

MJERENJE KONCENTRACIJE AKTIVNOSTI RADONA U BUNARSKOJ VODI DIJELA OPĆINE VALPOVO

Pavošević, Mirjam

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

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:160:532063>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-30**



Repository / Repozitorij:

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



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
ODJEL ZA FIZIKU**

MIRJAM PAVOŠEVIĆ

**MJERENJE KONCENTRACIJE AKTIVNOSTI RADONA
U BUNARSKOJ VODI DIJELA OPĆINE VALPOVO**

Završni rad

Osijek, 2020.

„Ovaj završni rad je izrađen u Osijeku pod vodstvom doc.dr.sc. Marine Poje Sovilj u sklopu Sveučilišnog preddiplomskog studija fizike na Odjelu za fiziku Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku“.

MJERENJE KONCENTRACIJE AKTIVNOSTI RADONA U BUNARSKOJ VODI DIJELA OPĆINE VALPOVO

MIRJAM PAVOŠEVIĆ

Sažetak

Radon je prirodno prisutan radioaktivni plemeniti plin koji se može akumulirati u zatvorenim objektima (kuće, poslovni i javni prostori, škole, vrtići). Radon je plin bez boje, mirisa i okusa i stoga je mjerenje jedini način da odredimo njegovu koncentraciju aktivnosti u zraku u uzorku. Udisanje radona povećava rizik od karcinoma pluća, a radon je vodeći uzročnik karcinoma pluća kod nepušača (dok je kod pušača drugi uzročnik iza pušenja, a s pušenjem ima sinergijski učinak).

Radon u zatvorene objekte ulazi primarno iz tla ispod objekta, a manji dio iz građevinskog materijala i vodovodne mreže. Radon se iz okolnog tla otapa i akumulira u vodi – posebno bunarima (voda koja se tehnološki ne obrađuje). Kada se takva voda koristi za tuširanje, pranje suđa i drugo, radon izlazi iz tekuće u plinovitu fazu u zrak (kao kada CO₂ izlazi iz gaziranih pića prilikom otvaranja) gdje ga onda opet udišemo. Dio radona ostaje otopljen u vodi, koji onda doprinosi dozi ingestije, a upravo će ta problematika biti predmet ovoga rada. Mjerit će se koncentracija aktivnosti radona u uzorcima bunarske vode korištene u kućanstvima u dijelu općine Valpovo.

MEASURING RADON ACTIVITY CONCENTRATION IN THE WELL WATER SAMPLES IN THE PART OF VALPOVO MUNICIPALITY

MIRJAM PAVOŠEVIĆ

Abstract

Radon is a naturally occurring radioactive noble gas that can accumulate in closed facilities (such as houses, business and public spaces, schools, kindergartens). Radon is invisible, odourless and tasteless so measurement is the only way to determine its activity concentration in the sample. Inhalation of radon increases the risk of lung cancer, and radon is a leading cause of lung cancer in non-smokers (while in smokers it is the second leading cause after smoking, and with smoking it has a synergistic effect).

Radon enters closed facilities primarily from the ground beneath the facility, and to a lesser extent from building materials and the water supply network. Radon dissolves from the surrounding soil and accumulates in water - especially wells (water that is not technologically treated). When such water is used for showering, washing dishes, etc., radon transforms from the liquid to the gaseous phase into the air (as when CO₂ exits from carbonated beverages when opened) where we then inhale it again. Part of the radon remains dissolved in water, which contributes to ingestion dose, and this issue will be the subject of this paper. The concentration of radon activity in samples of well water used in households in the part of the municipality of Valpovo will be measured.

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. RADON.....	2
2.1. Podrijetlo radona.....	3
2.2. Fizikalna, kemijska i radiološka svojstva	4
2.3. Radon u vodi.....	4
2.4. Zdravstveni rizici povezani s unosom radona	6
3. RADIOAKTIVNI RASPAD	8
3.1. Zakon radioaktivnog raspada.....	8
3.2. Vrste radioaktivnog raspada	9
3.2.1. Alfa raspad	9
3.2.2. Beta raspad	11
3.2.3. Gama raspad	12
3.3. Dozimetrija	13
4. METODE MJERENJA AKTIVNOSTI KONCENTRACIJE U VODI	16
4.1. Gama spektrometrija.....	16
4.1.1. HPGe Gama spektrometar.....	16
4.2. Emanometrija.....	17
4.3. Tekućinski scintilacijski detektori (LSC)	17
5. MJERENJE AKTIVNOSTI RADONA POMOĆU UREĐAJA TRICARB 2900	20
5.1. TriCarb 2900 scintilacijski brojač	20
5.2. Rezultati mjerenja uzoraka vode iz bunara i potoka „Belih sela“ pomoću uređaja TriCarb 2900.....	25
6. ZAKLJUČAK.....	29

7. LITERATURA.....	30
8. POPIS SLIKA.....	31
9. POPIS TABLICA.....	32
10. ŽIVOTOPIŠ.....	33

1. UVOD

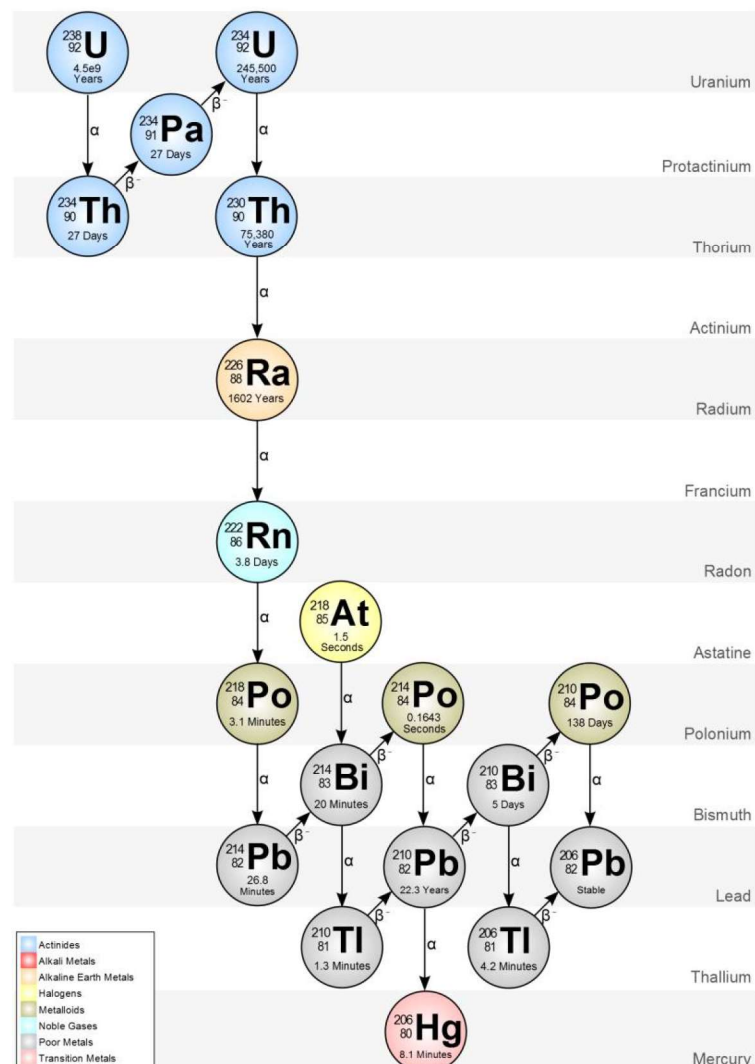
Zračenje je svuda oko nas i prirodni je dio okruženja u kojem živimo. Svi ljudi na svijetu izloženi su određenoj dozi zračenja koje dolazi od prirodne radioaktivnosti iz zraka, zemlje, hrane i vode. Prirodni izvori zračenja odgovorni su za veliku većinu izloženosti zračenju, a najveći dio prirodnog zračenja dolazi od radioaktivnog, plemenitog plina radona. Radon nastaje u tlu, a član je radioaktivnog niza uranija (^{238}U). Direktni je produkt radioaktivnog raspada radija (^{226}Ra) uz emisiju alfa čestice. Uranij se također kao prirodni mineral nalazi u stijenama i zemlji te se stoga može zaključiti da je radon, kao produkt njegovoga raspada, prisutan gotovo posvuda na Zemlji. Međutim, kao i sa svime, kada se na jednom mjestu stvori prevelika koncentracija, tada radon predstavlja rizik za zdravlje ljudi i životinja. Primjerice, kako navodi Alina i sur. (2012.), radon je nakon duhanskog dima drugi vodeći uzrok raka pluća. Unatoč činjenici da se koncentracija radona u vodi može smanjiti prokuhavanjem vode, otopljena količina u podzemnim vodama može biti oslobođena u zrak tijekom kućanskih aktivnosti poput tuširanja, pranja suđa i rublja. Na taj način postoji mogućnost da se koncentracija radona u zatvorenim prostorima poveća i akumulira do razine koja postaje opasna ako je izloženost kontinuirana. (Inacio i sur., 2017.)

Iako je pijenjem vode koja sadrži visoku koncentraciju radona manja vjerojatnost oboljenja od karcinoma nego udisanjem radona oslobođenog iz vode, 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 produkata čijim se pitanjima bave Međunarodna agencija za atomsku energiju (IAEA), Međunarodna komisija za radiološku zaštitu (ICRP) i Svjetska zdravstvena organizacija (WHO).

Cilj je ovoga rada upoznati se s općim teorijskim dijelom vezanim za radioaktivnost, svojstvima radona, potencijalnim opasnostima koje mogu biti posljedica povećane koncentracije radona u vodama te mjernim metodama kojima je moguće ustanoviti koncentraciju aktivnosti. Poseban fokus je na metodi mjerenja tekućinskim scintilacijskim brojačem TriCarb2900, koji će također biti upotrijebljen kao glavni mjerni uređaj za eksperimentalni dio ovoga rada.

2. RADON

Radon je kemijski element simbola Rn i atomskog broja 86. U prirodi postoje tri izotopa radona (radon – ^{222}Rn , toron – ^{220}Rn , aktinon – ^{219}Rn) koji su članovi radioaktivnih nizova ^{238}U , ^{232}Th , ^{235}U . Zbog kratkog vremena poluraspada, vrijednosti torona i aktinona se uglavnom zanemaruju. Radon ^{222}Rn , potomak uranija ^{238}U nastaje radioaktivnim raspadom radija ^{226}Ra koji se nalazi u tlu i stijenama, i nalazimo ga posvuda u zemljinoj kori. Vođen različitim transportnim mehanizmima, lako izlazi iz tla u zrak.



Slika 1. Lanac radioaktivnog raspada uranija ^{238}U (PhysicsOpenLab)

2.1. Podrijetlo radona

Tijekom proučavanja raspada radija 1900., njemački je kemičar Friedrich Ernst Dorn otkrio radon, koji je originalno nazvan niton (lat. nitēre = sjajiti) te je tek 1923. dobio ime radon. Danas se radon primarno dobiva raspadom radija, obično alfa raspadom. Iako sam radon ima relativno kratak vijek poluraspada, produkti njegovog raspada imaju duži životni vijek te mogu zaostati na česticama prašine i biti udahnuti pa iz tog razloga postoji razlog za brigu u domaćinstvima, odnosno zatvorenim prostorima. Također, radon u zatvorene prostore dolazi i kao posljedica raspada torija i uranija. Najstabilniji izotop radona je ^{222}Rn , čije je vrijeme poluraspada 3,8 dana, a raspada se u ^{218}Po alfa raspadom.

(PubChem, 2020)

2.2. Fizikalna, kemijska i radiološka svojstva

Radon je jednoatomni plemeniti plin bez boje i mirisa. Najgušći je plin, oko 8 puta gušći od zraka pri sobnoj temperaturi. Radioaktivan je, jako radiotoksičan i kancerogen ako se udiše. Ukapljuje se pri temperaturi $-61,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ te počinje pokazivati radioluminiscenciju, a u čvrsto stanje plošno centrirane kubične rešetke prelazi pri $-71\text{ }^{\circ}\text{C}$. U čvrstom stanju svijetli intenzivno žutom bojom koja pri temperaturama nižim od $-180,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ postupno prelazi u narančastocrvenu boju.

Tablica 1. Fizička, kemijska i radiološka svojstva radona (Keith et al, 2012.)

Svojstvo:	Radon
Molekularna masa	222 (radon), 220 (toron), 219 (aktinon)
Boja	Bezbojno
Agregatno stanje	Plin na $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ i 760 mm Hg

Talište	-71 °C	
Vrelište	-61.8 °C	
Gustoća na -20 °C	9.96*10 ⁻³ g/cm ³	
Miris	Bez mirisa	
Topljivost:		
U vodi na 20 °C	230 cm ³ /L	O'Neil et al. 2006
Organska otapala	Organske tekućine, djelomično topljiv u etanolu	Weast 1980
Tlak pare na 25 °C ^a	395.2 mm Hg	Cothorn 1987a
Zapaljivost:	Plemeniti plin; nije zapaljiv	
Polu-raspad:		
²²² Rn	3.8235 dana	DOE 2008
²²⁰ Rn	55.6 sekundi	DOE 2008
²¹⁹ Rn	3.96 sekundi	DOE 2008

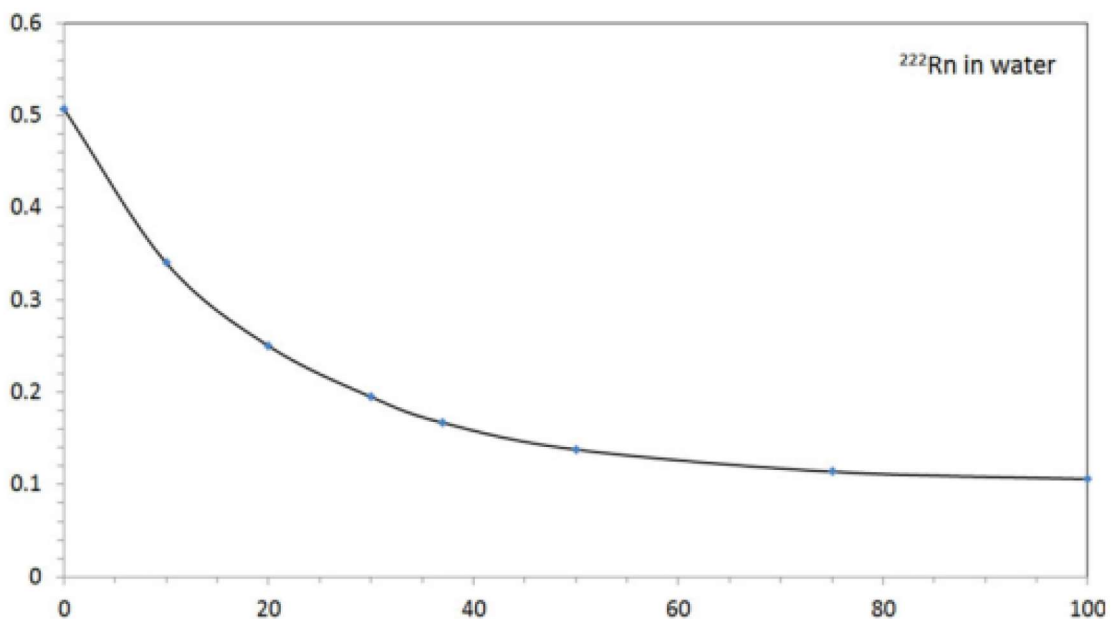
2.3. Radon u vodi

Koncentracije aktivnosti radona u vodi mogu imati različite vrijednosti. U vodama poput rijeka i jezera, koncentracija aktivnosti radona je uglavnom niska, dok je u podzemnim vodama koncentracija aktivnosti radona puno viša što je posljedica kemijskog sastava i geoloških formacija vodonosnika. Kako je već spomenuto, visoke koncentracije radona otopljene u podzemnim

vodama mogu dospjeti u kućanstva prilikom tuširanja, pranja rublja, kuhanja, puštanja vode, pranja posuđa i sličnih aktivnosti. (Wu i sur., 2017.)

Na taj način ljudi inhaliraju radon koji je prešao iz tekuće u plinovitu fazu, ali ga unose i ingestijom pijući vodu u kojoj je otopljen.

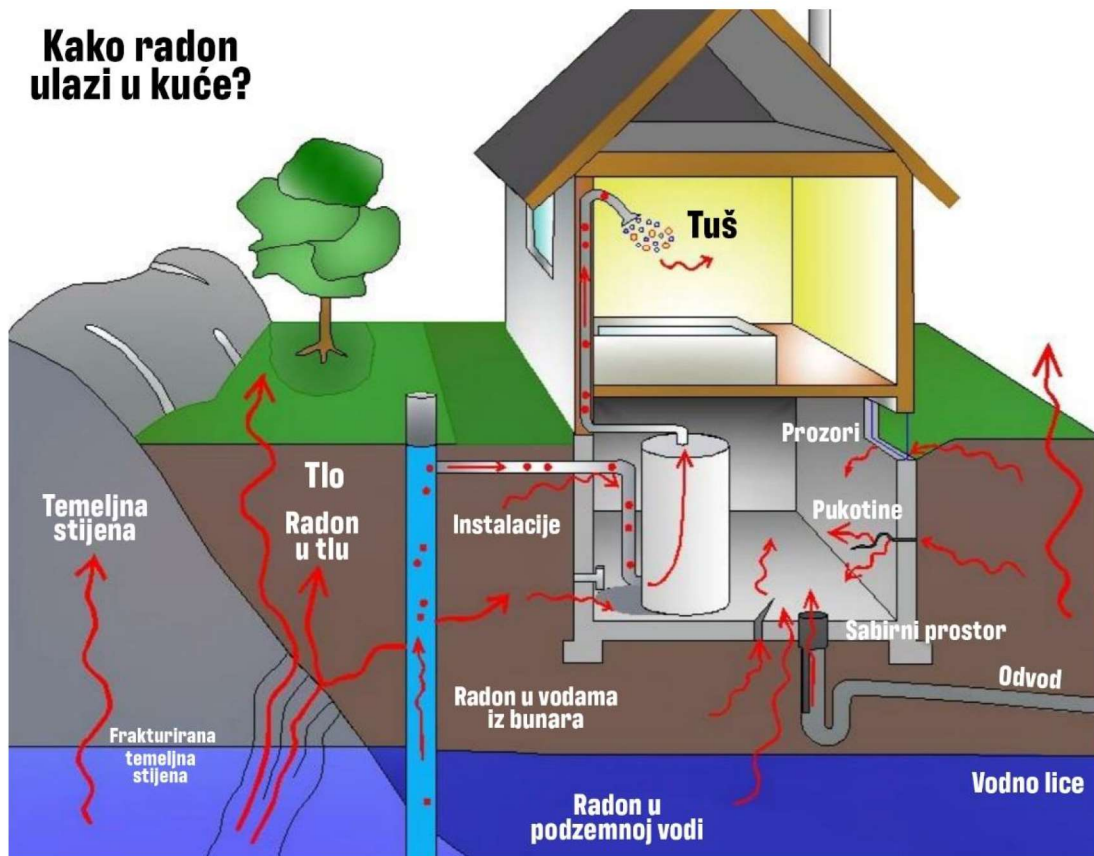
Topljivost radona u vodi relativno je niska, a iznosi $0,01 \text{ mol kg}^{-1} \text{ bar}^{-1}$ pri temperaturi od 293 K, dok se, kako prikazuje Chen (2019.) (Slika 2.), topljivost s porastom temperature drastično smanjuje. Topljivost se obično izražava koeficijentom raspodjele (L) izotopa ^{222}Rn između čistog otapala i zraka. Koeficijent raspodjele izotopa ^{222}Rn u vodi iznosi otprilike 0,23 – 0,25 pri 293 K. Afinitet radona prema organskim otapalima i uljima je veći, npr. za etanol koeficijent raspodjele je približno 6. Međutim, bez obzira na relativno slabu topljivost radona u vodi, koncentracija aktivnosti u vodama je uglavnom veća od drugih prirodnih radionuklida. (Jobbagy i sur., 2016.)



Slika 2. Koeficijent topljivosti radona u odnosu na temperaturu vode (Chen, 2019.)

2.4. Zdravstveni rizici povezani s unosom radona

Glavni izvor radona u domaćinstvima prisutan je u zemljištu, građevinskom materijalu i vodi iz slavine (Slika 3.). S obzirom da je plin, ima tendenciju difundirati iz građevinskog materijala i zemljišta na kojem je objekt sagrađen. Moguć je prolazak kroz pukotine zidova, nagomilavanje i taloženje u zatvorenim prostorima i podrumima kuća te stoga može predstavljati značajan problem za zdravlje ljudi.



Slika 3. Načini ulaska radona u zatvorene objekte. (Family Action Network)

Kada govorimo o radonu u vodi koja se koristi u kućanstvu, s obzirom na to da se vrši aeracija vodovodne vode, udio radona je obično vrlo malen te kao takav ne predstavlja potencijalnu ugrozu

za ljudsko zdravlje. Međutim, domaćinstva koja imaju privatne bunare, posebno u područjima s visokim koncentracijama radija u zemljištu, najčešće imaju i povećanu koncentraciju aktivnosti radona u vodi u tim bunarima. Ukoliko se u takvoj vodi nalazi povišena koncentracija radona, a ne provodi se postupak aeracije, utoliko posljedično dolazi i do povišenja koncentracije radona i njegovih potomaka unutar kuća. (Stojković, 2015.)

Stoga, možemo zaključiti kako će podzemna voda koja se koristi direktno s točke izviranja imati puno veću koncentraciju radona nego što je to vodovodna voda ili voda koja je prirodno prošla proces aereacije u toku njenog kretanja. S obzirom na navedeno, postoji potreba za kontrolom koncentracije radona u vodama na izvorištima i javnim pipama, koja je definirana Zakonom o radiološkoj i nuklearnoj sigurnosti (NN, 141/2013).

Zasad se sa sigurnošću može reći da rizik u najvećoj mjeri predstavlja inhalacija u zatvorenim prostorima. Rizik od raka pluća izazvan pušenjem puno je veći nego rizik od raka pluća izazvan inhalacijom radona u zatvorenim prostorima. Međutim, uočeno je da izlaganje radonu i duhanskom dimu može imati sinergijski učinak, posebno iz razloga što se potomci radona često vežu na čestice dima i prašine (aerosol), a zatim talože na plućima. (Biermann i Sawyer, 1995.)

Ipak, ne zanemaruje se činjenica da ingestijom kroz hranu i piće može prouzročiti neželjene efekte na zdravlje kada se apsorbira u krvotok. Biološki efekti pri izloženosti radonu uključuju štetu na molekulama DNA koja rezultira brisanjem i preraspodjelom kromosomskih regija te vode do genetskih nestabilnosti povezanih s progresijom tumora. (Hopke i sur., 2000.)

3. RADIOAKTIVNI RASPAD

Radioaktivnost ili radioaktivno zračenje spontano je emitiranje zračenja iz nestabilne jezgre, pri čemu se oslobađa energija u obliku kinetičke energije produkata raspada kako bi se postigla veća stabilnost atomske jezgre. Prevelik broj neutrona u jezgri vodi do emitiranja negativne beta čestice, koja mijenja jedan neutron u proton. Prevelik broj protona u jezgri dovodi do emisije pozitrona, tj. pozitivno nabijenog elektrona, mijenjajući jedan proton u neutron. Previše energije dovodi do emisije gama zraka, posljedica čega je otpuštanje velike energije bez promjene čestica u jezgri. Prevelika masa dovodi do emisije alfa čestica, odbacujući dva protona i dva neutrona. (The Office of Human Radiation Experiments, 2020.). Dakle, radioaktivni raspad je pretvaranje jedne atomske jezgre u drugu uz emitiranje alfa-čestica, beta-čestica i/ili gama-zračenja. Već prema vrsti, to pretvaranje može biti alfa raspad, beta raspad i elektronski uhvat. Rjeđe se događaju raspad emisijom jednog ili dva protona, neutrona, a teže jezgre mogu pri raspadu emitirati i ugljik ^{14}C . Neke su atomske jezgre prirodno nestabilne, a neke to mogu postati pošto su na njih djelovale čestice velike energije.

Zračenje izaziva snažno biološko djelovanje jer uništava stanice. Djelovanje može biti izravno na DNA stanice ili posredno djelovanjem na atome okolnog sustava, npr. vode, čime se stvaraju ioni ili slobodni radikali koji dalje uništavaju stanice. Ukupni učinci zračenja na žive jedinice dijele se na somatske i genetske. Posljedice somatskog učinka mogu biti značajne promjene krvne slike, oštećenje kože te dugoročne posljedice kao što su leukemija, razne vrste malignih bolesti, smanjenje plodnosti i posljedično kraći životni vijek. Učinak visokih doza na čovjeka ovisi koliko je dugo ozračivanje trajalo, kojim intenzitetom, događa li se kontinuirano itd. Posljedice genetskih učinaka na potomstvo obuhvaćaju oštećenja spolnih stanica i mutaciju gena. (Franić i sur., 1999.)

3.1. Zakon radioaktivnog raspada

Iako se stvarno vrijeme života pojedine jezgre ne može predvidjeti, srednje (ili prosječno) vrijeme života nekog uzorka jednakih jezgri može biti izmjereno i predviđeno. Jednostavan način određivanja vremena života nekih izotopa je mjerenje vremena raspada polovice jezgri tog promatranog uzorka. To se vrijeme naziva vremenom poluraspada, $t_{1/2}$. Od originalnog broja jezgri koje se nisu raspale, njih polovica će se raspasti ako čekamo drugi interval vremena poluraspada

pa ih ostaje jedna četvrtina. Za još jedan interval vremena poluraspada ostat će ih samo osmina neraspadnutih, i tako dalje.

Broj jezgri nekog uzorka koji će se raspasti u određenom vremenskom intervalu je razmjeran broju jezgri tog uzorka. To vodi na zaključak da je proces radioaktivnog raspada eksponencijalni proces. Broj N atomskih jezgri koje su ostale neraspadnute nakon vremena t , u odnosu na izvorni broj jezgri N_0 , je:

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda t} = N_0 \cdot e^{-t/T}$$

gdje se λ naziva konstanta radioaktivnog raspada i vrijedi:

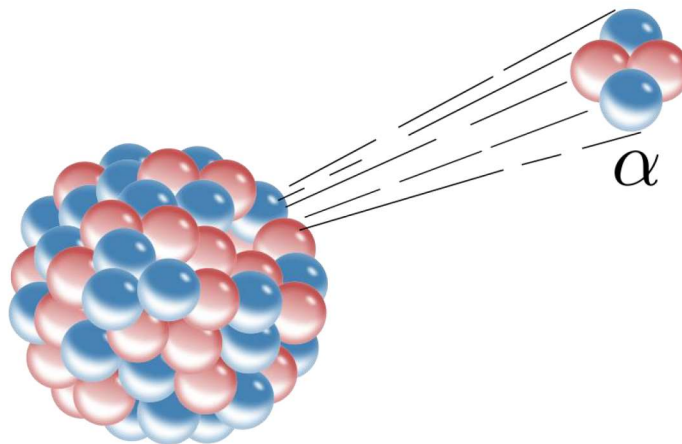
$$T = 1/\lambda$$

a mjerna jedinica je recipročna sekunda, s^{-1} .

3.2. Vrste radioaktivnog raspada

3.2.1. Alfa raspad

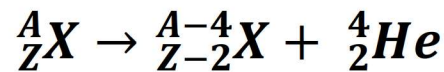
Alfa (α) raspadom se većinom raspadaju teške nestabilne jezgre. α čestica izgleda kao jezgra helija (${}^4_2\text{He}$) i predstavlja čvrsto vezan sustav od dva protona i dva neutrona (Slika 4.).



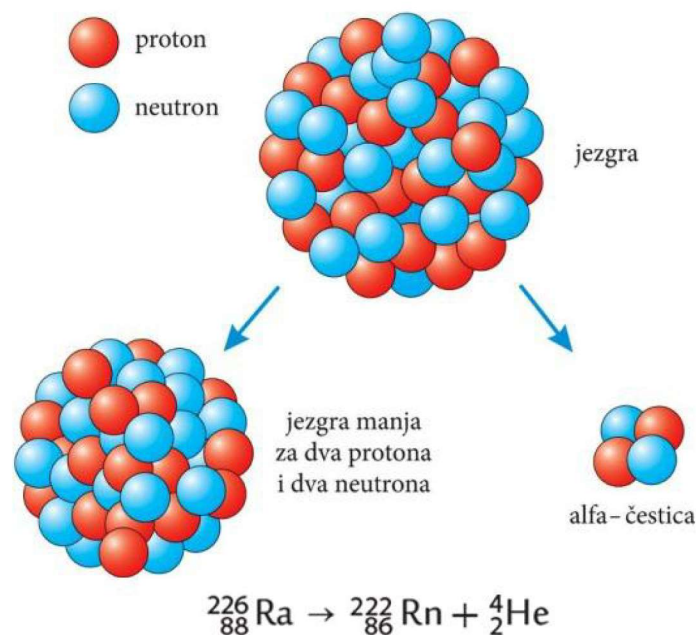
Slika 4. Emisija alfa čestica, dva neutrona i dva protona (Wikipedia)

Kada teška jezgra emitira α česticu ona izgubi dva protona i dva neutrona i dolazi do transmutacije atomske jezgre. Pri tome se broj neutrona smanji i protonski broj smanje za dva, dok se maseni broj smanji za 4. Po emisiji α čestice nastaje novi element koji se u periodnom sustavu elemenata pomjera za dva mjesta u lijevo.

Shematski prikaz:



Primjer alfa emitera je radij ${}^{226}_{88}Ra$ koji u stabilnije stanje prelazi emisijom alfa čestice pri čemu nastaje plin radon ${}^{222}_{86}Rn$ (slika 5.) 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).



Slika 5. Alfa raspad radija (Radioaktivni otpad, radioaktivnost)

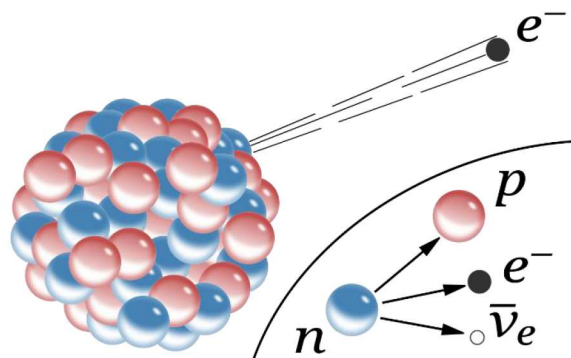
Bez obzira na ogromnu energiju koju nosi alfa čestica (u intervalu od 4-10 MeV), zbog svoje relativno velike mase i dva pozitivna elementarna naboja, međudjelovanje sa tvari kroz koju prolazi je izrazito jako pa domet alfa čestica u zraku iznosi približno od 2-8 cm. U tkivu čovjeka domet iznosi tek oko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

Hoće li alfa čestice predstavljati opasnost za zdravlje ovisi o tome na koji način je organizam njima izložen. Primjerice, alfa čestice nemaju dovoljnu energiju kako bi prošle kroz vanjske dijelove

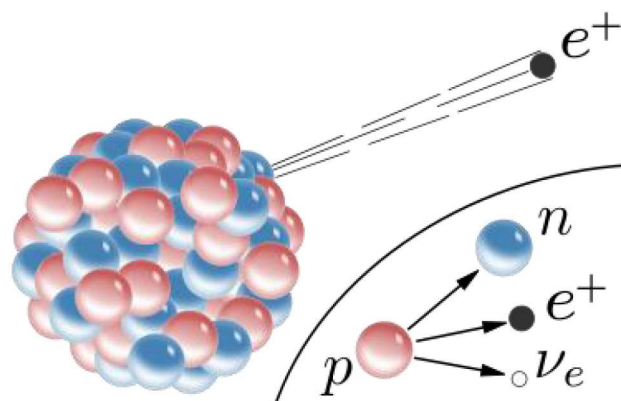
kože te predstavlja puno manju opasnost nego kada su čestice izravno udahnute ili unesene putem hrane i pića te dolaze u krvotok. Najveći izvor alfa zračenja općenito dolazi od radona i njegovih potomaka.

3.2.2. Beta raspad

Za radioaktivnog raspada neutron se može pretvoriti u proton i obratno. Pritom nastaje struja elektrona ili pozitrona, koju zovemo beta zrakama. Za sada su poznate dvije vrste beta raspada, a to su beta plus raspad (β^+) i beta minus raspad (β^-). Beta minus raspad nazivamo još i elektronskim zračenjem, a kod te vrste raspada nestabilne atomske jezgre koje imaju višak neutrona mogu spontano ostvariti raspad, gdje se neutron raspada u proton, uz zračenje elektrona i antineutrina (elektronski antineutrino ili antičestica neutrina). Beta minus raspad (Slika 6.) nastaje zbog djelovanja slabe nuklearne sile, dok se kod beta plus raspada (Slika 7.) nestabilne jezgre koje imaju višak protona mogu spontano raspasti. (Lukanec, 2015.)



Slika 6. Beta minus raspad (Wikipedia)



Slika 7. Beta plus raspad (Wikipedia)

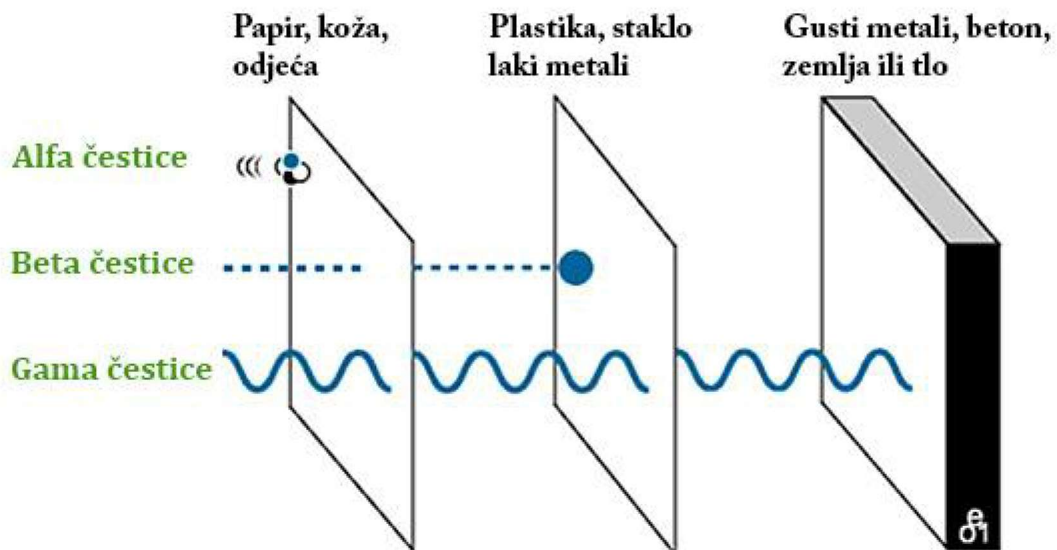
Nadalje, općenito možemo reći da je prodornost beta čestica veća od alfa čestica, ali zbog svoje manje mase ne djeluje tako razorno poput alfa čestica. Međutim, s obzirom da su u stanju prodrijeti dublje, mogu izazvati štetu poput opekline na koži. Također, baš kao i alfa čestice, najopasnije su kada se u organizam unose ingestijom ili inhalacijom.

3.2.3. Gama raspad

Gama zrake, koje su zapravo elektromagnetski valovi, gibaju se brzinom svjetlosti, ali su od nje mnogo energičnije i prodornije (slika 8.). Pomoću njih se jezgra oslobađa od viška energije – onako kako se molekula svoje energije oslobađa u obliku svjetla. Rijetko ih nalazimo same, a vrlo često uz alfa i beta zrake.

Slično kao rendgensko zračenje, gama-zračenje primjenjuje se u industriji (za ispitivanje materijala) i medicini (za liječenje tumora). Zbog baktericidnoga djelovanja služi i za sterilizaciju prostora i medicinske aparature; primjenjuje se i za izazivanje genetskih mutacija kod biljaka i mikroorganizama (za proizvodnju antibiotika). (Enciklopedija.hr, 2020)

S obzirom na svoju prodornost, gama zrake mogu biti vrlo destruktivne za cijeli ljudski organizam.



Slika 8. Prikaz prodornosti zračenja (Radioaktivni otpad, radioaktivnost)

3.3. Dozimetrija

Mjerenje i računanje energije koju zračenje predaje tvari, proučavanje utjecaja različitih vrsta ionizirajućega zračenja na tvari, tkiva i organe i mjerenje brzine raspadanja radioaktivne tvari naziva se dozimetrija. Mjerna jedinica za aktivnost radioaktivnog uzorka je bekerel (Bq). Aktivnost od 1 Bq znači jedan radioaktivni raspad u sekundi, tj. $1 \text{ Bq} = 1 \text{ s}^{-1}$. S obzirom da je aktivnost uzoraka često vrlo velika, koristi se i veća jedinica Kiri (Ci). 1 Ci iznosi $3,7 \cdot 10^{10}$ Bq.

Aktivnost izvora zračenja računa se prema formuli:

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

gdje je: $\frac{dN}{dt}$ = broj atoma koji se raspada u jedini vremena

λ = konstanta radioaktivnog raspada

Razlikujemo dva pojma doze zračenja:

Apsorbirana doza zračenja

Ekvivalent doze zračenja

Apsorbirana doza zračenja (D) definira se kao:

$$D = \frac{dE_D}{dm}$$

dE_D = energija koju ionizirajuće zračenje predaje ozračenju tvari mase dm u nekom volumenu

Jedinica za apsorbiranu dozu zračenja je Gray (Gy)

$$1 \text{ Gy} = 1 \text{ J kg}^{-1}$$

1 Gy je doza zračenja kojom se tijelu mase 1 kg unese energija od 1 J

Brzina apsorbirane doze je dD/dt , jedinica za brzinu apsorbirane doze je: Gy s^{-1} ili Gy h^{-1}

Ekvivaletna doza – različiti tipovi zračenja mogu isporučiti istu dozu (energiju po jedinici mase), ali ne uzrokuju iste biološke efekte. $H_T = \sum_R w_R D_{T,R}$

Različiti materijali izloženi istoj ekspoziciji zračenja apsorbiraju različitu energiju što ovisi o svojstvima materijala i energetsom spektru zračenja. Ekvivalentna doza zračenja izražava biološki utjecaj apsorbirane doze tako da apsorbiranu dozu množi s numeričkim faktorom RBE-relativni biološki utjecaj. RBE=1 za X-zrake i elektrone, RBE=5 za spore neutrone, RBE=20 za alfa zrake.

Tablica 2. Težinski faktor ozračivanja za tkiva prema ICRP 2006. godine.

Vrsta i energije zračenja	Težinski faktor zračenja, w_R
Fotoni, svih energija	1
Elektroni i mioni, svih energija	1
Protoni, svih energija	2
α čestice, svih energija	20
Neutroni, energije < 10 keV	
Neutroni, energije 10 – 100 keV	
Neutroni, energije 100 keV – 2 MeV	
Neutroni, energije 2 MeV – 20 MeV	
Neutroni, energije > 20 MeV	

SI jedinica ekvivalentne doze je 1 sivert (Sv). Sivert se izražava u istim jedinicama kao i 1 Gy.

$$1 \text{ Sv} = 1 \text{ J kg}^{-1}$$

Preporuka je da prosječna osoba koja ne radi u polju zračenja ne bude izložena efektivnoj dozi zračenja većoj od 1 mSv u godini dana. Studije pokazuje da biološka oštećenja izazvana zračenjem jako ovise o tipu zračenja. Ista doza alfa zračenja uzrokuje više oštećenja nego jednak doza protona, a više nego ista doza elektrona ili gama zraka.

Na temelju članka 24. Zakona o radiološkoj i nuklearnoj sigurnosti (»Narodne novine«, br. 38/18) i Pravilnika o granicama ozračivanja, definirane su granične doze svih dozimetrijskih veličina koje se prate:

Članak 4.

(1) Efektivna doza izloženog radnika ne smije biti viša od 20 mSv u jednoj godini.

(2) Uz uvjet iz stavka 1. ovoga članka primjenjuju se sljedeće granice za ekvivalentnu dozu izloženih radnika:

1. ekvivalentna doza za leću oka izloženog radnika ne smije biti viša od 20 mSv u jednoj godini ili od 100 mSv u bilo kojih pet uzastopnih godina pri čemu maksimalna ekvivalentna doza za leću oka u jednoj godini petogodišnjeg razdoblja ne smije biti viša od 50 mSv

2. ekvivalentna doza za kožu izloženog radnika ne smije biti viša od 500 mSv u jednoj godini usrednjena preko 1 cm² površine bilo kojeg dijela kože, neovisno o površini koja je ozračena

3. ekvivalentna doza za ekstremitete izloženog radnika ne smije biti viša od 500 mSv u jednoj godini.

Instrumenti kojima se mjeri doza zračenja koju primi neki materijal ili tijelo nazivaju se dozimetri. Princip rada zasniva se na mjerenju nekog od učinka ionizirajućeg zračenja na primjer: ionizacije, toplinskog gibanja (topline), emitiranja svjetla, kemijske promjene odnosno promjene boje zbog kemijske reakcije.

4. METODE MJERENJA KONCENTRACIJE AKTIVNOSTI RADONA U VODI

Nekoliko je načina za određivanje koncentracije aktivnosti radona u vodi. Svima je zajednička potreba za posebno pažljivo rukovanje s uzorcima. Naime, 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, jer radon vrlo lako difundira u plinovitu fazu.

4.1. Gama spektrometrija

Gama spektroskopija je tehnika koja proučava određeni radioaktivni uzorak pomoću analize spektra gama zraka koje radionuklidi emitiraju pri raspadu. Aktivnost koncentracije ^{222}Rn preračunava se iz mjerenja produkata dobivenih raspadom, ^{214}Bi i ^{214}Pb . S obzirom da su potomci radona kratkoživuci, radioaktivna ravnoteža¹ postiže se unutar tri sata. Međutim, ako je ^{226}Ra prisutan u uzorku, nastat će i ^{222}Rn pa je potrebno napraviti i drugo mjerenje nakon uspostavljanja radioaktivne ravnoteže između ta dva izotopa. S obzirom da potonji ima vrijeme poluraspada gotovo 4 dana, to unosi dodatne komplikacije u proces.

Vjerojatno najčešće korišteni spektrometri su HPGe (High Purity Germanium) ili čvrsti scintilacijski detektori. Scintilacijski detektori bazirani na NaI uglavnom se koriste samo za praćenje i identifikaciju (eng. screening) zbog svoje slabe rezolucije, dok su HPGe detektori bolji za kvalitativnu i kvantitativnu analizu. Prilikom detekcije, gustoća uzorka i homogenitet ovise o temperaturi vode, drugim tvarima u vodi i mjehurićima zraka, koji utječu na efikasnost detekcije, kao i prisustvo radona u prostoriji koje može značajno varirati. (Jobaggy i sur., 2017)

4.1.1. HPGe Gama spektrometar

Germanijski detektori su poluvodičke diode formirane u p-i-n strukturu, u kojima je unutarnji dio (i) osjetljiv na ionizacijsko zračenje, posebno rendgenske i gama zrake. Između N-tipa i P-tipa germanija se formira ispražnjeni sloj u kojem nema slobodnih nositelja naboja. Dodatno jako

¹Radioaktivna ravnoteža nastaje kada se brzina nastajanja izjednačava sa brzinom nestajanja za sve članove u nizu, osim prvog i posljednjeg.

električno polje proširuje taj ispražnjeni sloj te ga čisti od slobodnih nositelja naboja koji nastaju termičkim gibanjem atoma germanija. Apsorpcija gama zrake unutar ispražnjenog 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.

Kako bi se proces mogao nesmetano odvijati, nužno je reducirati temperaturu detektora pomoću tekućeg dušika ili nekog drugog adekvatnog medija. Detektor se postavlja u vakuumsku komoru koja je spojena na tekući dušik. Površina osjetljivog detektora tako je zaštićena od vlage i kondenzacijskih kontaminanata.

4.2. Emanometrija

Emanometrija se bazira na otplinjavanju uzoraka popraćeno detekcijom alfa čestica na raznim detektorima. Kada se vrši otplinjavanje vode, ^{222}Rn dospijeva u ćeliju za mjerenje inertnim plinom, cirkulacijom zraka ili vakuumom. Detekcijske tehnike za određivanje aktivnosti koncentracije radona u plinu uključuju korištenje scintilacijskih ćelija, poluvodičkih silikonskih detektora ili ionizacijske komore.

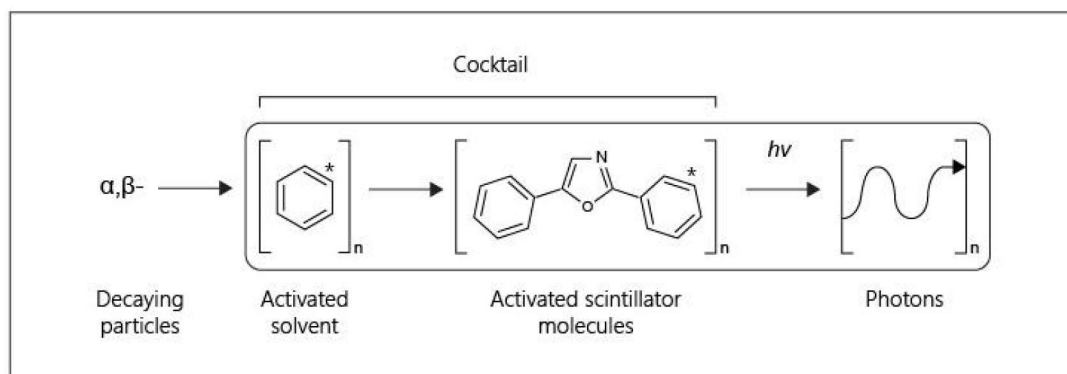
Vrlo je bitno provjeriti detektor kako nakupljeni produkti raspada ne bi ometali buduće analize. Također, tehnika je osjetljiva na temperaturu vode koja može utjecati na stupanj otplinjavanja tijekom transporta. Neki uzorci vode mogu sadržavati visoke doze ^{220}Rn koji također mogu biti preneseni na detekcijski sustav. Jedan od načina za otplinjavanje je staviti uzorak vode u ćeliju za otplinjavanje i unijeti zrak bez radona ili inertni plin u zatvoreni sustav. Na taj način, radon će biti izbačen iz uzorka te će uz pomoć pumpe preneseni do detektora. Aktivnost koncentracije radona u zraku bit će izmjerena te se inicijalna koncentracija u vodi preko toga može izračunati.

Na taj način se broj atoma za svaki izotop u nizu održava stalnim (Jobaggy i sur, 2017)

4.3. Tekućinski scintilacijski detektori (LSC)

LSC (Liquid scintillation counting) je analitička metoda mjerenja radioaktivnosti uzorka pomoću tehnike miješanja aktivnog materijala sa tekućinskim scintilatorom i brojanja resultantnih emisija fotona. Radionuklidi se miješaju s koktelom koji se sastoji od otapala i scintilatora (floura). Energija raspada se zatim transferira otapalu pa molekulama floura koje emitiraju svjetlost koja se mjeri pomoću fotomultiplikatora te se tako određuje aktivnost radionuklida. Originalna beta

energija proporcionalna je emitiranoj svjetlosti. LSC je najefektivniji (Slika 9.) kada se koristi za detekciju alfa i beta čestica, ali može detektirati i gama zrake.



Slika 9. Shematski prikaz principa rada LSC-a (Hidex, e-book)

S obzirom na to da je većina materijala neprozirna za vidljivu svjetlost, odabir materijala je zahtjevan posao. Scintilator mora propuštati valnu duljinu nastale svjetlosti tako da fotoni mogu putovati po scintilatoru, sve dok određeni dio njih ne doprije na fotokatu fotomultiplikatora gdje pri apsorpciji fotona dolazi do izbacivanja elektrona koji potom stižu na cijev fotomultiplikatora gdje se njihov broj višestruko povećava.

Postoje dvije vrste scintilatora - 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. (Todorović et al, 2014.)

Također, tekući su scintilatori iznimno osjetljivi na nečistoće u otopini. Ako 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. (Todorović et al, 2014.)

Postoje tri glavna tipa quench – fotonski, kemijski i optički. Fotonski quench događa se sa nepotpunim transferom energije beta čestica molekulama otapala. Kemijski, koji se događa gubitkom energije pri prijenosu sa otapala na otopljenu tvar, te optički kada dolazi do slabljenja nastalih fotona.

Nuklid		Učinkovitost[%]
Nisko energetski β-emiteri	³ H (19keV)	60 do 70*
	²¹⁰ Pb (17 ekV)	
	²⁴¹ Pu (20 keV)	
	⁶³ Ni (64 keV)	80
	¹⁴ C (156 keV)	90 do 95
	³⁵ S (167 keV)	90 do 95
Visoko energetski β-emiteri		95
Cerenkov	³² P (1.7 MkV)	45*
	⁸⁹ Sr (1.7 MkV)	30*
Nuklidi za hvatanje elektrona (⁵⁵ Fe, ⁴¹ Ca)		20 do 40*
α-emiteri (²²⁶ Ra + potomci, aktanidi)		100
γ-zračenje		1 do 5

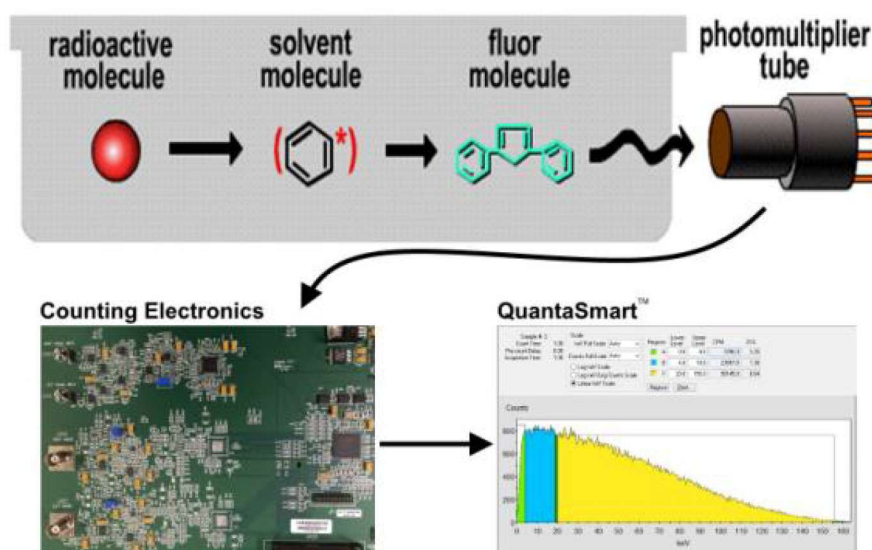
Slika 10. Efektivnost očitavanja radionuklida (Hidex, e-book)

5. MJERENJE KONCENTRACIJE AKTIVNOSTI RADONA POMOĆU UREĐAJA TRICARB 2900

Fokus ovoga rada je na mjernoj metodi pomoću uređaja TriCarb 2900, koji funkcionira po već spomenutom principu LSC uređaja. U sljedećih nekoliko poglavlja bit će prikazan princip mjerenja i funkcioniranja uređaja.

5.1. TriCarb 2900 scintilacijski brojač

Jedna od značajki detektora TriCarb 2900 (slika 11.) je da se svim funkcijama upravljati u potpunosti preko računala. Naime, detektor je priključen na računalo, te je samim time u mogućnosti 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. Računalni software zove se QuantaSmart™.



Slika 11. Princip rada TriCarb 2900 uređaja (TriCarb guide)

Namijenjen je za korištenje u zatvorenim prostorima, udaljen od drugih izvora zračenja. 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.

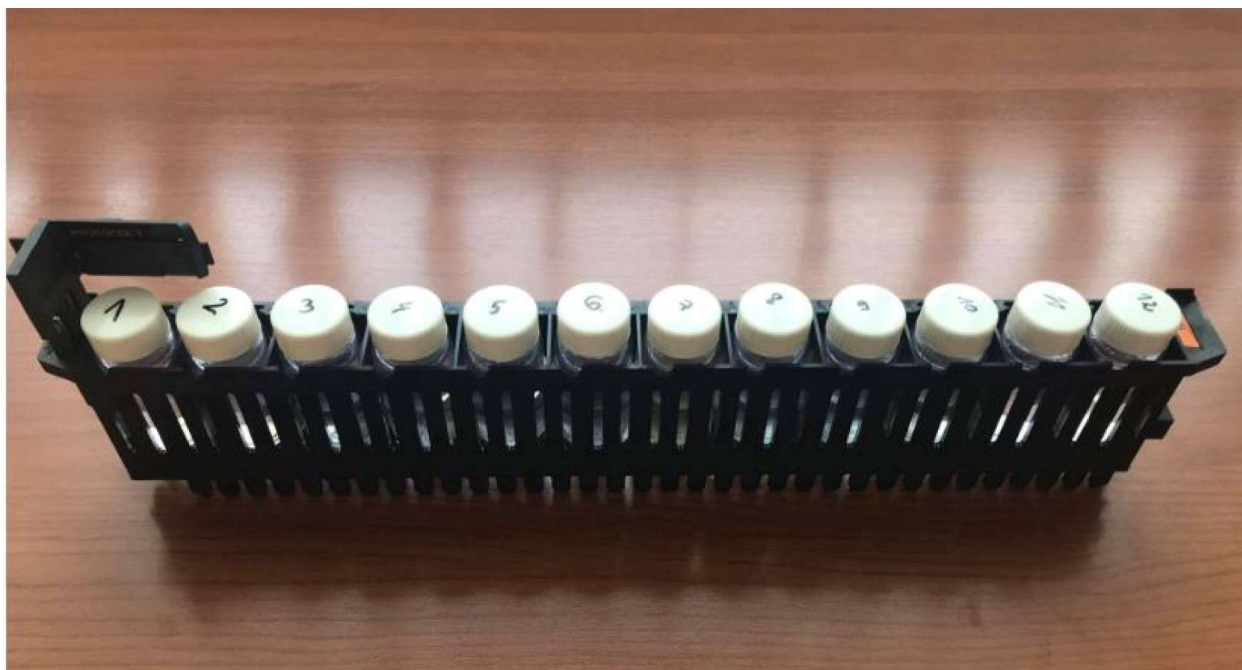


Slika 12. LSC TriCarb 2900 (TriCarb guide)

Proces očitavanja uzoraka počinje stavljanjem vijala koje sadrže radionuklide i scintilacijski koktel u detektor koji može mjeriti intenzitet fotona. Fotomultiplikator pojačava svjetlost koja isijava iz vijala s uzorcima te se pojačani signal pretvara u puls električne energije i registrira kao „count“. Registrirane vrijednosti tijekom procesa raspoređene su prema signalu amplitude, odnosno energiji koja se izražava u keV. Na temelju toga nastaje spektar uzoraka. Sustav može vršiti razne kalkulacije i korekcije, te odrediti CPM (Counts Per Minute) za svaki uzorak. Za izračun DPM (Disintegrations Per Minute), uređaj će izračunati efikasnost očitavanja svakog uzorka. (Getting Started Guide, 2015)

Plastični držači uređaja (eng. „*Sample Cassettes*“) drže vijale koje mogu biti različitih veličina. Standardni držači mogu držati do 12 vijali zapremine 15 - 20 ml, a držači za mini vijale do 18 mini vijala zapremine 6 – 7 ml. Mini vijale od 4 ml moraju imati nastavak prije stavljanja u držač. Držači se prepoznaju po zastavici na kraju svakog držača koja predstavlja protokol koji računalo prepoznaje te izvodi odabrane operacije za svaki uzorak. Držači također imaju identifikacijski broj koji računalo prepoznaje.

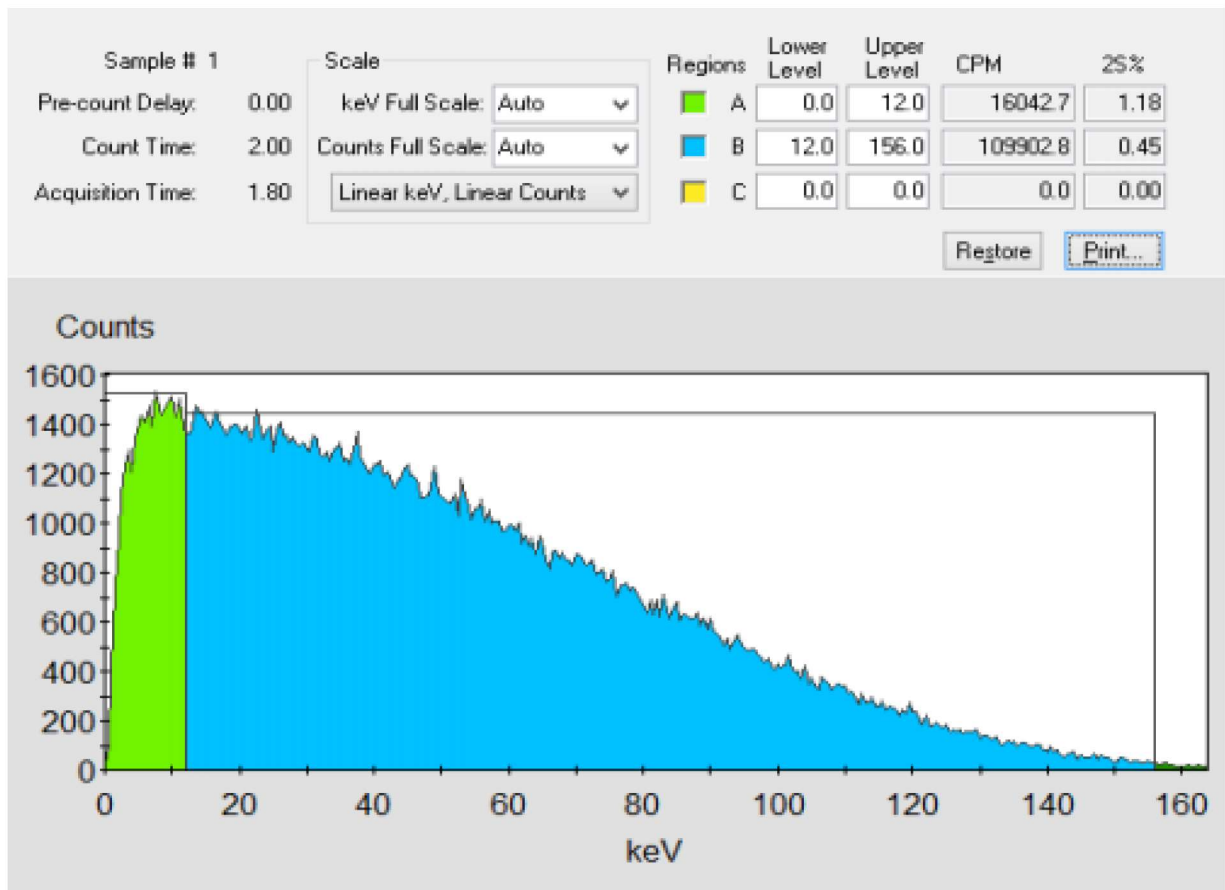
Prije same analize, potrebno je namjestiti odgovarajuću zastavicu do držača koji će prvi ići na analizu. Također, potrebno se pobrinuti da je zastavica u „reset“ poziciji (Slika 13.). Kada je broj prepoznat, „reset“ zastavica indikator je da se test pokreće po prvi put.



Slika 13. Zastavica u poziciji za mjerenje i prikupljeni uzorci u kazeti LSC-a.

Vijale s uzorcima stavljaju se u uređaj te se započinje analiza. U pozadinskom dijelu uređaja nalaze se fotomultiplikatorske cijevi koje dolaze iznad uzoraka. One su smještene jedna nasuprot drugoj te se nalaze u reflektirajućoj optičkoj komori. Detektori su postavljeni ispod uzoraka u pozadini uređaja te su okruženi sa slojem olova debljine 5 cm, koje štiti od pozadinskog zračenja.

Kao što je već spomenuto, softver koji uređaj koristi zove se QuantaSmart te omogućava u spektralnom prozoru grafički 2D kontinuirano promatranje spektra uzorka koji se analizira u stvarnom vremenu (Slika 14.). Spektar se obnavlja svakih nekoliko sekundi te ga je moguće prikazati u linearnoj ili logaritamskoj skali. Daje nam informacije o broju događaja zabilježenih u uzorku i području energije (keV) na kojoj su zabilježeni. Također, omogućuje nam da vidimo dolazi li do nekakvih iznenadnih promjena, npr. nastalih quencom. Nakon što je analiza završena, moguće je pomoću softvera napraviti izvješće koje sadrži sve očitane vrijednosti te isprintati po potrebi.



Slika 14. SpectraView (TriCarb guide)

Kao rezultat mjerenja na LSC-u dobije se izvješće kao u nastavku ovog teksta:

Assay Description:

222Rn mjerenje

Assay Type: CPM

Report Name: RadonKalibracija

Output Data Path: C:\Packard\Tricarb\Results\

Raw Results Path: C:\Packard\Tricarb\Results\Default\222Rn_cpm\20191112_1711\20191112_1711.resu

RTF File Name: C:\Packard\Tricarb\Results\Pavosevic_rujan2020.rtf

Comma-Delimited File Name: C:\Packard\Tricarb\Results\Pavosevic_rujan2020.csv

Assay File Name: C:\Packard\TriCarb\Assays\222Rn_cpm.lsa

S#12,CPMA,SIS,MESSAGES,A:2S%,tSIE,TIME,DATE

1,51.13,936.13,,3.61,893.24,5:12:57 PM,11/12/2019

1,50.28,907.03,,3.64,878.35,6:15:51 PM,11/12/2019

1,50.00,889.51,,3.65,867.78,7:18:43 PM,11/12/2019

2,48.05,865.24,,3.72,952.48,8:21:46 PM,11/12/2019

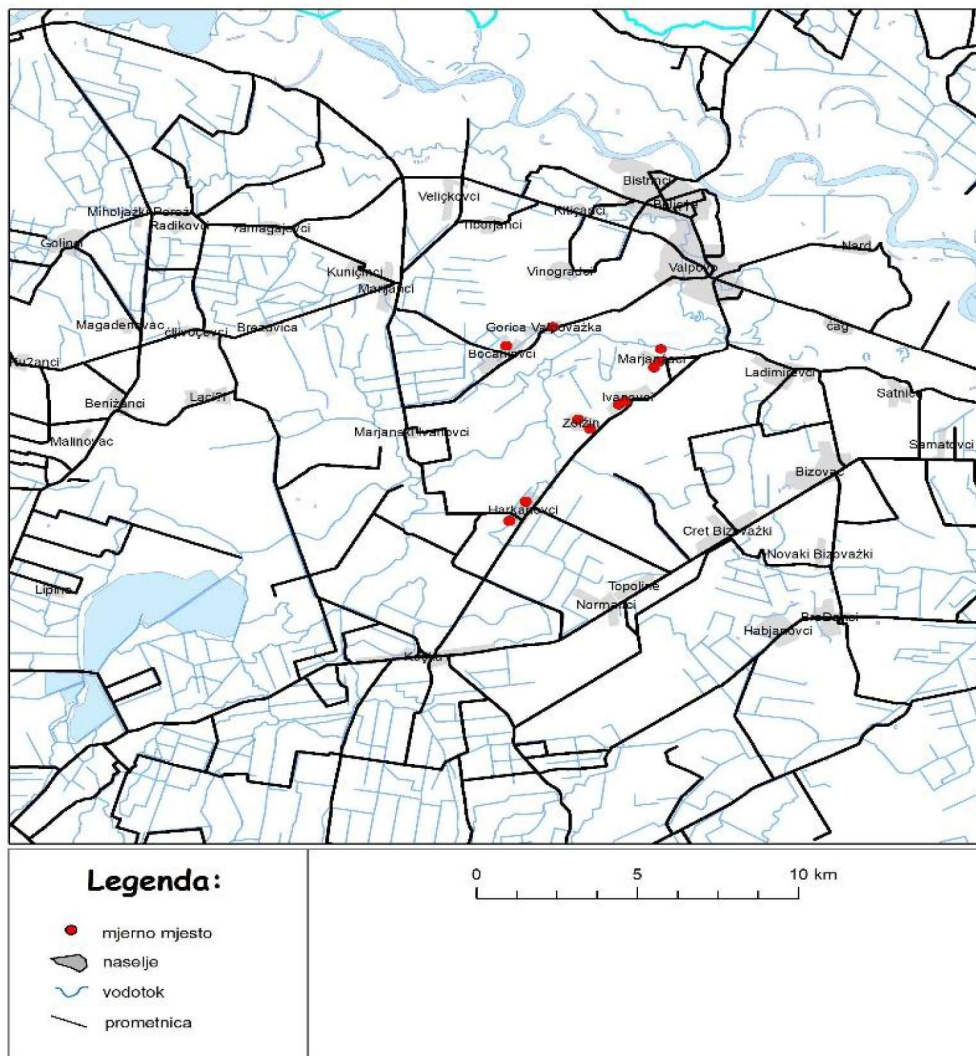
2,49.87,852.58,,3.66,950.27,9:24:40 PM,11/12/2019

2,47.50,908.38,,3.75,947.29,10:27:35 PM,11/12/2019
3,41.45,671.53,,4.01,924.23,11:30:39 PM,11/12/2019
3,41.05,634.44,,4.03,918.11,12:33:33 AM,11/13/2019
3,41.73,645.44,,4.00,913.77,1:36:25 AM,11/13/2019
4,48.33,706.72,,3.71,924.02,2:39:27 AM,11/13/2019
4,50.08,727.78,,3.65,921.47,3:42:18 AM,11/13/2019
4,48.22,719.08,,3.72,921.28,4:45:08 AM,11/13/2019
5,51.07,864.35,,3.61,912.68,5:48:12 AM,11/13/2019
5,52.33,853.00,,3.57,908.83,6:51:01 AM,11/13/2019
5,51.17,822.95,,3.61,904.71,7:53:48 AM,11/13/2019
6,57.83,1000.07,,3.40,900.60,8:56:47 AM,11/13/2019
6,57.70,952.95,,3.40,893.81,9:59:34 AM,11/13/2019
6,57.47,957.81,,3.41,896.44,11:02:19 AM,11/13/2019
7,45.33,605.90,,3.83,622.85,12:05:20 PM,11/13/2019
7,43.65,595.65,,3.91,619.56,1:08:12 PM,11/13/2019
7,44.47,631.04,,3.87,622.91,2:11:04 PM,11/13/2019
8,41.98,701.24,,3.98,914.87,3:14:09 PM,11/13/2019
8,40.20,681.30,,4.07,912.86,4:17:06 PM,11/13/2019
8,41.83,678.36,,3.99,913.07,5:19:59 PM,11/13/2019
9,39.48,702.57,,4.11,928.59,6:23:11 PM,11/13/2019
9,41.15,637.70,,4.03,928.45,7:26:10 PM,11/13/2019
9,40.87,695.37,,4.04,932.91,8:29:05 PM,11/13/2019
10,41.92,684.46,,3.99,867.93,9:32:10 PM,11/13/2019
10,41.12,642.73,,4.03,865.34,10:35:06 PM,11/13/2019
10,41.67,678.09,,4.00,865.28,11:37:58 PM,11/13/2019
11,42.25,670.73,,3.97,898.52,12:41:04 AM,11/14/2019
11,42.32,676.30,,3.97,896.00,1:44:02 AM,11/14/2019
11,42.82,681.18,,3.95,895.03,2:46:58 AM,11/14/2019
12,43.07,708.09,,3.93,896.13,3:50:04 AM,11/14/2019
12,43.52,763.97,,3.91,894.96,4:53:00 AM,11/14/2019
12,41.43,725.36,,4.01,889.73,5:55:55 AM,11/14/2019
13,41.95,691.50,,3.99,939.10,6:59:06 AM,11/14/2019
13,42.25,668.50,,3.97,936.33,8:02:02 AM,11/14/2019
13,42.75,738.93,,3.95,933.58,9:04:56 AM,11/14/2019
14,24732.08,16.00,,0.16,16.13,10:10:52 AM,11/14/2019
14,24732.73,15.92,,0.16,10.10,11:16:35 AM,11/14/2019
14,24746.10,15.89,,0.16,10.11,12:22:17 PM,11/14/2019

5.2. Rezultati mjerenja uzoraka vode iz bunara i potoka „Belih sela“ pomoću uređaja TriCarb 2900

Na sljedećoj karti prikazane su lokacije na kojima je uzorkovana voda iz bunara i potoka. Svi prikupljeni uzorci pripadaju vodonosniku Vučice.

Zemljovid lokacija uzorkovanja vode u otvorenim vodotocima i bunarima okolice Valpova tzv. "Bela sela"



Odjel za fiziku Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, rujan 2020.

Slika 15. Karta lokacija uzorkovanja vode

U sljedećoj tablici prikazani su rezultati mjerenja koncentracije aktivnosti radona u vodi u prikupljenim uzorcima.

Tablica 3. Rezultati mjerenja uzoraka na TriCarb2900 tekućinskom brojač

DATUM 16/17.09.2020.	MJERENJA:							
290,18		SREDNJA VRIJEDNOST	DESTILIRANA VODA	KOREKCIJA NA RASPAD	VRIJEME POLURASPADA			
UZORAK	V(l)	G = CPMA (count/min)	BACKGROUND B (count/min)	D	T _{1/2} (h)	t(h)	T _G (min)	T _B (min)
1 Harkanovci, M. Gupca 3	0,01	50,47	36,2	0,961	91,8	5,20	60	60
2 Harkanovci, M.Gupca 84	0,01	48,47	36,2	0,941	91,8	8,05	60	60
3 Zelčin, Oslobođenja 16	0,01	41,41	36,2	0,922	91,8	10,75	60	60
4 Zelčin, Lj. Gaja 44	0,01	48,88	36,2	0,903	91,8	13,55	60	60
5 Ivanovci, Lj. Gaja 7	0,01	51,52	36,2	0,892	91,8	15,07	60	60
6 Ivanovci, P. Preradovića 26	0,01	57,67	36,2	0,874	91,8	17,82	60	60
7 Marjančaci, Lj. Gaja 10	0,01	44,48	36,2	0,858	91,8	20,22	60	60
8 Marjančaci, Braće Radića 12	0,01	41,34	36,2	0,841	91,8	23,00	60	60
9 Marjančaci, Braće Radića 12	0,01	40,50	36,2	0,822	91,8	25,93	60	60
10 Vučica most Marjančaci	0,01	41,57	36,2	0,805	91,8	28,75	60	60
11 Gorica, S. Radića 13	0,01	42,44	36,2	0,789	91,8	31,43	60	60
12 Bocanjevci, V. Nazora 17	0,01	42,67	36,2	0,772	91,8	34,23	60	60

Prikazani rezultati mjerenja koncentracije aktivnosti radona u vodi izračunate su prema EPA metodi². 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:

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

gdje G označava broj događaja u uzorku, a B događaje pozadinskog zračenja. CF je kalibracijski faktor dobiven prema EPA metodi. 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. 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 :

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

odnosno:

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

Prikupljeni uzorci imali su koncentraciju aktivnosti radona u vodi u rasponu od 1,80 do 8,46 Bq/l s

prosječnom vrijednosti $(3,83 \pm 2,01)$ Bq/l što je daleko ispod 100 Bq/l što predstavlja EU referentnu razinu u vodi za piće. Najveća vrijednost izmjerena je u mojoj kući i iznosi $(8,46 \pm 0,99)$ Bq/l.

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

$$E = K \cdot C \cdot KM \cdot T$$

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). Pod pretpostavkom da pojedini član kućanstva popije 2l vode dnevno iz našeg bunara čija je aktivnost 8,46 Bq/l te korištenjem konverzijskog faktora 10^{-8} Sv/Bq (prema gore navedenoj jednadžbi za izračunavanje efektivne doze uslijed ingestije) dobiva se vrijednost od 16 μ Sv/god. Navedena je vrijednost 1000 puta manja od prosječne vrijednosti efektivne doze uslijed inhalacije radona. Svi ispitani uzorci su s radiološke strane potpuno ispravni za piće.

² 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.

6. ZAKLJUČAK

Uređajem TriCarb 2900 proveli smo mjerenja koncentracije aktivnosti radona u bunarskoj vodi dijela općine Valpovo. Prikupljeni uzorci imali su koncentraciju aktivnosti radona u vodi u rasponu od 1,80 do 8,46 Bq/l s prosječnom vrijednosti $(3,83 \pm 2,01)$ Bq/l što je daleko ispod 100 Bq/l što predstavlja EU referentnu razinu u vodi za piće. Najveća vrijednost izmjerena je u mojoj kući i iznosi $(8,46 \pm 0,99)$ Bq/l.

Pod pretpostavkom da pojedini član kućanstva popije 2l vode dnevno iz našeg bunara čija je aktivnost 8,46 Bq/l te korištenjem konverzijskog faktora 10^{-8} Sv/Bq (prema gore navedenoj jednadžbi za izračunavanje efektivne doze uslijed ingestije) dobiva se vrijednost od 16 μ Sv/god. Navedena je vrijednost 1000 puta manja od prosječne vrijednosti efektivne doze uslijed inhalacije radona. Svi ispitani uzorci su s radiološke strane potpuno ispravni za piće.

7. LITERATURA

Biermann, A.H.; Sawyer, S.R. (May 1, 1995). "[Attachment of radon progeny to cigarette-smoke aerosols](#)". Information Bridge. doi:10.2172/78555. Retrieved February 13, 2008.)

Chen, J. (2019) A discussion on issues with radon in drinking water. Radiation Protection Dosimetry, Volume 185, Issue 4, December 2019, Pages 526–531, <https://doi.org/10.1093/rpd/ncz035> (pristupljeno 10. 9. 2020.)

Inácio, M., Soares, S., & Almeida, P. (2017). Radon concentration assessment in water sources of public drinking of Covilhã's county, Portugal. Journal of Radiation Research and Applied Sciences, 10(2), 135–139.

Jobaggy i sur. - A brief overview on radon measurements in drinking water (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0265931X16304556?via%3Dihub>)

Keith S, Doyle JR, Harper C, et al. Toxicological Profile for Radon. Atlanta (GA): Agency for Toxic Substances and Disease Registry (US); 2012. Dostupno na: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK158784/> (pristupljeno 7.9.2020.)

Leksikografski zavod Miroslav Krleža (2020). URL: <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=21168%3e> (8. 9. 2020.)

Lukanec, M. (2015) Karakteristike nuklearne fisije i fuzije, Karlovac: Veleučilište u Karlovcu

Miklavčić i sur. Radon (^{222}Rn) u vodi i tlu te radonski potencijal na području Parka prirode Kopački rit

National Research Council (US) Committee on Risk Assessment of Exposure to Radon in Drinking Water. Risk Assessment of Radon in Drinking Water. Washington (DC): National Academies Press (US)1999.

Marović, G., Lokobauer, N., Prlić, I. (1999) Radioaktivnost u biosferi i u profesionalnoj izloženosti u nas. Institut za medicinska istraživanja i medicinu rada, Zagreb

Todorović, N., Jakonić, I., Nikolov, J., Hansman, J., Vesković, M., (2014) 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

PubChem (2020). Radon. National Library of Medicine, National Center for Biotechnology Information. URL: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/element/Radon#section=Information-Sources> (13.9.2020.)

Radiation safety program (1998) Guide to the safe use of the radionuclides at the University of Wisconsin - Milwaukee. Department of Environmental Health, Safety and Risk Management

8. POPIS SLIKA

Slika 1. Lanac radioaktivnog raspada uranija ^{238}U (PhysicsOpenLab).....2

Izvor: <http://physicsopenlab.org/2016/01/29/uranium-gamma-spectrometry/> (pristupljeno 28.9.2020.)

Slika 2. Koeficijent topljivosti radona u odnosu na temperaturu vode (Chen, 2019).....5
(pristupljeno 6.9.2020.)

Slika 3. Načini ulaska radona u zatvorene objekte (Family Action Network).....6

Izvor: <https://familyactionnetwork.ca/fan-blog/parenting-information/facts-about-radon-gas/>
(pristupljeno 28.9.2020.)

Slika 4. Emisija alfa čestica (Wikipedia).....9

Izvor: https://hr.wikipedia.org/wiki/Alfa_raspad (pristupljeno 6. 9. 2020.)

Slika 5. Alfa raspad radija (Radioaktivni otpad, radioaktivnost).....10

Izvor: <https://radioaktivniotpad.org/radioaktivnost/> (pristupljeno 6. 9. 2020.)

Slika 6. Beta minus raspad (Wikipedia).....11

Izvor: (https://hr.wikipedia.org/wiki/Beta_raspad) (pristupljeno 28.9.2020.)

Slika 7. Beta plus raspad (Wikipedia).....11

Izvor: (https://hr.wikipedia.org/wiki/Beta_raspad) (pristupljeno 28.9.2020.)

Slika 8. Prikaz prodornosti zračenja (Radioaktivni otpad, radioaktivnost).....12

Izvor: <https://radioaktivniotpad.org/radioaktivnost> (pristupljeno 6. 9. 2020.)

Slika 9. Shematski prikaz principa rada LSC-a (Hidex, e-book).....18

Izvor: <https://hidex.com/ebooks/liquid-scintillation-measuring-procedures/introduction/liquid-scintillation-counting/> (pristupljeno 7. 9. 2020.)

Slika 10. Efektivnost očitavanja radionuklida (Hidex, e-book).....	19
Izvor: https://hidex.com/ebooks/liquid-scintillation-measuring-procedures/introduction/liquid-scintillation-counting/ (pristupljeno 7. 9. 2020.)	
Slika 11. Princip rada TriCarb uređaja (TriCarb guide).....	20
Izvor: TriCarb Getting Started Guide, 2015	
Slika 12. LSC TriCarb (TriCarb guide).....	21
Izvor: TriCarb Getting Started Guide, 2015	
Slika 13. Zastavica u poziciji za mjerenje i prikupljeni uzorci u kazeti LSC-a.....	22
Slika 14. SpectraView (TriCarb guide).....	23
Izvor: TriCarb Getting Started Guide, 2015	
Slika 15. Karta lokacija uzrokovanja vode.....	25

9. POPIS TABLICA

Tablica 1. Fizička, kemijska i radiološka svojstva radona (Keith et al, 2012.).....	3
(pristupljeno 7.9.2020.)	
Tablica 2. Težinski faktor ozračivanja za tkiva prema ICRP 1977., 1991., i 2006. godine.....	14
Izvor: International Commission on Radiological Protection; General principles for the radiation protection of workers, ICRP Publication 75 (Oxford: Pergamon Press) (pristupljeno 28.9.2020.)	
Tablica 3. Rezultati mjerenja uzoraka na TriCarb2900 tekućinskom brojaču.....	27

10. ŽIVOTOPIS

Mirjam Pavošević rođena je 14.05.1996. godine u Osijeku, u Republici Hrvatskoj. Pohađala je područnu Osnovnu školu u Ivanovcima (u sklopu Osnovne škole Ladimirevci). Po završetku osnovne škole upisuje Opću gimnaziju u Valpovu, koju završava 2015. godine kada upisuje preddiplomski studij fizike na Odjelu za fiziku, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera Osijek.