,5 | 101,0 | 1,47 | 1,03 |
| 10. | 21 | 0,25 | 103 | 1122 | 109,6 | 84,6 | 1,11 | 0,86 |
| 11. | 21 | 0,25 | 93 | 1122 | 134,5 | 100,2 | 1,52 | 1,13 |
| 12. | 21 | 0,25 | 104 | 1122 | 106,5 | 75,6 | 1,07 | 0,76 |
| 13. | 20 | 0,26 | 98 | 1122 | 127,5 | 106,4 | 1,36 | 1,14 |
| 15. | 19 | 0,26 | 103 | 1122 | 100,8 | 64,5 | 1,02 | 0,66 |
| 16. | 20 | 0,26 | 105 | 1122 | 93,6 | 77,1 | 0,93 | 0,77 |
| 17. | 19 | 0,26 | 103 | 1122 | 100,3 | 66,4 | 1,02 | 0,67 |

Na slici 16. grafički su prikazani dobiveni rezultati mjerenja koncentracija aktivnosti radona (11.1.-13.1.2019) tekućinskim scintilacijskim detektorom TriCarb 2900 i uređajem AlphaGUARD.



Slika 16. Grafički prikaz rezultata mjerenja koncentracija aktivnosti radona, te standardne devijacije pojedinih mjerenja u uzorcima vode.

Iz usporedbe rezultata dobivenih koncentracija aktivnosti radona mjerenjima provedenim tekućinskim scintilacijskim detektorom TriCarb 2900 i uređajem AlphaGUARD vidimo kako su vrijednosti jednake unutar statističke pogreške mjerenja. Jedan od najznačajnijih čimbenika koji utječe na koncentraciju radona u uzorcima flaširane vode je difuzija radona kroz plastičnu bocu. Njome se dodatno smanjuje njegova koncentracija koja se očekuje uspostavljanjem sekularne ravnoteže između radija i radona, a što se događa nakon mjesec dana (otprilike 6-7 vremena poluživota radona). Ova novouspostavljena ravnotežna koncentracija radona je u svim uzorcima bila niska (oko 1,15 Bq/l u prosjeku i tek nešto viša od pogreške metode) i nije bilo moguće eksperimentalno istražiti utjecaj odnosno udio difuzije radona kroz plastičnu ambalažu na mjerenu koncentraciju radona u uzorku.

Ukoliko pretpostavimo da čovjek dnevno konzumira 2 litre flaširane vode, odnosno 0,5 litara flaširane vode, te korištenjem konverzijskog faktora 10^{-8} Sv/Bq, dobivamo procjenjenu godišnju efektivnu dozu koju on primi ingestijom (Tablica 9.). Dobivene koncentracije su još uvijek vrlo male (primjerice za uzorak 2., ta je koncentracija oko 1500 puta manja od vrijednosti koje čovjek primi inhalacijom radona) [1].

Uspoređujući dobivene koncentracije radona u flaširanim bocama prirodne mineralne vode s koncentracijama radona u vodi gradskih vodovoda na području Osijeka pokazuje kako su koncentracije u gradskim vodovodima oko pet puta veće nego u flaširanim bocama. Takav rezultat je i za očekivati iz razloga što radon u flaširanim vodama može difundirati kroz plastične boce čime se smanjuje njegova koncentracija u vodi.

Tablica 9. Primljena godišnja efektivna doza koju primi čovjek ingestijom 2 l vode dnevno i 0,5 l vode dnevno, usporedba s primljenom godišnjom efektivnom dozom koju čovjek primi inhalacijom (2,04 mSv/god), te s primljenom godišnjom efektivnom dozom koju čovjek primi ingestijom 2 l vode iz gradskog vodovoda na području Osijeka (16 μ Sv/god).

| UZORAK | c [Bq/l] | E [μ Sv/god] (2 l dnevno) | E [μ Sv/god] (0,5 l dnevno) | $\frac{2,04 * 10^{-3} \text{ Sv/god}}{E_{2l}}$ | $\frac{1,6 * 10^{-5} \text{ Sv/god}}{E_{2l}}$ |
|--------|----------|-----------------------------------|-------------------------------------|--|---|
| 1. | 0,39 | 2,85 | 0,712 | 716 | 5,62 |
| 2. | 1,93 | 1,41 | 3,52 | 1447 | 1,13 |
| 3. | 1,22 | 8,91 | 2,23 | 229 | 1,80 |
| 4. | 1,01 | 7,37 | 1,84 | 277 | 2,17 |
| 5. | 1,26 | 9,20 | 2,30 | 222 | 1,74 |
| 6. | 1,22 | 8,91 | 2,23 | 229 | 1,80 |
| 7. | 1,06 | 7,74 | 1,93 | 264 | 2,07 |
| 8. | 1,07 | 7,81 | 1,95 | 261 | 2,05 |
| 9. | 0,92 | 6,72 | 1,68 | 304 | 2,38 |
| 10. | 0,88 | 6,42 | 1,61 | 318 | 2,49 |
| 11. | 1,35 | 9,86 | 2,46 | 207 | 1,62 |
| 12. | 0,97 | 7,08 | 1,77 | 288 | 2,26 |
| 13. | 1,29 | 9,42 | 2,35 | 217 | 1,70 |
| 14. | 0,39 | 2,85 | 7,12 | 716 | 5,62 |
| 15. | 1,22 | 8,91 | 2,23 | 229 | 1,80 |
| 16. | 1,13 | 8,25 | 2,06 | 242 | 1,94 |
| 17. | 1,16 | 8,47 | 2,12 | 241 | 1,89 |

8. ZAKLJUČAK

Uređajem TriCarb 2900 proveli smo mjerenja koncentracije radona u prirodnim mineralnim vodama koje su dostupne na hrvatskom tržištu. Dobiveni rezultati su pokazali da su koncentracije znatno niže u odnosu na referentnu vrijednost 100 Bq/l.

Uspoređujući rezultate mjerenja određivanja koncentracije radona TriCarbom 2900 i s vrijednostima dobivenim AlphaGuardom, vidimo da postoje poneka odstupanja. Jedna od bitnih značajki je ta što je prirodna mineralna voda flaširana u plastične bočice što nam govori o mogućnosti da radon difundira kroz plastične bočice, čime dolazi do smanjenja koncentracije. Na samo određivanje koncentracije radona utječe i koncentracija radija na izvoru punjenja u pojedinim vodama, jer je radon potomak radija.

Pod pretpostavkom da čovjek konzumira 2 litre flaširane vode, dobivaju se procijenjene efektivne doze u iznosu od 1,4 $\mu\text{Sv}/\text{god}$ do 10 $\mu\text{Sv}/\text{god}$. Za neke uzorke, to su oko 1500 puta manje od vrijednosti koje primi inhalacijom radona [1].

Vrijednosti koncentracije radona u gradskim vodovodima Osječko-baranjske županije [12] do pet puta su veće u odnosu na koncentracije radona u flaširanim bocama vode. Razlog tomu je što radon u flaširanim vodama može difundirati kroz plastične boce čime se smanjuje njegova koncentracija u vodi.

LITERATURA

- [1] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), Sources and Effects of Ionising Radiation. Volume I: Sources. UNSCEAR 2008 Report to the General Assembly with scientific annexes. New York: United Nations, 2010.
- [2] 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.
- [3] Kim, SH., Hwang, WJ., Cho, JS., Kang, DR. (2016.) *Attributable risk of lung cancer deaths due to indoor radon exposure*. Annals of Occupational and Environmental Medicine.
- [4] Radolić, V., Vuković, B., Stanić, D., Katić, M. (2006.) National survey of indoor radon levels in Croatia. Journal of radioanalytical and nuclear chemistry, 269 (2006), 1, 87-90.
- [5] 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.
- [6] Narodne novine (2015) Pravilnik o prirodnim mineralnim, prirodnim izvorskim i stolnim vodama. Zagreb: Narodne novine d.d., 48/2015
- [7] Izvoz i dalje uspješno tuče uvoz (<http://www.poslovni.hr/hrvatska/izvoz-voda-i-dalje-uspjesno-tuce-uvoz-310572>) [Preuzeto: 20.9.2018.]
- [8] Hrvatska ima najviše vode u EU, ali je Hrvati plaćaju skuplje od drugih (<https://www.glasistre.hr/69834b75-a9b4-4253-be8b-6294de0cd58f>) [Preuzeto: 20.9.2018.]
- [9] Todorović N, Jakonić I, Nikolov J, Hansman J, Vesković M, *Establishment of a method for ^{222}Rn determination in water by low-level liquid scintillation counter*, Radiation Protection, Dosimetry , 1-5. doi:10.1093/rpd/ncu240., 2014.
- [10] Vuković, S. (2017.) *Kalibracija tečnog scintilacionog detektora za merenje ^{222}Rn u vodi*. Diplomski rad. Novi Sad, Srbija: Univerzitet u Novom Sadu, Prirodno-matematički fakultet, Departman za Fiziku.
- [11] Crljen, Ž. (2007.) *Radon u flaširanim bocama hrvatskih proizvođača*. Diplomski rad. Osijek: Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Odjel za fiziku.

- [12] 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.
- [13] Bajkovec, J. (2015.) *Radon u kućama u Međimurskoj županiji*. Diplomski rad. Osijek: Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Odjel za fiziku.
- [14] Bronzović i Marović, (2003) ^{226}Ra u flaširanim vodama hrvatskih proizvođača, Zbornik radova V. Simpozija HDZZ-a, Eds. Ines Krajcar Bronić, Saveta Miljanić, Bogomil Obelić, Stubičke Toplice, 2003, 203-207.
- [15] Faj, Z., *Pregled povijesti fizike*, Drugo dopunjeno izdanje, Sveučilište J.J.Strossmayera, Pedagoški fakultet, Osijek, 1999.
- [16] Marinkov, L. *Osnovi nuklearne fizike*. Univerzitet u Novom Sadu, Prirodno-matematički fakultet, Departman za fiziku, Novi Sad, 2010. str. 68.-70.
- [17] Nikolov, J., Todorović, N., Forkapić, S., Bikit, I., Mrđa, D., Krmar, M., Vesković, M. *Merenje radona u pijaćim vodama*, Zbornik radova XXVI Simpozijum DZZ SCG, Univerzitet u Novom Sadu, Prirodno-matematički fakultet, Departman za fiziku, Novi Sad, 2011., str. 145-148.
- [18] Radolić, V. (2000) *Mjerenje radona i radonovih potomaka u zraku pri različitim koncentracijama aerosola*, Magistarski rad, PMF, Zagreb.
- [19] Radolić, Šimatović i Miklavčić (2008) *Radon u vodi gradskih vodovoda u naseljima Osječko-baranjske županije*, Zbornik radova VII. Simpozija HDZZ-a, Eds. Delko Barišić, Željko Grahek, Ines Krajcar Bronić, Saveta Miljanić, Opatija, 2008, 300-306
- [20] Ražen, D. *Odjeci otkrića radioaktivnosti u Hrvatskoj*, Zbornik radova Trećeg simpozija HDZZ-a, Institut "Ruđer Bošković", Zagreb, 1996., str. 27.-32.
- [21] *QuantaSmart For The TriCarb Liquid Scintillation Analyzer Reference Manual*, PerkinElmer, Inc., 2004.

ŽIVOTOPIS

Matea Bošnjaković rođena je 11. travnja 1994. godine u Bruggu u Švicarskoj. Pohađala je osnovnu školu „Vladimira Nazora" u Feričancima nakon koje nastavlja školovanje u općoj gimnaziji u srednjoj školi „Isidora Kršnjavoga" u Našicama. Uvijek je voljela prirodne znanosti, te se 2013. godine upisuje na preddiplomski studij fizike na Odjelu za fiziku u Osijeku. Nakon završetka preddiplomskog studija, 2016. godine upisuje diplomski studij fizike i informatike na Odjelu za fiziku u Osijeku.