Mjerenje koncentracije aktivnosti radona 222^ Rn u vodi iz prirodnih izvora u općini Slavonski Šamac

Zubović, Janja

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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:160:968290

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

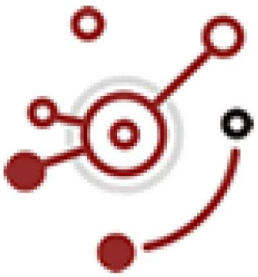
Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-23**

Repository / Repozitorij:

Repository of Department of Physics in Osijek

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU

ODJEL ZA FIZIKU



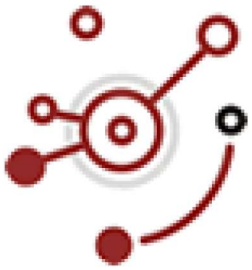
JANJA ZUBOVIĆ

Diplomski rad

Osijek, 2019.

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU

ODJEL ZA FIZIKU



JANJA ZUBOVIĆ

MJERENJE KONCENTRACIJE AKTIVNOSTI RADONA ^{222}Rn U VODI IZ PRIRODNIH IZVORA U OPĆINI SLAVONSKI ŠAMAC

Diplomski rad

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

Osijek, 2019.

„Ovaj diplomski rad je izrađen u Osijeku pod vodstvom 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

Za ovaj diplomski rad mjerila sam koncentraciju aktivnosti radona u vodi u svojoj općini, općini Slavonski Šamac. Budući da radon predstavlja rizik za zdravlje ljudi, a potaknuta činjenicom da većina mojih sumještana nikada nije čula za plin radon koji se osim u zraku, može nalaziti i u vodi, te činjenicom da su bubrežna oboljenja (npr. endemska nefropatija čija su žarišta upravo u Brodsko – posavskoj županiji) bez sigurno prepoznatog razloga u Republici Hrvatskoj vrlo česta, odlučila sam se baš za tu temu.

Drago mi jer sam ovim diplomskim radom utjecala na buđenje svijesti barem kod mojih sumještana o radioaktivnosti, konkretno o radioaktivnosti radona i njegovom utjecaju na ljudsko zdravlje.

Zahvala

Velike zahvale mentorici doc. dr. sc. Marini Poje Sovilj za pomoć pri izvedbi eksperimentalnog dijela rada te za pomoć prilikom izrade i pisanja diplomskog rada.

Zahvalu dugujem i mojim sumještanima koji su mi dali informacije o izvorima vode koje koriste te za pomoć prilikom uzorkovanja (bunarske) vode.

Sveučilište J. J. Strossmayera u Osijeku Diplomski rad

Odjel za fiziku

MJERENJE KONCENTRACIJE AKTIVNOSTI RADONA ^{222}Rn U VODI IZ PRIRODNIH IZVORA U OPĆINI SLAVONSKI ŠAMAC KORISTEĆI TEKUĆINSKI SCINTILACIJSKI DETEKTOR

JANJA ZUBOVIĆ

Sažetak

Na samom početku teorijskog dijela ovog rada opisano je što je radioaktivnost, koje su vrste radioaktivnih raspada te utjecaj zračenja na ljude. Zatim su opisane kemijske i fizikalne osobine radona, njegova rasprostranjenost te načini ulaska u zatvorene prostore. U radu su navedene uobičajene doze zračenja i mehanizmi mitigacije radona.

Nakon toga opisano je kako radon dospijeva u vodu, kakav rizik predstavlja kada se nađe u vodi te su navedeni podaci o referentnim razinama koncentracije radona.

Kao uvod u eksperimentalni dio iznesene su činjenice o vodi koja se proučava u ovom radu, način uzorkovanja te način pripreme uzoraka za mjerenje. Potom je opisan princip rada uređaja koji je korišten u analizi uzoraka. Na kraju su prikazani rezultati uz njihovu statističku obradu. Kao posljednji dio rada dan je zaključak, te pregled korištene literature.

57 stranica, 25 slika, 5 tablica, 40 literaturnih navoda

Rad je pohranjen u knjižnici Odjela za fiziku

Ključne riječi: „Doza zračenja“ / „Radon“/ „Radon u vodi“ / „Koncentracija aktivnosti radona“ / „Scintilacijski tekućinski brojač“

Mentor: doc. dr. sc. Marina Poje Sovilj.

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

mr. sc. Slavko Petrinšak

Rad prihvaćen: 20. 9. 2019.

J. J. Strossmayer University in Osijek
Department of Physics

Bachelor of Science Thesis

DETERMMINATION OF THE RADON ^{222}Rn ACTIVITY CONCENTRATION IN WATER FROM THE NATURAL WATER SPRINGS IN SLAVONSKI ŠAMAC MUNICIPALITY USING LIQUID SCINTILLATION DETECTOR

JANJA ZUBOVIĆ

Abstract

At the very beginning of the theoretical part of this thesis the radioactivity, types of radioactive decay and effects of radiation on humans have been described. Subsequently, there is a description of chemical and physical properties of radon, its distribution and ways of radon entering indoors. The usual radiation doses and mechanisms of radon mitigation are listed in the thesis. After that, there is a description of how radon reaches water, what are the risks of radon reaching water and what are the reference levels of radon concentration.

As an introduction to the experimental part of thesis, some facts about the water studied in this thesis, as well as method of sampling and the way of preparing samples for measuring are presented. After that, the operating principle of device used in the sample analysis is described. Finally, the results are presented together with their statistical evaluation. The thesis ends with conclusion and literature review.

57 pages, 25 figures, 5 tables, 40 references

Keywords: „Concentration of activity“ / „Dose of radiation“ / „Radon“ / „Radon in water“ / „Liquid scintillation detector“

Supervisor: Assistant Professor Marina Poje Sovilj, PhD

Reviewers: Associate Professor Vanja Radolić, PhD

Slavko Petrinšak, MSc

Thesis accepted: 20. 9. 2019.

Sadržaj

1. Uvod 3

2. Radioaktivnost i zračenje 5

2.1. Razvoj ideja o građi atoma 5

2.2. Zašto su neke jezgre radioaktivne? 8

2.3. Zakon radioaktivnog raspada 12

3. Radon 17

3.1. Kemijska i fizikalna svojstva radona 18

3.2. Radon u tlu i zraku 20

3.3. Radon u rudnicima uranijeve rude 21

4. Dozimetrija i mitigacija radona 24

4.1. Akcijski plan za radon u Republici Hrvatskoj 27

4.2. Radon u vodi 29

5. Eksperimentalni dio: Mjerenje radona u vodi u općini Slavonski Šamac 31

5.1. Voda u općini Slavonski Šamac 31

5.2. Uređaji za mjerenje radona 33

5.3. Scintilacijski detektori 34

5.3.1. Scintilacijski kokteli 35

6. Uređaj TriCarb 2900 37

6.1. Kalibracija uređaja TriCarb 2900 za radon 40

6.2. Uzorkovanje vode 41

6.3. Priprema uzoraka 43

6.4. Kalibracija uređaja 47

6.5. Rezultati mjerenja 48

7. Zaključak 57

8. Popis literature 58

Životopis 61

1. Uvod

Za ovaj diplomski rad mjerila sam koncentraciju radona u vodi u općini Slavonski Šamac. Kada je to bila samo ideja, raspitala sam se od sumještana iz kojih je izvora voda u njihovim kućanstvima, ako je to iz prirodnih izvora (a kod svih je to slučaj) imaju li bunare, kakva je voda koju koriste i sl. Većinom je odgovor bio da smatraju da je voda iz prirodnih izvora kvalitetnija i zdravija nego vodovodna voda.

Kada bih upitala jesu li ikada čuli za plin radon koji se može nalaziti u zraku i dovodi do rizika od nastanka raka pluća, odgovor bi bio da nisu. Na pitanje znaju li da u vodi može biti otopljenog radona, koji ne mijenja ni boju ni miris ni okus vode, sumještani su me začuđeno gledali i svi su rado pristali na mjerenje radona u njihovoj vodi.

Prema podacima Hrvatskog zavoda za javno zdravstvo u Republici Hrvatskoj česta obolijevanja od bubrežnih bolesti, što bi se dakako moglo povezati s vodom koju ljudi piju i koriste u prehrani. U zdravstvu su ta obolijevanja poznata kao KBB – kronična bolest bubrega a ona predstavlja poremećaj u građi i funkciji bubrega koji traje dulje od 3 mjeseca i ima negativan utjecaj na zdravlje. Prema podacima Hrvatskog registra nadomještanja bubrežne funkcije oko 4000 ljudi liječi se od nekog oblika kroničnog oboljenja bubrega. U 2017. godini od zatajenja bubrega umrlo je čak 787 osoba, a 500 novih bolesnika godišnje treba dijalizu ili transplantaciju bubrega. Poznata je i činjenica da je prije 50 – ak godina na tom području Slavonskog Broda i okolnim selima uočen velik broj oboljelih od endemske nefropatije - kronične bolesti bubrega za koju ni danas nije utvrđen uzrok niti lijek. Nemam podatke postoje li u općini Slavonski Šamac slučajevi obolijevanja od endemske nefropatije, no bubrežna oboljenja vrlo su česta.

Prema Hrvatskom zavodu za javno zdravstvo postoji 8 pravila za očuvanje zdravlja bubrega. Jedno od pravila glasi „održavajte zdravi unos tekućine“.

Geraldine Thomas akademkinja je na Katedri za molekularnu patologiju Odjela za kirurgiju i karcinome na fakultetu Imperial College u Londonu. Glavni istraživački fokus profesorice G. Thomas i njezinih suradnika patologija je karcinoma štitnjače odnosno njegova povezanost sa zračenjem, a naročito porast slučajeva karcinoma štitnjače na području pogođenom

Černobilskom katastrofom. Osim utjecaja zračenja na razvoj karcinoma, veliki dio svoga rada ona je posvetila osvješćivanju ljudi o zračenju, odnosno pokušaju uklanjanja zabluda o zračenju koje postoje kod većine ljudi. Naime, brojna istraživanja profesorice Thomas i drugih znanstvenika pokazuju da kod ljudi postoji preuveličan strah od zračenja, naročito nuklearnih elektrana. Nedovoljno znanje, informiranost putem medija, urođeni strah čovjeka od nečega što mu je u suštini nepoznato te sama nemogućnost detekcije zračenja i suočavanja s njim, svrstavaju zračenje u jednu od pojava prema kojoj ljudi imaju veoma velik strah. Nadalje, jedan od čimbenika koji utječe na postojanje straha od zračenja su nuklearne katastrofe koje se, unatoč tome što su rijetke, ipak događaju. Osim toga, svjedoci smo štete koje nuklearno oružje može prouzročiti svijetu. I danas se spominju katastrofalne posljedice bacanja nuklearnih bombi na japanske gradove tijekom 2. svjetskog rata.

Profesorica Geraldine Thomas u svojim publikacijama ističe da su predodžbe o učincima zračenja vrlo često pogrešne te da je psihološki učinak nerazumijevanja rizika zračenja daleko veći od samog rizika. [3] – [5]

Stoga je zadaća fizike i drugih prirodnih znanosti, prvenstveno proučavati i upoznavati prirodu radi poboljšanja zdravlja i kvalitete života ljudi.

Danas se provode brojni upitnici i ankete te objavljuju publikacije o tome koliko je zapravo zračenje štetno i kako se od njega zaštititi, pa ipak u posljednjih nekoliko desetljeća, dolazi do buđenja svijesti opće populacije o zračenju. Svi bi ljudi trebali biti upoznati sa činjenicom da su svakodnevno izloženi određenim dozama zračenja. Ono dijelom dolazi iz prirodnih izvora, a dijelom ga stvara čovjek, odnosno kažemo da je to zračenje iz antropogenih izvora. Na prirodno zračenje ne možemo utjecati i naš je organizam stekao prilagodbu na tu razinu zračenja i ona nije štetna za zdravlje ljudi. Osobna razina izloženosti zračenju ovisi o mjestu gdje živimo, načinu života (profesiji) i kvaliteti života, o hrani i vodi koje konzumiramo te o medicinskim postupcima kojima se podvrgnemo tijekom života. [6]

Najveći udio izloženosti zračenju odnosi se na prirodni radioaktivni plin radon. Iako većina ljudi nije s tim upoznata, radon je stalni pratilac naših života. Izlaganje visokim koncentracijama radonu u zatvorenim prostorijama može uzrokovati smrtonosni rak pluća. Znanstvenim istraživanjima potvrđeno je da je radon nakon pušenja drugi po redu uzročnik raka pluća na svijetu (WHO). [7]

U drugoj polovici 20. stoljeća počinje se intenzivnije proučavati radon i njegov utjecaj na zdravlje ljudi. Danas se vrše mjerenja koncentracije aktivnosti[1] radona u tlu, zraku i vodi i utjecaj tih koncentracija na dozu zračenja koju čovjek primi tijekom života.

Naime, radon u vodi predstavlja dvostruki rizik za zdravlje – inhalacija i ingestija. Stoga, odlučila sam svojim diplomskim radom provjeriti je li voda koju konzumiraju mještani Slavonskog Šamca s radiološke strane, obzirom na plin radon, zdrava. [8] [9] [10]

2. Radioaktivnost i zračenje

Radioaktivnost je pojava spontanog prelaska jezgre nekih elemenata u novu jezgru uz emitiranje čestice/ zračenja. Emitirana energija može biti u obliku alfa, beta ili gama zračenja. Za jezgre koje su radioaktivne kažemo da su nestabilne i nazivamo ih radionuklidima a radioaktivnim raspadom one teže postati stabilne.

2.1. Razvoj ideja o građi atoma

Grana fizike koja proučava jezgru atoma, pa time i radioaktivnost, naziva se nuklearna fizika. Naziv nuklearna dolazi od grčke riječi *nucleus* što znači jezgra. Točnije, nuklearna fizika proučava građu i svojstva atomskih jezgara, procese koji se u njima događaju te međusobno djelovanje jezgara. Danas znamo da se atom sastoji od protona i neutrona koji se nalaze u jezgri atoma te elektrona koji se nalaze u elektronskom omotaču. Radioaktivnost je pojava koja se definira kao spontani prelazak jezgre nekih elemenata u novu jezgru uz emitiranje čestice/energije, odnosno zračenja. Emitirana energija može biti u obliku alfa, beta ili gama zračenja. Za jezgre koje su radioaktivne kažemo da su nestabilne i nazivamo ih radionuklidima a radioaktivnim raspadom one teže postati stabilne. [11] [12]

[1] Radi jednostavnosti u daljnjem tekstu umjesto izraza koncentracija aktivnosti radona koristi se izraz koncentracija radona.

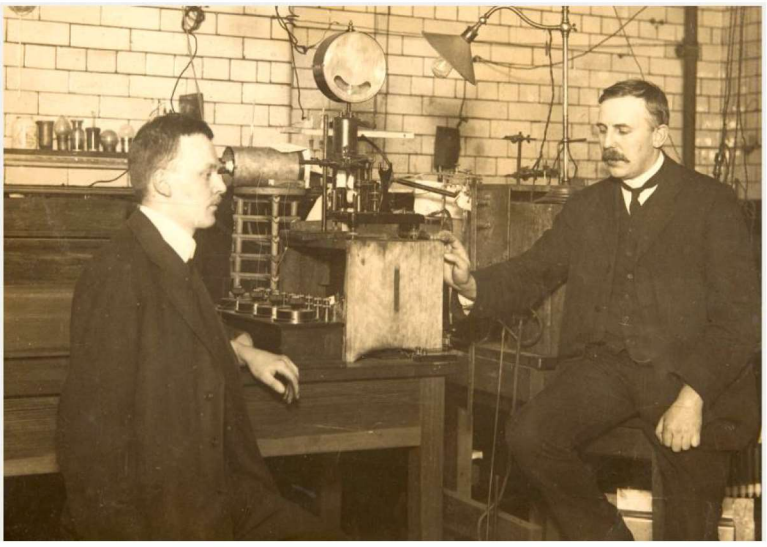
1896. godina uzima se kao godina rođenja nuklearne fizike. Te je godine Henri Becquerel otkrio pojavu radioaktivnosti. Nakon tog otkrića slijedi niz pokusa koji su doveli do objašnjenja građe i ponašanja atoma.

Atom je u fizici poznat još antičkim misliocima koji su fizikalnim pojavama često pridavali mistična svojstva i karakteristike. Najveći utjecaj na fiziku imao je Aristotel i njegove su ideje živjele u fizici dugi niz godina.

Objašnjenje atoma i njegovo ponašanje dao je danski fizičar Niels Bohr 1911. godine, što je obzirom na vrijeme otkad se govorilo o atomu, jako kasno. Njegov model predstavlja temelj modernog shvaćanja strukture atoma - atom se sastoji od sićušne pozitivno nabijene jezgre koja nosi gotovo cijelu masu atoma, te negativno nabijenih elektrona koji kruže oko nje po točno određenim putanjama koje se nazivaju stacionarne staze. Kada elektron prelazi s više stacionarne staze na nižu on emitira točno određeni iznos energije, odnosno kvant energije. Da bi elektron prešao u višu stazu on mora apsorbirati energiju. [13] [14]

Eksperimentalnu potvrdu Bohrove teorije ostvarili su 1913.g. njemački fizičari James Franck i Gustav Hertz i za to su 1925. godine dobili Nobelovu nagradu. Oni su potvrdili postojanje kvantnih razina energije atoma tako što su promatrali neelastičan sudar elektrona s teškim atomom (npr. žive). Uočili su da elektron pri sudaru s atomima žive gubi količinu energije koja odgovara energiji kvanta zračenja kada pobuđeni atom žive pri povratku u osnovno stanje emitira ultraljubičastu svjetlost. [9]

Britanski fizičar Joseph John Thompson objasnio je građu atoma pomoću modela pudinga sa šljivama (ili grožđicama). Prema tom modelu, puding predstavlja jednoliko nabijenu pozitivnu kuglicu u kojoj se onda poput šljiva ili grožđica nalaze uronjeni elektroni - negativno nabijene čestice. Dakako, ovaj model mogao je zaživjeti jedino kada dobije eksperimentalnu potvrdu, odnosno ukoliko se rezultati pokusa budu slagali sa pretpostavljenim činjenicama. Eksperimentalnu provjeru ove pretpostavke, 1911. pod vodstvom Ernesta Rutherforda izveli su njegov postdoktorand Hans Geiger i i postdiplomand Ernst Mardsen.



Slika 1. 1912. godine u Manchester Laboratoriju za fiziku na slici lijevo H. Geiger s E. Rutherfordom na desnoj strani slike. [11]

Oni su snop α-čestica usmjeravali na vrlo tanki listić zlata smješten u središtu kružnog fluorescentnog zastora. Gotovo sve α-čestice prošle su nesmetano kroz listić, gibajući se nakon prolaska pravocrtno. Jedan dio čestica se pak otklonio pod kutem manjim od 90°, dok ih se neznatan broj odbio unatrag ili pod kutom znatno većim od 90°. Takvi rezultati pokusa naveli su Rutherforda na objašnjenje da se u središtu atoma nalazi jezgra koja je u odnosu na atom neizmjerno mala ali jako velike mase i pozitivnog naboja. Elektroni, s obzirom na svoju izvanredno malu masu, nisu bili prepreka prolasku α-čestica. Kada je pretpostavio ovaj model, Rutherford nije znao da postojanje neutrona ali je ispravno zaključio da je gotovo sva masa skoncentrirana u jezgri. [9] [10] [13]

Promjer jezgre (10^{-15} m) je 100 000 puta manji od promjera atoma (10^{-10} m).

Budući da je atom u cjelini električki neutralan svaki atom mora sadržavati jednak broj protona i elektrona. Kako bi objasnio ukupnu masu atoma E. Rutherford je 1920. godine pretpostavio da u atomu postoji nenabijena čestica. Budući da čestica nema naboj bilo ju je vrlo teško otkriti i opisati. 1932. godine to je pošlo za rukom engleskom fizičaru Jamesu Chadwicku. On je te godine objavio rezultate svojih istraživanja o pronalasku i dokazivanju postojanja nenabijene, neutralne subatomske čestice koju je nazvao neutronom. [12]

Atom nekog elementa određen je dvama brojevima - atomskim i masenim brojem. Atomski broj, Z, predstavlja broj protona u jezgri. Protone i neutrone, koji dakle sačinjavaju atomsku

jezgru, zajedničkim imenom zovemo nukleonima. Ukupan broj nukleona u jezgri naziva se maseni broj, A. Od grčke riječi *nucleus* dolazi i naziv nuklid - vrsta atoma određena brojem u jezgri zadržanih protona i neutrona. Dakle, nuklid je određen atomskim i masenim brojem i označavamo ga:

$$^{A}_{Z}X,$$

gdje je X simbol kemijskog elementa. Razlika masenog i atomskog broja daje broj neutrona tog nuklida.

Svi atomi nekog kemijskog elementa imaju jednak atomski broj. No, neki elementi imaju nekoliko vrsta atoma koji se razlikuju po masenom broju. Atomi koji imaju isti atomski broj, ali različite masene brojeve nazivaju se izotopima. Većina kemijskih elemenata u prirodi smjesa je prirodnih izotopa, bilo stabilnih bilo radioaktivnih. [9] [12] [13]

2.2. Zašto su neke jezgre radioaktivne?

U unutrašnjosti atomske jezgre djeluju sve četiri osnovne sile: vrlo slaba gravitacijska, odbojna električna (među protonima), nuklearna slaba i nuklearna jaka sila. Dominantna sila među nukleonima je jaka nuklearna sila koja atomske jezgre drži na okupu. Jaka nuklearna sila zbog kratkog dosega djeluje samo između najbližih čestica, neovisna je o naboju, kratkog je dosega i veoma snažna (najsnažnija sila u prirodi). Kako raste broj protona u jezgri između kojih djeluje odbojna elektrostatska sila, da bi jezgra ostala stabilna, mora rasti i broj neutrona. Ako je omjer broja neutrona i protona odgovarajući jezgra je stabilna. Ukoliko je omjer između neutrona i protona velik jezgra se raspada u procesu radioaktivnosti.

Nestabilni nuklidi, dakle, spontanim radioaktivnim raspadom uz emitiranje zračenja prelaze u stabilno stanje. Postoje dvije vrste radioaktivnih raspada, odnosno zračenja - alfa i beta raspad (zračenje). Alfa i beta raspadom dolazi do nastanka nove jezgre i to je raspad u pravom smislu riječi. Često se kao jedna vrsta raspada navodi i gama, no ono predstavlja samo oslobađanje energije do stabilnog stanja. E. Rutherford otkrio je i opisao vrste zračenja prema naboju i prodornosti.

Jezgra koja se radioaktivno raspada naziva se jezgra roditelj i označava se sa X, a novonastala jezgra koju označavamo sa Y naziva se jezgra potomak ili jezgra kćer .

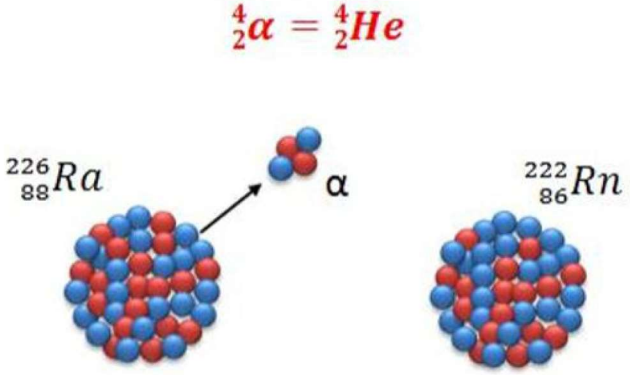
Alfa (α) raspadom se većinom raspadaju teške nestabilne jezgre. α čestica izgleda kao jezgra helija- sustav od dva protona i dva neutrona. Kada teška jezgra emitira α česticu ona izgubi dva protona i dva neutrona i dolazi do transmutacije atomske jezgre, pri čemu se atomski broj smanji za 2, dok se maseni broj smanji za 4.

Nakon emisije α čestice nastaje novi element koji je u periodnom sustavu elemenata pomaknut za dva mjesta u lijevo.

Simbolički se α raspad pišemo:

$$ {}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}Y + {}^{4}_{2}He. $$

Na sljedećoj slici je prikazan alfa raspada radija, ^{226}Ra, kojim nastaje radon.



Slika 2. Radioaktivni raspad jezgre radija, ^{226}Ra.

Postoje dvije vrste beta raspada. To su beta minus i beta plus raspad.

Beta minus raspadu podložne su nestabilne jezgre koje u suvišku imaju neutrone dok su beta plus raspadu podložne nestabilne jezgre s manjkom neutrona.

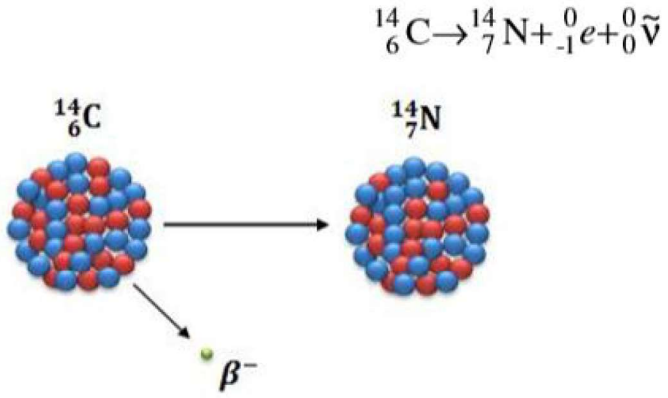
U beta minus raspadu jedan neutron iz jezgre transformira se u proton koji ostaje u jezgri, a iz jezgre izlijeće čestica po osobinama identična elektronu - beta minus čestica ($-\beta$ ili $_{-1}^{0}e$) i antineutrino ($\tilde{\nu}$).

Pri tome se atomski broj poveća za 1, a maseni ostaje nepromijenjen. Pri beta minus raspadu događa se transmutacija jezgre - novonastala jezgra je pomaknuta za jedno mjesto u desno u periodnom sustavu elemenata.

Simbolički beta minus raspad zapisujemo:

$$ {}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z+1}Y + {}^{0}_{-1}e + {}^{0}_{0}\tilde{\nu} . $$

Primjer beta minus raspada je ugljik, ^{14}C prikazan na sljedećoj slici.



Slika 3. Radioaktivni raspad jezgre ugljika, ^{14}C.

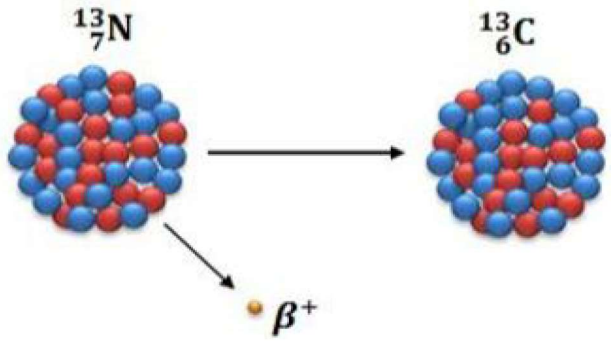
Nakon beta plus raspada jezgra potomak ima isti broj nukleona. Proton iz jezgre transformira se u neutron, što prati emisija beta plus čestice - pozitrona (+β ili ${}^{0}_{+1}e$) i neutrina (**ν**). Nakon raspada atomski se broj smanji za jedan, dok se maseni ne mijenja. Novonastali element u periodnom sustavu pomjera se za jedno mjesto u lijevo.

Simbolički beta plus raspad prikazujemo:

$$ {}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z-1}Y + {}^{0}_{+1}e + {}^{0}_{0}\nu . $$

Primjer jezgre koja se raspada beta plus raspadom je dušik, ^{13}N prikazana na Slici 4.

$$^{13}_{7}\mathrm{N} \rightarrow {}^{13}_{6}\mathrm{C} + {}^{0}_{+1}e + {}^{0}_{0}\nu$$



Slika 4. Radioaktivni raspad jezgre dušika, ^{13}N.

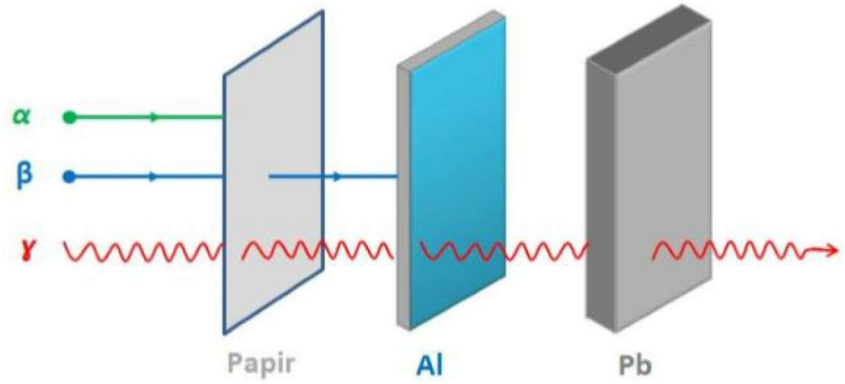
Nakon alfa ili beta raspada jezgra može ostati u pobuđenom stanju. Oslobađanjem energije u obliku gama zračenja ona postaje stabilna. Gama zračenje je fotonske (elektromagnetske) prirode i pri njegovoj emisiji ne dolazi do promjene ni atomskog ni masenog broja.

Zbog različite prirode zračenja nastalih pri radioaktivnim raspadima (masa, naboj, energija), različita je i njihova prodornost odnosno domet. Na Slici 5. nalazi se pojednostavljen prikaz prodornosti i dometa za svaku vrstu zračenja.

Alfa čestice može zaustaviti sloj papira, par cm zraka ili sloj izumrlih stanica kože. Ako dospiju unutar organizma zbog velike energije, izrazito su opasne.

Beta minus čestice (elektrone), zaustavlja par milimetara aluminijskog štita ili par metara zraka. Opasnost predstavlja zakočno rentgensko zračenje koje nastaje prolaskom beta zračenja kroz tvar, ili gama zračenje koje se emitira ako jezgra nakon emisije beta čestice ostane u pobuđenom stanju.

Gama zračenje (elektromagnetne prirode), ima najveću dubinu prodiranja, naime, ne može ga u potpunosti zaustaviti ni olovna ploča debljine i nekoliko centimetara. Najbolje ga apsorbiraju materijali velikog atomskog broja (olovo) i velike gustoće.



Slika 5. Pojednostavljeni prikaz prodornosti i dometa za svaku vrstu zračenja.

[13] [15]

2.3. Zakon radioaktivnog raspada

Proces radioaktivnog raspada statističke je prirode, što znači da se ne može sa sigurnošću predvidjeti kada će se pojedina jezgra raspasti, niti se na proces raspada može utjecati. No, zakon radioaktivnog raspada daje mogućnost računanja broja raspadnutih jezgara nakon vremena, t.

Broj raspadnutih jezgara nakon proteka vremena t, razmjeran je broju neraspadnutih jezgara, proteku vremena t i konstanti raspada radioaktivnog izvora λ.

Ukoliko sa N_0 označimo početni broj radioaktivnih jezgara u uzorku, sa N(t) broj neraspadnutih radioaktivnih jezgara nakon proteka vremena Δt , ΔN predstavlja broj raspadnutih jezgara nakon vremena t:

$$\Delta N = -\lambda \, \Delta t \, N(t) \tag{1}$$

λ je karakteristika raspada za određenu jezgru i ona je definirana brojem raspada u sekundi.

Češće je u upotrebi eksponencijalni oblik ovog zakona:

$$N = N_0 \; e^{-\lambda t} \tag{2}$$

Veličina koja karakterizira raspad neke jezgre je vrijeme poluraspada, $T_{1/2}$. To je vrijeme potrebno da se raspadne polovina jezgara radioaktivne tvari. Ono može iznositi manje od jedne sekunde pa sve do nekoliko milijuna godina. Veza između vremena poluraspada i konstante radioaktivnog raspada dana je formulom:

$$T_{1/2} = \frac{ln2}{\lambda} \tag{3}$$

[13] [15]

4. Utjecaj zračenja na ljude

Zračenje je fizikalna pojava širenja elektromagnetskih valova kroz sredstvo ili vakuum. Obzirom na energiju koju nosi zračenje može biti ionizirajuće i neionizirajuće. Ionizirajuće zračenje je zračenje koje ima energiju dovoljnu za razbijanje veza u atomu i time u ozračenom materijalu stvara ione, odakle i dolazi naziv ionizirajuće. Neionizirajuće zračenje ima energiju koja nije dovoljna za razbijanje kemijskih veza u atomima na koje djeluje.

Ionizirajuće zračenje može imati veliki utjecaj na ljudsko zdravlje. Ionizacija u tkivu ne znači nužno i štetu. Ciljanim i kontroliranim korištenjem ionizirajućeg zračenja u terapiji mogu se uništiti stanica tkiva zahvaćene tumorom. Postoje još brojne upotrebe ionizirajućeg zračenja, npr. rentgensko snimanje tijela (koje je nužno iako je u određenoj mjeri štetno), sterilizacija medicinskih proizvoda itd. No, ionizirajuće zračenje u zdravom tkivu može izazvati biološke promjene koje dovode do promjene u funkciji organa što znači da nastupa bolest ili poremećaj rada organa.

Cjelokupna ljudska populacija svakodnevno je izložena određenim razinama ionizirajućeg zračenja, kako u svojim domovima, tako i radnim mjestima, školama, i u samoj prirodi. Naš je organizam stekao prilagodbu na te razine zračenja. Najveći izvor prirodnog zračenja plin je radon, s udjelom od čak 56%. [18] Na Slici 6. prikazani su izvori ionizirajućeg zračenja i njihov doprinos ukupnom zračenju. Ionizirajuće zračenje može dolaziti iz prirode ili biti antropogeno, čovjekom uzrokovano (medicinsko zračenje i umjetna radioaktivnost). [15] [16] [17]

Slika 6. Izvori ionizirajućeg zračenja i njihov udio u ukupnom zračenju. [18]

Određeni broj ljudi iz profesionalnih razloga izložen je povišenim dozama ionizirajućeg zračenja pa se onda ozračenje tih ljudi redovito prati i nadzire, npr. nošenjem osobnih dozimetara.

Budući da naša osjetila ne mogu otkriti ionizirajuće zračenja, detektiramo ih i mjerimo na osnovi međudjelovanja s atomima tvari. Neki od efekata koje ionizirajuće zračenje može uzrokovati (a omogućuju njegovu detekciju) su: ionizacija, fotokemijske promjene, fluorescencija, termoluminiscencija, kemijske promjene, promjene električne vodljivosti, povišenje temperature itd.

Ionizirajuća zračenja mogu biti fotonska (rentgensko i gama zračenje) ili čestična (α zračenje, β zračenje, zračenje visokoenergetskim protonima, neutronima, elektronima itd.).

Ionizirajuće zračenje koje nastaje raspadom radona središnji je dio ovog rada. Radon se raspada alfa radioaktivnim raspadom. Nakon njegovog raspada ne nastaje stabilna jezgra nego se niz nastavlja daljnjim alfa raspadima (tek 20 – ak godina nakon nastanka radona nastaje stabilna jezgra olovo, ^{206}Pb). Kao alfa emiteri, zbog vrlo velike energije i jake interakcije sa tvari kroz

koju prolaze (stvaranje velikog broja ionskih parova po jedinici puta) potomci radioaktivnog raspada radona tu energiju mogu pohraniti u samo jednoj stanici što može dovesti do razaranja stanice. Radon je naročito opasan ukoliko udisanjem uđe u dišni sustav čovjeka.

Upravo priroda zračenja određuje način interakcije zračenja i tvari te biološke posljedice koje ono može izazvati u živom organizmu. Interakcijom zračenja i tvari, zračenje ozračenoj tvari predaje energiju čime dolazi do promjene svojstva zračenja i ozračene tvari.

Fizikalna veličina koja karakterizira međudjelovanje ionizirajućeg zračenja i tvari zove se apsorbirana doza ionizirajućeg zračenja (D).

Apsorbirana doza jest količina energije koja je deponirana ionizirajućim zračenjem u jedinici mase tijela:

$$D = \frac{dE}{dm} \tag{4}$$

Jedinica apsorbirane doze u SI sustavu mjernih jedinica je džul po kilogramu (J/kg), a nazivamo ju grej (Gy).

U ovisnosti o vrsti zračenja definira se ekvivalentna doza, H_T sa mjernom jedinicom sivert (Sv). Ona predstavlja sumu svih srednjih apsorbiranih doza od zračenja R u tkivu T.

Nju računamo prema formuli:

$$H_T = \sum D_{T,R}\ w_R \tag{5}$$

gdje je w_R težinski koeficijent zračenja koji za fotonska zračenja i elektrone iznosi 1, a za alfa čestice 20.

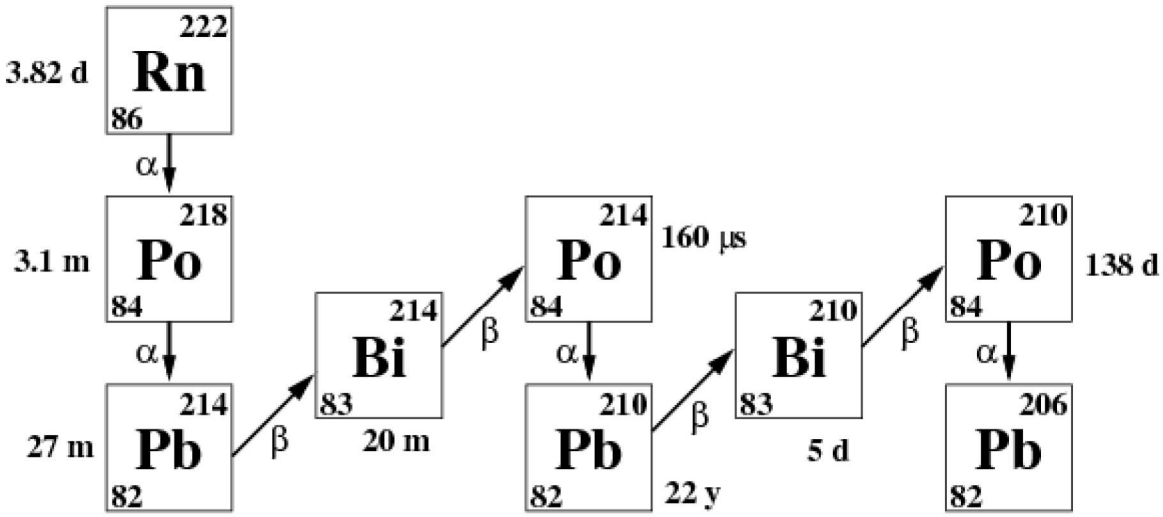
Veličina koja uzima u obzir i vrstu tkiva naziva se efektivna doza. Ona je jednaka sumi svih težinskih doza zračenja pomnoženoj sa težinskom faktorom za određeno tkivo, w_T.

$$E = \sum H_T\ w_T = \sum w_T \sum w_R\ D_{T,R} \tag{6}$$

[13] [15] [16] [17]

3. Radon

Radon (^{222}Rn) nastaje radioaktivnim raspadom radija (^{226}Ra) uz emisiju alfa čestice. On je član uranijevog radioaktivnog niza. Radon je isto tako radioaktivan plin a njegovim raspadom stvara se više radionuklida koji emitiraju alfa, beta i gama zračenje. Na Slici 7. prikazani su potomci radioaktivnog raspada radona i njihova vremena poluraspada te vrsta raspada.



Slika 7. Potomci radioaktivnog raspada radona, ^{222}Rn.

Danas je poznato da radon i kratkoživući potomci njegovog radioaktivnog raspada (^{218}Po, ^{214}Pb, ^{214}Bi i ^{214}Po) najvećim dijelom doprinose ukupnoj godišnjoj efektivnoj dozi zračenja stanovništva. Najveći dio rizika odnosi se na inhalaciju zraka bogatog radonom. Budući da je on topiv u vodi, dio rizika odnosi se i na ingestiju vode obogaćene radonom. Alfa zračenje koje nastaje u radioaktivnom nizu radona povezuje se s rakom pluća. [8] [18]

Prema epidemiološkim istraživanjima i podacima Svjetske zdravstvene organizacije (WHO), radon je nakon pušenja, drugi po redu uzročnik raka pluća na svijetu. Procjenjuje se da je radon odgovoran između 3% i 14% svih slučajeva raka pluća, ovisno o prosječnoj koncentraciji radona u zatvorenom prostoru, pušenju te duljini boravka u takvom prostoru. Procjenjuje se da je za pušače rizik od raka pluća čak 25 puta veći nego za nepušače.

Krajem 16. stoljeća uočen je velik postotak smrtnosti rudara u rudnicima uranija u Srednjoj Europi. Iako su kroz godine postojale razne pretpostavke o razlozima ove pojave, ona je razjašnjena tek u 20. stoljeću. Pred kraj 19. stoljeća, kao glavni uzrok smrti rudara identificiran je rak pluća a sredinom idućeg stoljeća pretpostavljena je činjenica da je uzročnik raka pluća plin radon.

Oko 1950. godine započinje proces zaštite rudara u rudnicima uranija a nakon toga znanstvenici počinju upozoravati na opasnost zračenja radona u zatvorenim prostorijama u kojima borave ljudi.

Danas se u pogledu zaštite od ionizirajućeg zračenja velik dio pažnje usmjerava upravo na zaštitu od radona. Što je koncentracija radona u zatvorenim prostorijama niža to je niži i rizik od nastanka raka pluća jer ne postoji prag ispod kojeg izloženost radonu ne predstavlja rizik. Postoje provjerene, trajne i ekonomične metode za sprječavanje akumuliranja radona u novim građevinama te smanjenje koncentracija u postojećim. [19]

3.1. Kemijska i fizikalna svojstva radona

Radon je kemijski element u plinovitom stanju koji zbog svoje elektronske konfiguracije[2] spada u skupinu plemenitih plinova. Stoga se on, s rednim brojem 86, nalazi u 18. skupini periodnog sustava elemenata uz plinove helij (^{4}He), neon (^{20}Ne), argon (^{38}Ar), kripton (^{83}Kr) i ksenon (^{131}Xe).

Za atome plemenitih plinova karakteristična je elektronska konfiguracija s popunjenim valentnim orbitalama (s^2 za helij, odnosno s^2p^6 za ostale članove grupe). Ta je konfiguracija veoma stabilna, što naročito vrijedi za lakše članove skupine (helij i neon). Zbog toga je sposobnost spajanja plemenitih plinova s drugim elementima veoma ograničena. Kemičari i fizičari sve do 1962. godine smatrali plemenite plinove kemijski inertnima. Te godine otkriveno je da ksenon može stupati u kemijske reakcije. Naime, u ranim 1960. – im godinama izvedeni su pokusi spajanja plemenitih plinova sa nekim kemijskim elementima, i to sa onima

[2] Elektronska konfiguracija pokazuje broj elektrona u atomu i njihov raspored po ljuskama i orbitalama; o njoj ovise struktura i sve zakonitosti u periodnom sustavu elemenata. Svojstva elementa uglavnom ovise o elektronskoj konfiguraciji vanjske, tzv. valentne ljuske. Plemeniti plinovi imaju u vanjskoj ljusci osam elektrona i to je vrlo stabilna konfiguracija, zbog čega su se plemeniti plinovi smatrali inertnima.

koji su kemijski vrlo aktivni, elementima koji imaju vrlo veliku elektronegativnost. Primjer takovog elementa je fluor, ^{18}F (element s najvećom elektronegativnošću). Tako su, osim spojeva nekih elemenata sa ksenonom, dobiveni spojevi radona i fluora, npr. radon fluorid, RnF. [20] [21]

Kasnije je otkriveno kako radon može stupati u kemijske reakcije i sa kisikom. U istraživanju skupine ruskih kemičara iz 1989. godine, ispitivana su svojstva radonova oksida u vodenoj otopini. [22]

Poput ostalih plemeniti plinova, radon je bezbojan plin bez mirisa i okusa. Kao posljednji element iz skupine plemenitih plinova, a ujedno peti radioaktivni element, Ernst Friedrich Dorn 1900. godine otkrio je radon. Otkriće radioaktivnosti izazvalo je veliko zanimanje fizičara i kemičara pa oni, diljem svijeta, nakon otkrića polonija i radija, nastavljaju tragati za novim radioaktivnim elementima. Maria Curie je otkrila da radij izložen na zraku uzrokuje radioaktivnost zraka. No, zaokupljena postupcima izolacije radija iz minerala, M. Curie nije nastavila proučavati ovu pojavu. E. F. Dorn je utvrdio da raspadom radija nastaje neki plin koji se širi u zraku i čini zrak radioaktivnim. Novootkriveni plin E. F. Dorn nazvao je „emanacijom" radija. Izraz emanacija filozofski je pojam preuzet u gotovo sve znanosti a odnosi se na nešto što dolazi od nečega (višeg). Tako je novi plin, jer nastaje od radija, „emanacija" radija. Kasnije je E. R. Dorn novom plinu dodijelio naziv niton. Taj naziv dolazi od latinske riječi *nitens*, što znači sijati, blistati. Zaključno, u čast elementu od kojeg nastaje, radiju, niton je dobio naziv radon i taj naziv je ostao u upotrebi. [22]

Kada govorimo o radonu mislimo na izotop ^{222}Rn, a u prirodi postoji oko dvadeset izotopa radona. Tri su izotopa prirodna a svi su radioaktivni. Preostala dva prirodna izotopa su aktinon, $^{219}_{86}Rn$ i toron, $^{220}_{86}Rn$. U odnosu na radon, njihova vremena poluraspada, vrlo su kratka pa se stoga uglavnom ne provode istraživanja vezana za njih.

Prije otkrića radona ^{222}Rn, 1899[3]. godine u suradnji E. Rutherforda i Robert Owensa otkriven je radioaktivni plin koji dolazi od torija – toron, ^{220}Rn. 1903. godine francuski kemičar Andre Louis Debierne otkrio je aktinon, ^{219}Rn. [21]

[3] Ernst Friedrich Dorn (1848. – 1916.) njemački je fizičar kojemu se propisuje otkriće radona. Rođen je u Poljskoj a umro u Njemačkoj. Na Hale Sveučilištu bio je profesorom teorijske fizike, eksperimentalne fizike te direktorom Instituta za fiziku . Osim otkrića radona, još je radio na otkriću torija. Prema nekim znanstvenicima, otkriće radona trebalo bi se pripisivati E. Rutherfordu a ne njemu, jer je on godinu ranije otkrio toron.

Položaj radona u periodnom sustavu elemenata odredio je škotski kemičar Sir William Ramsay, koji je sudjelovao u otkriću drugih plemenitih plinova (neona, kriptona i ksenona). On je odredio atomsku masu radona i smjestio ga ispod ksenona u 18. skupinu. [21]

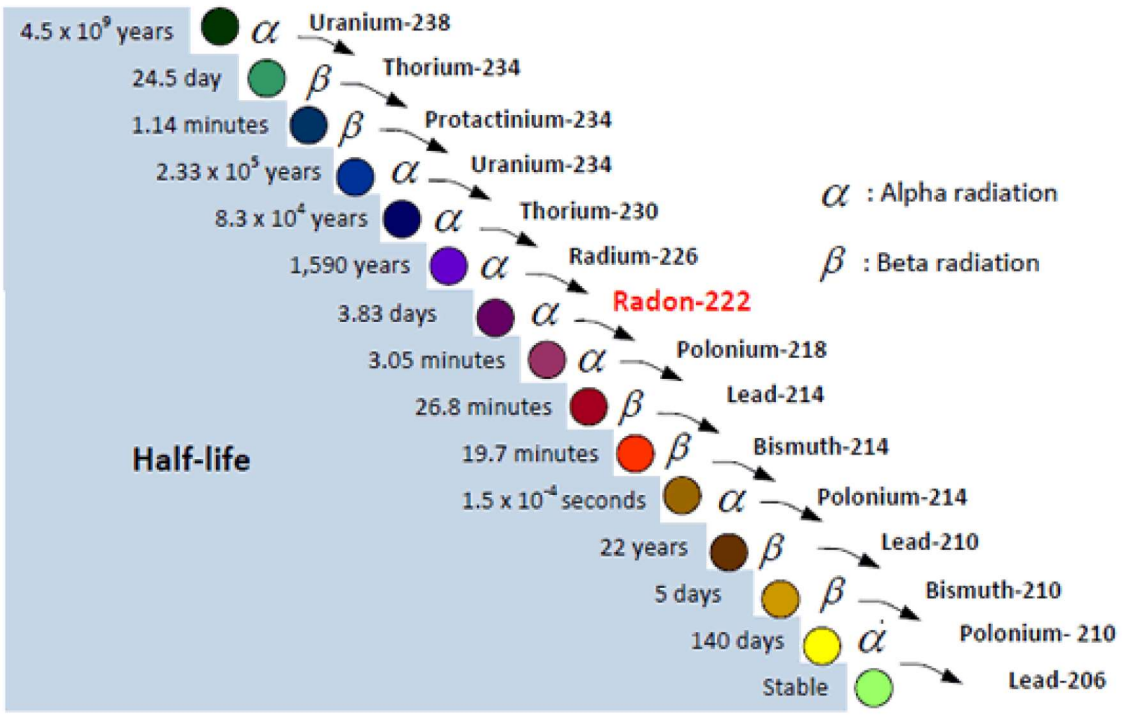
Vrelište radona je na -61,8° C, a talište na -71° C. Gustoća od 0, 0097 g/cm^3, oko sedam puta veća od gustoće zraka, čini ga najgušćim plinom u prirodi. Radon se otapa u vodi i postaje bistra, bezbojna tekućina. Bućkanjem i mreškanjem vode radon može izaći iz vode i vezati se za čestice zraka. [21] [23]

3.2. Radon u tlu i zraku

Radon nastaje u stijenama kao član radioaktivnog niza raspada uranija ^{238}U. Uranij se u stijenama nalazi od vremena nastanka Zemlje kao smjesa izotopa ^{234}U, ^{235}U i ^{238}U sa najvećim udjelom ^{238}U od oko 99, 28% . Spomenuti izotopi toron i aktinon dio su radioaktivnog niza torija, ^{232}Th, odnosno uranija, ^{235}U.

Na slici je prikazan radioaktivni niz uranija, ^{238}U sa vremenima poluraspada i tipom raspada za svaku novonastalu radioaktivnu jezgru, sve do nastanka stabilne jezgre. Na slici vidimo kako radon nastaje alfa raspadom radija, ^{226}Ra, pa je on u tom raspadu jezgra potomak, dok je u raspadu kojim nastaje također radioaktivni polonij, ^{218}Po jezgra roditelj.

Nakon polonija, radioaktivni niz nastavlja se izmjenom alfa i beta raspada. U konačnici, nakon nešto više od dvadeset i dvije godine nakon raspada radija nastaje stabilna jezgra olovo, ^{206}Pb. [24]



Slika 8. Radioaktivni niz uranija, ^{238}U. [24]

Budući da nastaje u tlu, kao plemeniti plin, plin koji gotovo ne stupa u kemijske reakcije, čisti radon iz tla lako izlazi u atmosferu i veže se za čestice zraka.

Koncentracija radona, dakako, nije svugdje jednaka i postoje različiti čimbenici koji utječu na to. Tlo ispod nas koje je bogato uranijevim rudama bogato je i radonom pa su onda i u zraku u blizini takvog tla povećane koncentracije radioaktivnog plina. No, ipak, na otvorenom prostoru koncentracije radona, kao i ostalih radioaktivnih nuklida niske su i ne predstavljaju opasnost za zdravlje ljude. [24] [25]

3.3. Radon u rudnicima uranijeve rude

Budući da radon nastaje radioaktivnim raspadom uranija u stijenama, razumljiva je činjenica da su u rudnicima uranijeve rude koncentracije radona vrlo visoke. Upravo radi obolijevanja i povećanje smrtnosti europskih rudara u rudnicima uranija, započeta su istraživanja o radonu.

Kanada je 2008. godine bila jedan od najvećih svjetskih proizvođača uranija (21% ili oko 9000 tona). Radi zaštite radnika, koncentracije radona u kanadskim rudnicima i postrojenjima za preradu uranija strogo se kontroliraju. Kontrole uključuju sofisticirane sustave za otkrivanje visokih koncentracija radona te nošenje osobnih dozimetara. Ukoliko su izmjerene koncentracije visoke, ventilacijski sustavi za zaštitu brzo smanjuju koncentraciju radona u zraku. Osim toga postoje sustavi za zadržavanje rude radi sprečavanja emisije radona u zrak. Razine izmjerene osobnim dozimetrima redovito prate nadležne zdravstvene službe. Navedeni načini zaštite osiguravaju očuvanje zdravlja radnika u rudnicima.

Osim rudnika, postoji još radnih mjesta ispod površine Zemlje u kojima radon može predstavljati opasnost. To su primjerice: podzemne željeznice, tuneli, špilje, rudnici koji služe kao turistička mjesta. [24] [26]

3.4. Radon u zatvorenom prostoru

Opasnost za ljudsko zdravlje predstavlja radon koji različitim transportnim mehanizmima iz tla dospijeva u zatvorene prostore u kojima ljudi borave, bilo to kuće, stambene zgrade, bolnice, vrtiće, škole. U takvim prostorijama radon se može akumulirati do vrlo visokih razina.

Glavni izvor radona u zatvorenom prostoru je tlo ispod zgrade (85 – 90%). Znatno manji udio dolazi od građevinskog materijala (5 – 10%) i iz podzemnih zaliha voda (oko 5%). Gotovo neznatan udio potječe od zemnog plina (< 1%). [8]

Ovisno o meteorološkim parametrima, a posebice temperaturnoj razlici između zraka na otvorenom prostoru i unutar građevine, postoji razlika tlaka između tla i temelja građevine. To uzrokuje pojačani protok zraka bogatog radonom iz tla u više dijelove građevine, ovisno o propusnosti temelja i poda. Osim toga, radon iz tla unutar građevine ulazi kroz različite pukotine na građevini.

Koncentracija radona u unutrašnjosti građevine ovisi o nekoliko parametara koji se mogu podijeliti na prirodne i tehničke.

Prirodni su parametri:

- koncentracija radona u tlu;
- sastav tla (kemija, geologija, vlaga tla, poroznost propusnost tla);

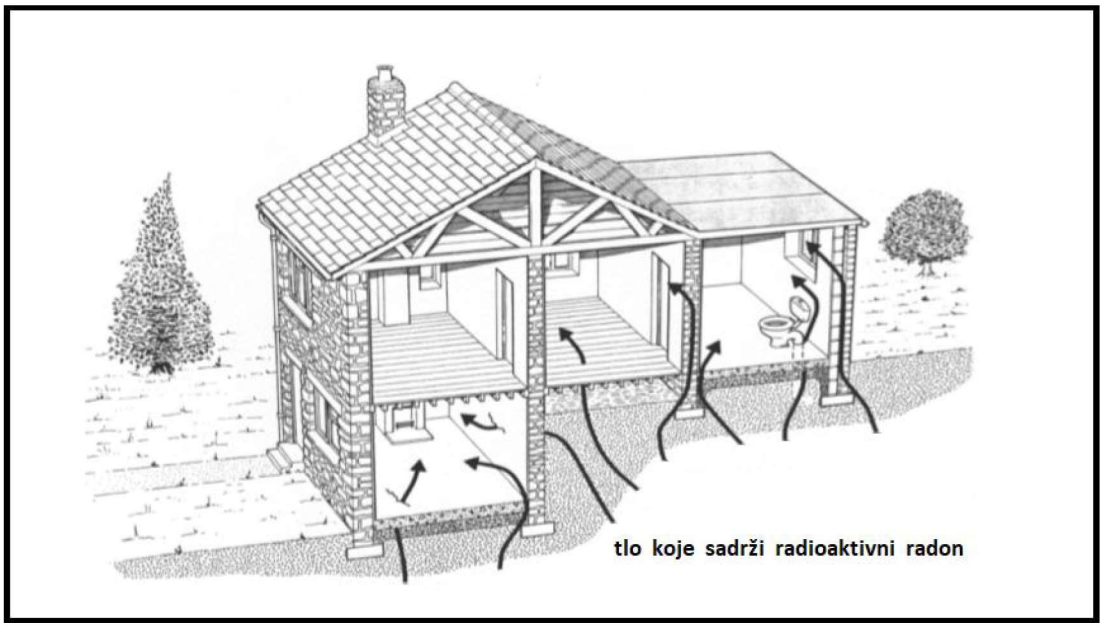
- razlika tlaka unutar i izvan građevine te razlika tlaka između tla i donjih prostorija građevine (zbog razlike tlaka može doći do stvaranja blagog vakuuma ispod građevine koji onda „povlači“ radon iz tla prema građevini); i
- meteorološki i sezonski parametri, uglavnom temperaturne razlike unutrašnjosti i izvan građevine.

U tehnološke parametre spadaju:

- način gradnje
- veličina površine građevina koje je u dodiru sa tlom;
- broj katova i etaža; te
- (ne)propusnost građevine, uključujući prisutnost pukotina na podu ili spojevima zidova, prostor oko cijevi i instalacija, odvoda, itd.

Veliki utjecaj na koncentracije radona ima način života: provjetravanje prostorija, način zagrijavanja, pušenje.

Iako su koncentracije radona uglavnom najviše u podrumima i sobama koje su u dodiru sa tlom, visoke koncentracije često se mogu naći i u prostorijama na katu. [8] [18] [25] [26] [27]



Slika 9. Načini ulaska radona iz tla unutar građevine (kuće). [25]

4. Dozimetrija i mitigacija radona

Budući da je radon plin bez boje, mirisa i okusa, ne možemo biti svjesni da smo u nekom trenutku izloženi njegovom štetnom utjecaju. Tek nakon izvjesnog vremena dolazi do manifestacije posljedica izlaganja zračenju. Efekti i posljedice izloženosti zračenju radona ovise o raznim faktorima (trajanje izloženosti, biološko stanje čovjeka, je li osoba pušač ili nepušač itd.) i danas se provode razna istraživanja koja ih proučavaju. Najčešći uzrok raka pluća na svijetu je pušenje cigareta. Iako predstavlja dosta manji rizik od cigareta, radon je drugi po redu uzročnik raka pluća na svijetu.

Izloženost kombinaciji plina radona i cigaretnog dima stvara najveći rizik od raka pluća. Većina smrtnih slučajeva vezanih uz radon javlja se kod pušača. Međutim, procjenjuje se da se više od 10% smrtnih slučajeva raka pluća povezanih s radonom događa kod nepušača.
Produkti raspada radona vežu se za aerosole u zraku i inhalacijom mogu dospjeti u dišni sustav čovjeka. U plućima, ti se elementi radioaktivno raspadaju i emitiraju zračenje, najvećim dijelom u obliku ionizirajućih alfa čestica. One ioniziraju tkivo, pri čemu se ono oštećuje sve do razine DNA. Ta oštećenja mogu dovesti do razvoja raka.
Taloženje produkata u plućima ovisi o faktorima kao što su veličina čestica, frekvencija disanja te volumen pluća. Također, postoje čimbenici o kojima ovisi kako će radioaktivna tvar utjecati na tkivo pluća. Na prvom mjestu je vrijeme poluraspada radioaktivne tvari. Ono utječe na vjerojatnost hoće li se radioaktivna tvar raspasti i emitirati ionizirajuće alfa čestice unutar pluća ili ne. Drugi bitan čimbenik je energija alfa čestica – što je njihova energija veća to je i veće oštećenje tkiva. Nadalje, na utjecaj zračenja na plućno tkivo utječe debljina zaštitnog sloja stanice kroz koje ionizirajuće čestice moraju proći kako bi došle do osjetljivog tkiva u stanici i razorile ju. I posljednji čimbenik je vjerojatnost – hoće li alfa čestice pogoditi osjetljivo tkivo i razoriti ga ili do toga neće doći. [8] [18] [26] [28] [29]

Krajem 16. stoljeća uočen je velik postotak smrtnosti rudara u rudnicima uranija u Srednjoj Europi. Iako su kroz godine postojale razne pretpostavke o razlozima ove nesretne pojave, ona je razjašnjena tek u 20. stoljeću. Pred kraj 19. stoljeća, kao glavni uzrok smrti rudara identificiran je rak pluća a 1924. godine pretpostavljena je činjenica da je uzročnik raka pluća plin radon.
Ove pretpostavke bile su poticaj za daljnja istraživanja plina radona. Rana mjerenja vezana za radon većinom su bila usmjerena na proučavanje pojava koje je radon izazivao u okolišu u

blizini rudnika. To su na primjer atmosferski elektricitet, izlazak iz tla i transport radona u atmosferu i sl. Oko 1950. godine započinju programi nadzora izloženosti rudara radonu i njegovim potomcima.

Istraživanja i mjere zaštite od radioaktivnog zračenja, pa tako i od zračenja od radona, vode se prema napucima i odredbama svjetskih organizacija čiji je cilj zaštita ljudi i očuvanje zdravlja, i to s naglaskom na utjecaj zračenja na život. Najvažnije organizacije su WHO[4] - Svjetska zdravstvena organizacija, odnosno specijalizirana organizacija koja djeluje pod njezinim vodstvom, IARC - Međunarodna organizacija za istraživanje raka, zatim ICRP[5] - Međunarodna komisija za zaštitu od zračenja, UNSCEAR - Znanstveni odbor o učincima ionizirajućeg zračenja Ujedinjenih naroda, IEAE - Međunarodna agencija za atomsku energiju te EPA - Agencija za zaštitu okoliša.

Ove organizacije vodeće su organizacije u svijetu čiji je glavni cilj zaštita zdravlja ljudi u pogledu ionizirajućeg zračenja. Svaka od njih dio svoga istraživačkog rada posvećuje zračenju koje dolazi od radona.

Kao uzrok raka pluća radon je formalno identificiran 1986. (WHO, 1986; IARC, 1988). U to su vrijeme glavni izvor informacija o riziku od raka izazvanog izloženosti radonu bila epidemiološka istraživanja rudara u rudnicima uranija (ICRP, 1993).

Prva mjerenja radona u zatvorenom prostoru nisu izazvala veliku pažnju a provedena su pedesetih godina prošlog stoljeća. Međutim, 1970.-ih godina u nekim zemljama počinju sve intenzivnija istraživanja prisutnosti i mjerenja koncentracije radona u zatvorenim prostorijama, stanovima, kućama, vrtićima, bolnicama.

Prvenstveno su to mjerenja koncentracije radona u zatvorenim prostorima poput kuća, stanova, vrtića i škola. Zatim, sve su češća mjerenja koncentracije radona u vodi o kojima će biti više riječi u narednim dijelovima ovog rada. [25] [26]

Referentna razina koncentracije aktivnosti radona u zatvorenom prostoru i na radnim mjestima na smije prelaziti 300 Bq/m^3, što odgovara godišnjoj dozi od oko 10 mSv. [18]

[4] Zbog česte upotrebe, u daljnjem tekstu za Svjetsku zdravstvenu rganizaciju koristim skraćenicu WHO prema engleskom nazivu World Health Organization.

[5] Zbog česte upotrebe, u daljnjem tekstu za Međunarodnu komisiju za zaštitu od zračenja koristim skraćenicu ICRP prema engleskom nazivu International Comission on Radiological Protection.

Tu razinu propisuju WHO i ICRP i ona je uvedena u Akcijski plan za radon te je Pravilnikom o granicama ozračenja, preporučenom doznom ograničenju i procjenjivanju osobnog ozračenja („Narodne novine“ broj 38/18) uvedena u zakonodavstvo Republike Hrvatske. [8] [30]

Maksimalna dopuštena koncentracija aktivnosti radona u vodi iznosi 100 Bq/l. Akcijska razina za smanjenje koncentracija radona u vodi iznosi 1000 Bq/l . [18]

Osim mjerenja koncentracije radona u zatvorenim prostorijama, vrše se i mjerenja koncentracije radona u vodi, proučava se biološki utjecaj radona na čovjeka odnosno njegova moguća povezanost s nekim bolestima, naročito s bolestima pluća, te se razvijaju strategije zaštite od štetnih učinaka zračenja radona.

Prema podacima Međunarodne komisije za zaštitu od zračenja, ICRP, relativno je kasno u znanosti započeo rad na principima zaštite od radona. Vjerojatan razlog je taj što je dobar dio pažnje bio posvećen zaštiti od antropogenih izvora zračenja, poput nuklearnih elektrana i zračenja iz medicinskih izvora.

Bitan korak učinjen je 1991. godine kada je ICRP objavila izvješća iz 1990. godine pod nazivom „Preporuke (ICRP, 1991)“. U njima je skrenuta pažnja na potrebu zaštite od prirodnih izvora zračenja u stanovima i kućama te radnim mjestima.

Nakon toga, svjetske organizacije za radiološku sigurnost započinju sa razvojem strategija za zaštitu od zračenja radona. Naime, zaštita od radona dugotrajan je proces koji traje nekoliko desetljeća. Cilj svake strategije bi trebao biti: smanjenje ukupnog rizika za opću populaciju, te smanjenje pojedinačnog rizika za osobe koje su najviše izložene. Kod zaštite od radona treba razlikovati prevenciju zračenja i smanjenje zračenja. Prevencija zračenja odnosi sa ne poduzimanje zaštitnih mjera prije izrade novih građevina, dok se smanjenje zračenja poduzima u već postojećim građevinama a uključuje:

Da bi strategija zaštite bila efikasna preporuka WHO i ICRP je njeno provođenje putem nacionalnog plana za zaštitu od radona

Akcijski plan djelovanja utvrđuju nacionalna tijela pod vodstvom za to stručnih osoba. Takav plan trebao bi uspostaviti okvir s jasnom infrastrukturom, postavljenim prioritetima i odgovornostima te postavljenim koracima za adekvatnu zaštitu od radona.

Nacionalna strategija zaštite radona zahtijeva i preuzimanje odgovornosti za čimbenike na koje se može utjecati, npr. odgovornost graditelja građevine, vlasnika građevine prema ljudima koji

u njoj borave, odgovornost poslodavca prema zaposlenicima i na kraju krajeva svake osobe koja boravi u građevini.

Načini smanjenja koncentracije radona u zatvorenim građevinama su: često provjetravanje prostorija, ugradnja sustava za ventilaciju, sprječavanje prolaska radona iz podruma u više dijelove građevine te brtvljenje poda i zidova. Zaštita od radona može imati pozitivan utjecaj na druge aspekte života, kao što je kontrola duhana (smanjenje pušenja cigareta) i poboljšanje unutarnje kvalitete zraka. [25] [26] [28] [29] [30] [31]

4.1. Akcijski plan za radon u Republici Hrvatskoj

Akcijski plan za radon u RH vrijedi za period od 2019. do 2024. godine i objavljen je u Narodnim novinama (NN 118/ 2018) pod pokroviteljstvom Državnog zavoda za radiološku i nuklearnu sigurnost. Akcijski plan predstavlja temelje za rješavanje dugoročnih rizika od posljedica izlaganja zračenju radona u stambenim zgradama, zgradama javne namjene te na radnim mjestima.

Prema 65. članku iz 1. stavka Zakona o radiološkoj i nuklearnoj sigurnosti (» Narodne novine«, broj 141/13, 39/15 i 130/17) Državni zavod za radiološku i nuklearnu sigurnost donosi Akcijski plan za radon uz mišljenje ministarstva nadležnog za zdravstvo, ministarstva nadležnog za graditeljstvo i prostorno uređenje, ministarstva nadležnog za zaštitu okoliša i energetiku i ministarstva nadležnog za znanost i obrazovanje.

Cilj Akcijskog plana je primjenom dobro osmišljenih mjera i aktivnosti pridonijeti smanjenju ozračenja radonom stanovnika Republike Hrvatske a posljedično tome pridonijeti i smanjenju rizika od pojave raka pluća povezanog s radonom.

Osnovne aktivnosti Akcijskog plana za radon obuhvaćaju:

1. mjerenje koncentracije radona u zraku u zatvorenim prostorima
2. mjerenje radona u tlu
3. mjerenje radona u vodi za ljudsku potrošnju
4. izrada radonskih zemljovida i razvoj sustava za prepoznavanje prioritetnih područja
5. mjerenje ekshalacije radona iz građevnog materijala u zatvorenom prostoru
6. mjerenje radona na radnim mjestima

7. osiguranje kvalitete
8. postupanje u slučaju povećanih koncentracija radona u zatvorenom prostoru
9. smanjenje izloženosti radonu u zatvorenim prostorima
10. komunikacijski plan
11. upravljanje podacima.

Sve aktivnosti su u Planu detaljno opisane. Plan još sadrži opise mjera koje se moraju poduzeti ukoliko su u zatvorenim prostoru otkrivene povišene koncentracije. Ukratko, te mjere podrazumijevaju intenzivno provjetravanje tih prostora, skraćivanje vremena zadržavanja u takvoj prostoriji ili preseljenje osoba u drugu prostoriju. Mjerenja je svakako potrebno ponoviti kako bi se utvrdio uzrok povišene koncentracije. Prema iskustvu drugih zemalja u planu se ističe da su pasivne mjere ipak najisplativije pa se stoga prije gradnje novih građevina moraju provesti mjerenja radona u tlu.

Prema Planu, mjere za smanjenje koncentracije radona u zatvorenim prostorima uključuju:

1. često i intenzivno provjetravanje prostora u kojima se boravi
2. brtvljenje svih prolaza/pukotina između tla i zgrade (cijevi, kabeli, pumpe za sustave grijanja itd.), između podruma (ako postoji) i zgrade (uključujući i ulazno stepenište i vrata) te osiguravanje kvalitetne ventilacije prostora (ukoliko takav sustav postoji)
3. posebne zaštitne mjere koje uključuju dodatno i instalaciju/postavljanje vodonepropusne barijere (radonskog štita)
4. opsežne mjere zaštite uključuju dodatno i instalaciju/postavljanje sustava za drenažu radona ispod ploče propusnog sloja.

Plan isto tako sadrži komunikacijski plan. U njemu je istaknuto da je, prema saznanjima dobivenima tijekom provedbe dosadašnjih mjerenja, informiranost javnosti o radonu i njegovim mogućim rizicima za zdravlje vrlo niska. Stoga je bitno ukazati na moguć štetan utjecaj radona na zdravlje i ukazati na mogućnosti njegova rješavanja na pristupačan način kako bi svaka faza procesa bila što jednostavnije provedena.

Prema Planu u tijeku je izrada radonskog zemljovida za cijelu Republiku Hrvatsku po županijama. Dosada su mjerenja provedena u Karlovačkoj, Ličko – senjskoj, Sisačko – moslavačkoj, Brodsko – posavskoj, Vukovarsko – srijemskoj, Istarskoj i Primorsko – goranskoj županiji. [8] [25]

4.2. Radon u vodi

Radon u vodi predstavlja dvostruki rizik za zdravlje ljudi. Prvi rizik je izlazak radona iz vode mućkanjem prilikom primjerice tuširanja, umivanja, pranja odjeće i sl. čime ponovno dolazi do mogućnosti inhalacije radona. Drugi od rizika odnosi se na ingestiju takve vode. Prema podacima WHO, epidemiološka istraživanja nisu potvrdila korelaciju između koncentracije radona u vodi i povećanog rizika od raka želudca, no utvrđeno je da radon unutar probavnog sustava ozračuje sluznicu želudca.

U plinovitom stanju, radon je srednje topljiv u vodi. Pod djelovanjem Van der Waalsovih sila radon tvori tzv. klatrate ($Rn\ 6H_2O$) metastabilne strukture u kojima je atom radona biva polariziran djelovanjem jakog dipolnog momenta vode. Topivost radona u vodi ovisi o njenoj pH – vrijednosti i temperaturi. Što je pH – vrijednosti veća (>7) dolazi do razaranja klatrata čime se radon vraća u plinovitu fazu.

Podaci međunarodnih istraživanja pokazali su da se 90% doze zračenja koja dolazi iz vode obogaćene radonom odnosi se na inhalaciju. Procijenjeno je da koncentracija radona od 1000 Bq/l u vodi za piće koja se ispušta iz slavine ili tuš kabine u prosjeku povećava koncentraciju radona za 100 Bq/m^3 u zatvorenom prostoru. [30]

Stoga je kontroliranje inhalacije radona iz pitke vode najučinkovitiji način kontrole radona u vodi. Ipak, u usporedbi sa radonom iz tla, koncentracije radona koji je u zrak dospio iz vode manje su i do milijun puta.

Mjerenja koncentracije radona u vodi često se vrše se ukoliko su na nekim područjima izmjerene visoke koncentracije radona u zraku. Prema dosadašnjim mjerenjima, vodovodna voda sadrži niske koncentracije radona. No, u seoskim sredinama veliki broj kućanstava ne koristi vodovodnu vodu nego vodu iz prirodnih izvora kako što su bunari i bušotine u tlu. Takva voda, voda koja nije tretirana, koje ne „putuje“ puno od izvora do kućanstva, mogla bi zadržavati velike koncentracije radona jer on zbog navedenih činjenica ne izlazi znatno iz nje.

U Akcijskom planu za radon pod rednim brojem 3 navedena je aktivnost mjerenje radona u vodi za ljudsku potrošnju. Prema Planu, mjerenje radona u vodi za ljudsku potrošnju provodi se sukladno odredbama Zakona o vodi za ljudsku potrošnju („Narodne novine“, brojevi 56/13, 64/15 i 104/17) i Pravilnika o parametrima sukladnosti, metodama analize, monitoringu i

planovima sigurnosti vode za ljudsku potrošnju te načinu vođenja registra pravnih osoba koje obavljaju djelatnost javne vodoopskrbe („Narodne novine“, broj 125/17).

Prema izvršenim mjerenjima koncentracije radona u vodi u zonama opskrbe koje opskrbljuju najmanje 10 000 ljudi daleko su ispod referentne vrijednosti od 100 Bq/l. Akcijska razina za smanjenje koncentracije radona u vodi iznosi 1000 Bq/l. Daljnja mjerenja radona u vodi vršit će se prema godišnjem planu monitoringa radioaktivnih tvari u vodi za ljudsku potrošnju.

Radon je, kao i radij i uranij, topiv u vodi. Vode iz podzemnih izvora stoga akumuliraju radon nastao u Zemljinoj kori. Radon koji se otopi u površinskim vodama kao što su rijeke i jezera, zbog uzburkanosti i tečenja, prelaska preko kamenja, brzo izlazi van i veže se za čestice zraka.

UNSCEAR procjenjuje da 1 000 Bq/l radona u vodi iz slavine u prosjeku povećava koncentraciju radona u zatvorenom prostoru za 100 Bq/m3.

Direktivom Europske unije (98/ 83/ EC) državama članicama nalaže se nadzor nad koncentracijom prirodnih radionuklida u pitkoj vodi. Prema Direktivi, ne smiju se zanemariti ni produkti radonova raspada, olovo i polonij. Stoga je potrebno utvrditi referentne koncentracije polonija i olova i one bi trebale biti praćene u skladu s principima utvrđenim Direktivom za prirodne radionuklide. Direktiva propisuje da je referentna koncentracije aktivnosti polonija u vodi za piće 0,1 Bq/l, dok je ona za olovo 0,2 Bq/l.

Postoje tehnike za smanjenje koncentracije radona u zalihama pitke vode. To su prozračivanje i upotreba granuliranih filtera s aktivnim ugljenom. Nedostatak prve metode što njome može doći do povećanja koncentracije radona u zraku. [27] [30] [32]

5. Eksperimentalni dio: Mjerenje radona u vodi u općini Slavonski Šamac

Općina Slavonski Šamac nalazi se na krajnjem istoku Brodsko – posavske županije uz obalu rijeke Save. U Općini su dva naselja: Slavonski Šamac (smješten na lijevoj obali rijeke Save) i Kruševica. Za svoj diplomski rad mjerila sam koncentraciju aktivnosti radona u vodi iz bunara i prirodnih izvora a koja se koristi u domaćinstvima u Slavonskom Šamcu i Kruševici. Tri lokacije iz kojih je uzeta voda nalaze izvan sela, u području gdje nema kuća nego se nalaze oranice i njive. Ta je voda prije bila korištena za piće i prehranu ljudi i domaćih životinja (prije 50- ak godina i ta su područja bila naseljena) a danas se koristi za navodnjavanje oranica.

5.1. Voda u općini Slavonski Šamac

U Republici Hrvatskoj još uvijek sva kućanstva nisu opskrbljena vodovodnom vodom nego za piće, pripremu hrane, tuširanje i pranje odjeće koriste vodu iz prirodnih izvora – bunara ili bušotina u tlu. Većinom su to seoske sredine poprilično udaljene od gradske vodoopskrbe. Kao mještanka jednog slavonskog sela znam da su bunari bili izvori pitke vode naših predaka.

Slika 10. Izvor prirodne vode (bunar u Slavonskom Šamcu).

Primjer takvog bunara je na Slici 10. Osim za navedene potrebe voda se koristila za navodnjavanje njiva, oranica, vrtova te prehranu stoke. Danas su bunari manje u upotrebi ali voda koja se crpi iz tla većinom ima izvor na mjestu gdje je prije postojao bunar. Dubina bunara, bušotina, pumpi i cijevi hidrofora[6] doseže između 7 i 10 m dubine.

[6] Hidrofor je uređaj koji omogućuje dopremu vode na više visine iz cisterne, bunara ili gradskog vodovoda. Svi hidrofori rade pod velikim tlakom što omogućuje podizanje vode na velike visine, odnosno iz velikih dubina.

Slika 11. Karta Općine Slavonski Šamac. Brojevima od 1 do 19 označeni su uzorci vode iz bunara, hidrofora, pumpi i jedan uzorak vodovodne vode.

U općini Slavonski Šamac u kojoj su provedena mjerenja samo neznatan broj kućanstava koristi vodovodnu vodu. Osim nekoliko kućanstava koristi ju škola, zgrada Općine i ostale javne ustanove.

Na Slici 10. prikazan je izvor iz kojeg sam uzimala vodu. Iako su bunari danas rjeđi, pumpe i hidrofori glavni su izvor pitke vode u općini Slavonski Šamac.

5.2. Uređaji za mjerenje radona

Za mjerenje koncentracije aktivnosti radona postoje uređaji koji su bazirani na različitim fizikalnim principima. Isto vrijedi i za mjerenje koncentracije aktivnosti radona u vodi. Neki od uređaja za takva mjerenja su:

- AlphaGUARD mjerni sustav – cjelovit sustav za mjerenje koncentracije radona i njegovih potomaka u zraku, mjerenje koncentracije radona u tlu i vodi, ali i mjerenje određenih meteoroloških parametara. Određivanje koncentracije radona u uzorku vode temelji se na određivanju koncentracije radona u zraku. Mjerenje se stoga sastoji od dva procesa – otplinjavanja radona i mjerenja koncentracije u ionizacijskoj komori. Radioaktivnim raspadom radon u ionizacijskoj komori ionizira 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 tzv. Digital Signal Processing tehnologija. Budući da jedan dio radona ostane u vodi, spomenutim k faktorom opisuje se ta količina radona. Prednost AlphaGUARDA je što je to terenski uređaj pa omogućuje analizu uzoraka izvan laboratorija.
- Alfa spektrometar DURRIDGE RAD 7 - alfa spektrometar koji može mjeriti koncentracija radona u vodi, zraku i zemlji. Ovaj uređaj mjeri koncentraciju radona iz koncentracije polonija - produkta raspada radona. Strujanjem zraka radon se ekstrahira iz vode pa onda strujanjem zraka dolazi u komoru u kojoj raspadom radona nastaje polonij. Pomoću električnog polja polonij se skuplja na scintilacijski detektor pa se iz koncentracije polonija određuje koncentracija radona. DURRIGE RAD 7 također je terenski uređaj.
- HPGe Gama spektrometar - tehnika koja se temelji na analizi spektra gama zraka koje radionuklidi emitiraju pri raspadu. HPGe Gama spektrometar (*High Purity Ge*) je poluvodički detektor koji funkcionira na način da je čisti ili dopirani germanij formiran je u veliku PN diodu dopiranjem s atomima donora i akceptora. Između N - tipa i P - tipa germanija se formira osiromašeni sloj u kojem nema slobodnih nositelja naboja. Dodatno jako električno polje proširuje osiromašeni sloj te ga čisti od slobodnih nositelja naboja koji nastaju termičkim gibanjem atoma germanija. Radi optimizacije

mjerenja i smanjenja šuma koji nastaje termičkim gibanje potrebno je tijekom mjerenja držati germanij na temperaturi od -200°C (što se ostvaruje pomoću tekućeg dušika). Apsorpcija gama zrake unutar osiromašenog područja dovodi do formiranja parova elektron - šupljina. Oni se priključuju N i P područjima formirajući na taj način kratki električni puls koji se pojačava i analizira.

- scintilacijski detektori:

Najrašireniju skupinu detektora danas čine upravo scintilacijski detekori. Za mjerenja u ovom diplomskom radu korišten je tekućinski scintilacijski detektor TriCarb 2900. [6] [32] [33]

5.3. Scintilacijski detektori

Princip rad scintilacijskih detektora temelji se na pojavi scintilacija – svojstvu određenih materijala, da prilikom prolaska nabijene čestice proizvode mali bljesak, odnosno scintilaciju. Naime, kada scintilacijske materijale ozračimo ionizirajućim zračenjem, oni postaju ionizirani i njihovi elektroni prelaze u pobuđena stanja. Povratkom u osnovno stanje, dolazi do stvaranja fotona vidljive svjetlosti koje vidimo kao bljeskove odnosno scintilacije. Razlikujemo reemisiju odmah (manje od 10^{-8} s) nakon apsorpcije, i nju nazivamo fluorescencijom dok zakašnjelu reemisiju (od nekoliko mikrosekundi do nekoliko sati) nazivamo fosforescencija.

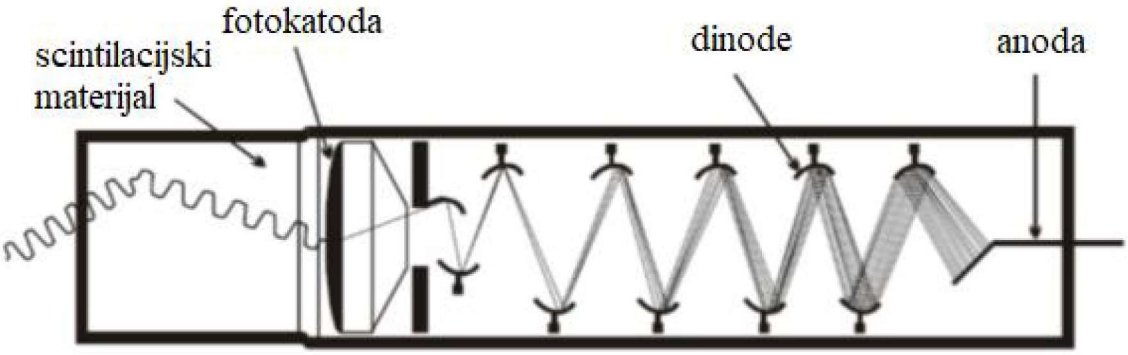
Scintilacijski materijal je detektor zračenja onda kada se na njega veže fotomultiplikatorska cijev. Ona omogućuje da od nastalih bljeskova dobijemo električni signal. Scintilacijski detektori spadaju u skupinu najraširenijih vrsta detektora.

Scintilatori mogu biti organski i neorganski, te u krutom, tekućem ili plinovitom stanju.

Povratak u osnovno stanje emisijom fotona za većinu scintilatora događa se u području vidljive svjetlosti. Stoga je važno odabrati materijal koji će biti proziran za valnu duljinu bljeskova. Time se fotonima omogućava kretanje po scintilatoru do fotomultiplikatorske cijevi.

Fotomultiplikatorska cijev je vakuumirana staklena cijev u kojoj se na jednom kraju nalazi katoda od materijala osjetljivog na svjetlost. Taj kraj cijevi u neposrednom je kontaktu sa scintilatorom. Fotoni iz scintilatora dolaze na katodu gdje se kao posljedica fotoelektričnog efektom proizvode elektroni. Na to se nastavlja sustav za sakupljanje nastalih elektrona koji ih vodi na dio za multiplikaciju elektrona – sustav dinoda koji završava anodom s koje se uzima nastali električni puls. Prilikom rada fotomultiplikatora između katode, pojedinih dinoda i

anode postoji visoki naponi koji ubrzava elektrone. Prilikom udara elektrona na svaku od dinoda stvaraju se sekundarni elektroni i na taj se način u konačnici dobiva pojačani električni puls na anodi.



Slika 12. Shematski prikaz fotomultiplikatorske cijevi. [34] [35]

5.3.1. Scintilacijski kokteli

Tekućinski scintilacijski kokteli sastoje se od dvije osnovne komponente – otapala i scintilatora.

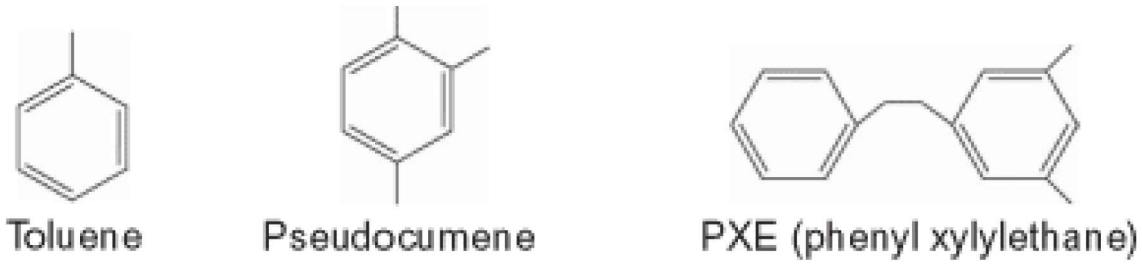
Ionizirajuće zračenje koje nastaje radioaktivnim raspadom pobuđuje molekule i stvara ionske parove u pripremljenom uzorku (sama priprema uzorka za mjerenje opisana je u odjeljku Priprema uzorka).

Otapalo čini preko 60% ukupne otopine koktela pa kada dođe do radioaktivnog raspada velika je vjerojatnost da će čestice koja nastaju raspadom naići na molekule otapala. Zbog toga otapalo:

- mora efikasno sakupljati energiju nastalu radioaktivnim raspadom
- mora efikasno predavati energiju molekulama scintilatora
- ne smije dovoditi do prigušivanja scintilacija (tzv. quench) i
- mora biti dobro otapalo na scintilator.

Otapala koja se koriste posjeduju tzv. aromatične prstene koji lako apsorbiraju energiju nastalog zračenja. Najčešća otapala su derivati benzena, npr. toluen, pseudokumen, PXE prikazani na Slici 13. Ta su otapala vrlo često zapaljiva, opasna ukoliko dođe do udisanja i

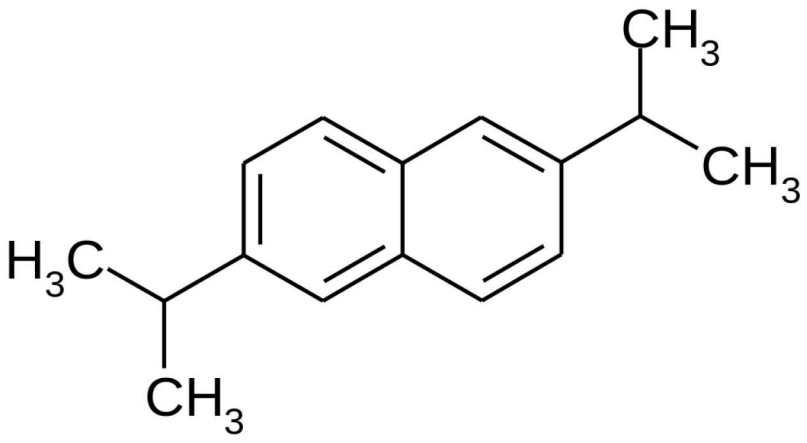
dodira sa kožom pa je potrebno biti oprezno prilikom pripreme uzoraka za mjerenje ali i samog čuvanja otapala.



Slika 13. Derivati benzena koji se koriste kao otapala u scintilacijskim koktelima.

Radioaktivni uzorci vrlo su često u obliku vodene otopine pa se kao takvi teško otapaju u aromatskim organskim otapalima. Stoga je u koktelu nužna prisutnost emulgatora koji omogućuju da vodeni radioaktivni uzorak i aromatsko otapalo formiraju stabilnu, bistru emulziju, koja je nužna za mogućnost provede mjerenja.

U svojim mjerenjima koristila sam Ultima Gold XR koktel. On se sastoji od spoja DIPN – a kao otapala (koji nije lako zapaljiv) sa scintilatorom fluorom.



Slika 14. DIPN – diizopropil naftalen, organski spoj koji služi kao otapalo u Ultima Gold XR koktelu.

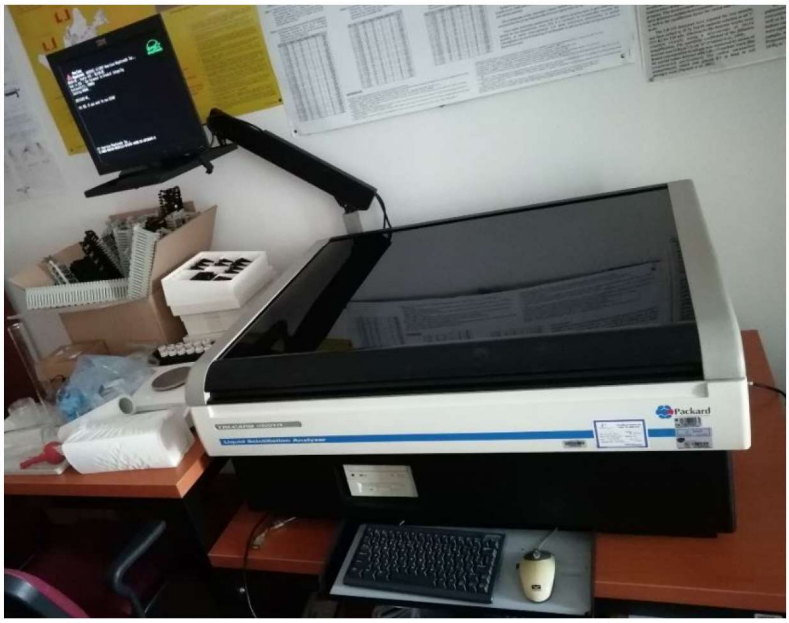
[36]

6. Uređaj TriCarb 2900

TriCarb 2900 novi je uređaj na Odjelu za fiziku za mjerenje radionuklida u uzorcima u tekućem stanju. To je dakle tekućinski scintilacijski detektor kojim smo mjerili koncentraciju radona u vodi (radioaktivno otapalo) a scintilator koji smo koristili je u obliku koktela Ultima Gold XR.

TriCarb 2900 uređaj može detektirati niske razine alfa, beta i gama zračenja.

Uređaj sa pripadnom opremom nužnom za njegov rad – računalom, tipkovnicom i mišem nalazi se na slici.



Slika 15. TriCarb 2900 uređaj sa pripadnom opremom nužnom za njegov rad na Odjelu za fiziku u Osijeku.

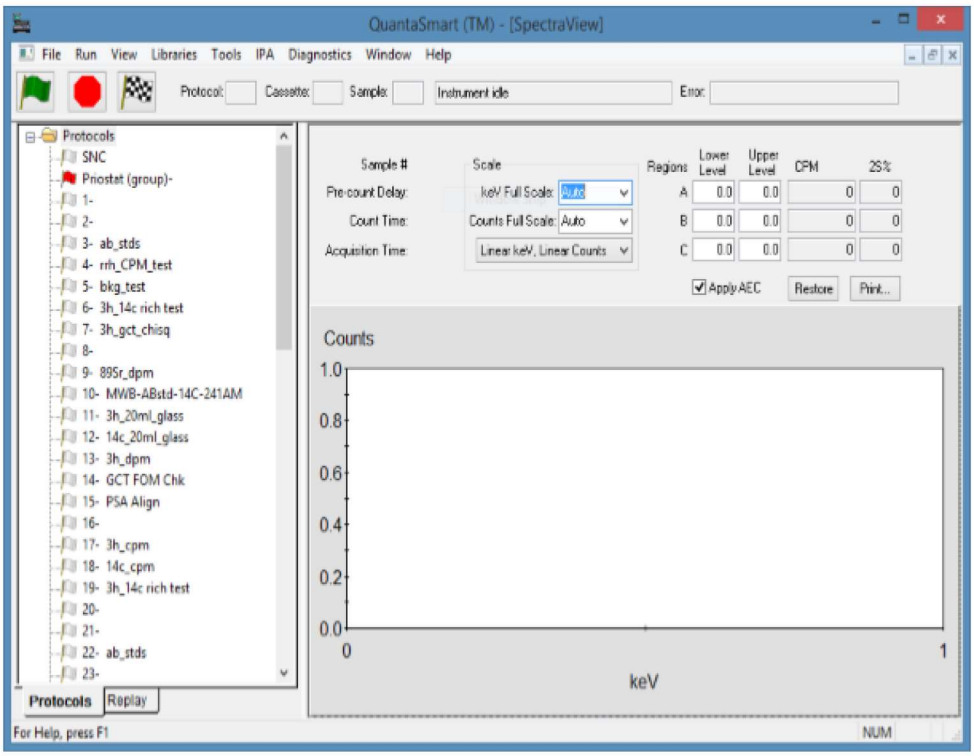
Vidimo da je to neprijenosan uređaj što znači da zahtijeva pripremu uzoraka i njihovu obradu na određenom za to predviđenom prostoru. Uređaj je potrebno držati u zatamnjenoj prostoriji kako ne bi došlo do utjecaja na optičke senzore u unutrašnjosti uređaja (što može dovesti do nastanka lažnih signala odnosno scintilacija koje potječu od svjetlosti a ne radona) te udaljenog od drugih izvora zračenja. Osim toga, zbog mogućeg zagrijavanja prilikom rada, uređaj je potrebno držati udaljenim barem 15 cm od zida ili neke druge površine. Sklop detektora

zaštićen je olovnim oklopom debljine <5 cm kako eventualno pozadinsko zračenje (atmosferski radon i kozmičko zračenje) ne bi utjecalo na mjerenja.

Detektor TriCarb 2900 uređaja sastoji se od dviju fotomultiplikatorskih cijevi koje se postavljene jedna nasuprot druge u reflektirajućoj optičkoj komori. Signal koji se detektira isključivo na obje cijevi računa se kao jedan događaj. Broj događaja akumuliranih tijekom mjerenja može se razvrstati prema energiji čime se dobije 2D uzorak spektra u određenom trenutku. Podaci u spektru obnavljaju se svakih 6 s.

Mjerenja pomoću TriCrab 2900 uređaja vrše se tako da se pripremljeni uzorak stavlja u bočice tzv. vialice, a zatim se vialice s uzorcima stavljaju u kazetu – plastični držač vialica.

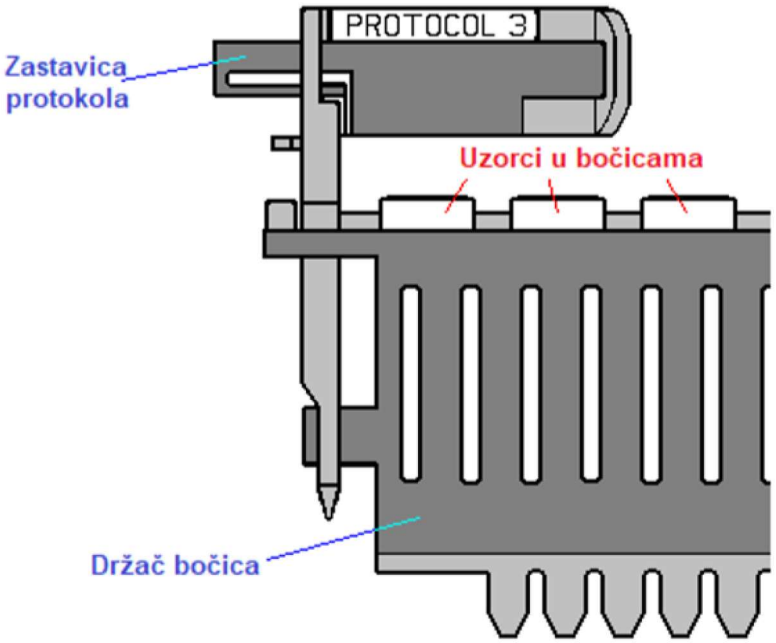
Slika 16. Prikaz kazeta u kojima se nalaze još uvijek prazne vialice za uzorke vode te vialica sa destiliranom vodom za mjerenje pozadinskog zračenja.



Slika 17. Glavni prozor programa.

QuantaSmart – softver TriCarb 2900 uređaja pruža velike mogućnosti postavki mjerenja. Odabir postavki mjerenja za TriCarb 2900 predstavlja definiranje protokola. Jedna od postavki prilikom definiranja protokola koju bih navela je odabir vrsta mjerenja, npr. CPM, count per minute, odnosno broj događaja u minuti, što znači da uređaj mjeri broj radioaktivnih raspada u jednoj minuti. U sljedećem odjeljku je navedena relacija preko koje ćemo iz dobivenih podataka o broju raspada u minuti dobiti koncentraciju aktivnosti radona. U programu možemo odabrati uzimamo li u obzir vrijeme poluraspada radioaktivne tvari te oblik, mjesto i naziv izlazne datoteke, kao što je to prikazano na slici.

Definirani protokol u računalu povezan je sa kazetom sa uzorcima pomoću zastavice za protokol. Nju stavljamo krajnje lijevo na kazeti kao što je to prikazano na slici. Svaka kazeta ima jedinstveni broj koji se preko zastavice s oznakom protokola očitava u računalu i za tu se kazetu izvode odabrane postavke. Na slici glavnog prozora vidimo prikazano i stablo protokola



Slika 18. Skica kazete i postavljanja zastavice za protokol.

Unutar uređaja odvija se mehanizam automatskog uzimanja vialica iz kazeta i slanja na detektor. Kada je završena analiza jedna vialice, ona se istim mehanizmom vraća u kazetu a uzima se nova. Kazete se pokreću u smjeru obrnutom od smjera kazaljke na satu. Za vrijeme izvođenja protokola, na prozoru za protokole vidimo simbole za vizualnu naznaku koji se protokol izvršava, odnosno uzorci iz koje kazete su u detektoru trenutno, koje su preostali, a koji su dovršen. [37]

6.1. Kalibracija uređaja TriCarb 2900 za radon

Kalibracija samog uređaja za mjerenje radona vrši se pomoću EPA 913 protokola. Prema navedenom protokolu potrebno je 100 ml otopine radija čija je aktivnost oko 1295 Bq/l. U posudu od 100 ml ulijemo 20 ml destilirane vode i 0,5 ml koncentrirane HNO_3 te analitičkom vagom odredimo početnu masu. Pipetom prenesemo potrebnu količinu otopine radija i izmjerimo konačnu masu. Destiliranom vodom razrijedimo dobivenu otopinu do 100 ml. U vialice ulijemo 10 ml scintilacijskog koktela i zatim 10 ml pripremljene otopine. Potrebno je pripremiti barem 3 otopine standarda i 3 uzorka sa destiliranom vodom za pozadinsko zračenje.

Nakon 30 dana, kada dođe do postizanja sekularne ravnoteže, pripremljene uzorke za mjerenje potrebno je ostaviti 3 sata u mraku te onda započeti mjerenje.

Potom prema EPA metodi računamo kalibracijski faktor – CF za ovaj uređaj.

On iznosi $(489{,}96 \pm 1{,}79)$ cpm[7]/Bq izračunat je prema formuli, i pretvoren u odgovarajuću mjernu jedinicu prema relaciji:

$$CF = \frac{S - B}{C\ V} \tag{7}$$

[38]

gdje je

$$S - broj\ događaja\ izmjeren\ u\ standardu\ (cpm)$$

$$B - broj\ događaja\ izmjeren\ kao\ pozadinsko\ zračenje\ (background)(cpm)$$

$$C - koncentracija\ aktivnosti\ standarda\ {}^{226}_{88}Ra\ (\frac{Bq}{l})$$

$$V - volumen\ standarda\ (l)$$

6.2. Uzorkovanje vode

19 uzoraka vode uzeto je 01. 05. 2018. u večernjim satima. Sa mjerenjima je započeto 02.05. 2018. Budući da je vrijeme poluraspada radona oko 3,8 dana prilikom obrade rezultata u obzir ćemo uzeti korekciju za vrijeme poluraspada no ipak kako bi korekcija za vrijeme poluraspada bila što manja, potrebno je uzorkovati vodu što kasnije u odnosu na početak mjerenja. U Tablici 1. prikazano je točno vrijeme uzorkovanja i mjerenja te iz kojeg izvora je uzet uzorak. Uzorci iz bunara označeni su narančastom bojom i za ovaj diplomski rad uzeto je i analizirano 10 uzoraka. Uzorci iz pumpi označeni su zelenom bojom i uzeta su i analizirana 4 uzorka i također 4 uzorka vode iz hidrofora koji su u tablicama označeni žutom bojom. Uzorak vodovodne vode nije obojan.

[7] cpm ili min^{-1} je skraćenica za counts per minute (broj događaja u minuti)

Tablica 1. Prikaz uzoraka uzetih u općini Slavonski Šamac. Uzorci iz bunara označeni su narančastom bojom, uzorci iz pumpi zelenom bojom a uzorci iz hidrofora žutom bojom. Uzorak vodovodne vode nije obojan.

UZORAK I LOKACIJA	VRIJEME UZORKOVANJA	DATUM MJERENJA	VRIJEME MJERENJA	VRSTA IZVORA
1. Sl. Šamac	18:20	02 – 05 – 18	13:15	bunar
2. Kruševica	18:35	02 – 05 – 18	14:15	pumpa
3. Kruševica	18:45	02 – 05 – 18	15:15	bunar
4. Kruševica	18:50	02 – 05 – 18	16:15	hidrofor
5. Sl. Šamac	19:00	02 – 05 – 18	17:20	bunar
6. Sl. Šamac	19:05	02 – 05 – 18	18:20	bunar
7. Sl. Šamac	19:10	02 – 05 – 18	19:30	hidrofor
8. Sl. Šamac	19:15	02 – 05 – 18	20:30	bunar
9. Kruševica	19:35	02 – 05 – 18	21:30	bunar
10. Kruševica	19:40	02 – 05 – 18	22:30	bunar
11. Kruševica	18:20	02 – 05 – 18	23:30	pumpa
12. Kruševica	20:05	03 – 05 – 18	00:35	pumpa
13. Kruševica	20:10	03 – 05 – 18	1:35	bunar
14. Kruševica	19:25	03 – 05 – 18	2:35	vodovod
15. Kruševica	19:45	03 – 05 – 18	3:40	hidrofor
16. Kruševica	19:30	03 – 05 – 18	4:45	bunar
17. Kruševica	20:00	03 – 05 – 18	5:45	hidrofor
18. Kruševica	21:10	03 – 05 – 18	6:45	bunar
19. Kruševica	19:45	03 – 05 – 18	7:45	pumpa

Uzorkovanje vode upravo je najveći uzrok pogrešaka pri mjerenju. Uzorak vode mora biti reprezentativan i kao takav ne smije biti u kontaktu sa zrakom.

Uzorke vode uzimala sam u staklene bočice. Prilikom uzorkovanja potrebno je biti vrlo oprezan kako radon prilikom mućkanja i mreškanja ne bi izašao iz vode. Uzorak je pravilno uzet ako u bočici ne vidimo mjehuriće zraka (u koje bi isto tako radon mogao „pobjeći“) što bi onda utjecalo na rezultate mjerenja. Jedan od načina uzorkovanja vode iz slavine je taj da pod mlazom vode nagnemo bočicu i pustimo vodu neka lagano teče u nju, bez mućkanja i mreškanja. Kada je bočica puna, dok voda još teče u nju i slijeva se, primaknemo čep i do vrha punu bočicu zatvorimo čepom. Upravo ovo je glavni izvor pogrešaka u mjerenjima.

Prilikom uzorkovanja vode iz bunara što mirnije, ponovno bez mućkanja kantom zagrabimo vodu iz bunara. Bočicu naopako uronimo u vodu i kada se napuni unutar kante prinesemo čep i zatvorimo bočicu. Uzorak je pravilno uzet ukoliko unutar bočice nema mjehurića.

Isti postupak je kod uzorkovanja vode iz pumpe.

Za neke uzorke vode iz bunara i pumpi uzela sam po dvije bočice upravo zbog provjere načina i kvalitete uzorkovanja.

Obzirom na vrijeme proteklo između uzorkovanja i početka mjerenja u obzir je uzeto vrijeme poluraspada radona. Mjerenje svakog uzorka traje 60 min.

6.3. Priprema uzoraka

Svakoj vialici pridružujemo oznaku (slovo, broj) koja se odnosi na uzorak koji je u toj vialici. U pripremljene vialice pipetom ulijevamo 10 ml Ultima Gold XR koktela. Drugom pipetom ulijevamo 10 ml vode iz uzorka. Nakon ulijevanja vode dobijemo smjesu prikazanu na Slici 19.

Slika 19. Smjesa dobivena neposredno nakon ulijevanja vode u koktel. Vidimo da je smjesa nehomogena i mutna.

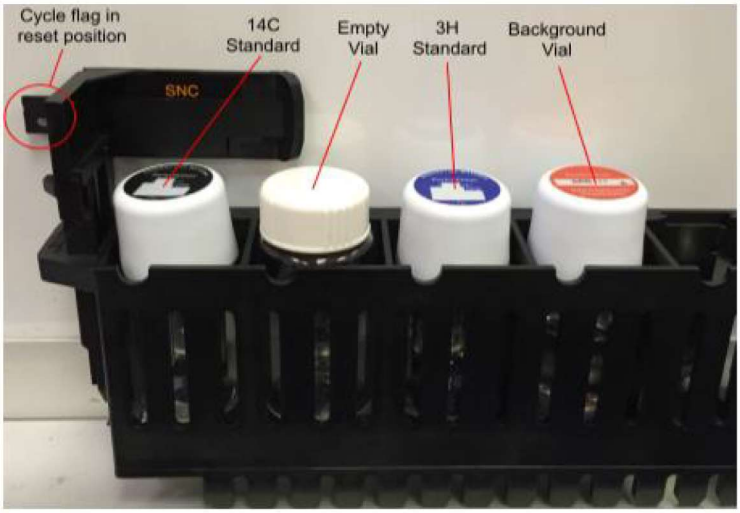
Dobivenu smjesu dobro protresemo dok ne dobijemo homogenu otopinu kakva ona mora biti za mjerenja.

U prvu vialicu u kazeti miješamo koktel sa destiliranom vodom za određivanje pozadinskog zračenja. Slika 20. prikazuje bočice prije i nakon što smo koktel i vodu protresli.

Slika 20. Uzorak u prvoj bočici uslikan je neposredno nakon ulijevanja vode u koktel. Nakon što dobro protresemo smjesu dobijemo homogenu, bistriju otopinu u kojoj se radon iz vode vezao za molekule koktela.

Prije svakog mjerenja potrebno je vršiti provjeru efikasnosti detektora – *Self Normalization and Calibration*.

Provjeru efikasnosti radimo tako da u kazetu postavimo bočicu sa standardom ^{14}C, nakon nje praznu bočicu koju koristimo za uzorke, zatim bočicu sa standardom ^{3}H i na kraju bočicu sa destiliranom vodom za mjerenje pozadinskog zračenja.



Slika 21. Prikaz kazeta sa uzorcima za kalibraciju sustava (zastavica za protokol ima naziv SNC): standard ^{14}C, prazna bočica, standard ^{3}H i destilirana voda te postavljena zastavica za protokol.

Kada pripremimo kazetu za kalibraciju, nju sa kazetom sa uzorcima stavljamo u uređaj, kao što je to prikazano na Slici 22. i pokrećemo mjerenje (definiramo protokol na način koji je opisan prethodno).

Slika 22. Kazeta za kalibraciju i kazete sa pripremljenim uzorcima za mjerenje unutar uređaja TriCarb 2900.

Slika 23. TriCarb uređaj- uređivanje postavki mjerenja.

Važno je za istaknuti kako su tekućinski scintilatori izrazito osjetljivi na nečistoće koje se mogu naći u otapalu. Nečistoće u otapalu uzrokuju navedena prigušenja (quench) čime dolazi do smanjenja količine zračenja koja dolazi iz radioaktivne otopine pa time i smanjenja scintilacija. Stoga se prije svakog mjerenja radi SQP test – Standard Quenching Parametar- Njime se

ispituje postoje li u uzorku nečistoće koje bi mogle dovesti do prigušenja. Ukoliko je SQP negativan, možemo vršiti daljnja mjerenja. [37]

6.4. Kalibracija uređaja

Po završetku mjerenja rezultate dobijemo u obliku *count per minute* – broj događaja u minuti. Događaje u minuti potrebno je pretvoriti u broj radioaktivnih raspada u litri, odnosno Bq/l, prema relaciji:

$$c\left(\frac{Bq}{l}\right) = \frac{G-B}{CF\ D\ V} \tag{8}$$

[38]

gdje je:

$$G - broj\ događaja\ izmjeren\ u\ uzorku\ (cpm)$$

$$B - broj\ događaja\ izmjeren\ kao\ pozadinsko\ zračenje\ (background)(cpm)$$

$$CF - prethodno\ određen\ kalibracijski\ faktor(\frac{cpm}{Bq})$$

$$D - faktor\ korekcije\ obzirom\ na\ vrijeme\ poluraspada\ (e^{-\lambda t})$$

$$V - volumen\ uzorka\ (l)$$

Standardnu devijaciju (dvostruku) mjerenja dobivamo prema formuli:

$$2\,\sigma = \frac{2\left(\frac{G}{T_G}+\frac{B}{T_B}\right)^{1/2}}{CF\ D\ V} \tag{9}$$

[38]

gdje je:

$$T_G - vrijeme\ mjerenja\ radioaktivnog\ uzorka$$

$$T_B - vrijeme\ mjerenja\ pozadinskog\ zračenja\ (background)$$

6.5. Rezultati mjerenja

Prema navedenoj formuli za računanje koncentracije aktivnosti radona (8) dobiveni su rezultati prikazani u Tablici 2.

Tablica 2. Rezultati mjerenja koncentracije aktivnosti radona u litri svakog uzorka. Uzorci iz bunara označeni su narančastom bojom, uzorci iz pumpi zelenom bojom a uzorci iz hidrofora žutom bojom. Uzorak vodovodne vode nije obojan.

UZORAK	DATUM MJERENJA	VRIJEME UZORKOVANJA	G (count/min)	c (Bq/l)	2σ (Bq/l)
1.	02 – 05 – 18	18:20	60,15	3,64	0,60
2.	02 – 05 – 18	18:35	56,19	2,74	0,59
3.	02 – 05 – 18	18:45	64,03	4,52	0,61
4.	02 – 05 – 18	18:50	49,25	1,16	0,57
5.	02 – 05 – 18	19:00	53,42	2,11	0,58
6.	02 – 05 – 18	19:05	56,18	2,74	0,59
7.	02 – 05 – 18	19:10	67,33	5, 28	0,62
8.	02 – 05 – 18	19:15	58,67	3,30	0,60
9.	02 – 05 – 18	19:35	59,32	3,45	0,60
10.	02 – 05 – 18	19:40	58,35	3,23	0,60
11.	02 – 05 – 18	18:20	57,67	3,08	0,59
12.	03 – 05 – 18	20:05	60,00	3,61	0,60
13.	03 – 05 – 18	20:10	52,00	1,78	0,58
14.	03 – 05 – 18	19:25	46,00	0,42	0,56
15.	03 – 05 – 18	19:45	66,00	4,97	0,62
16.	03 – 05 – 18	19:30	57,00	2,92	0,59
17.	03 – 05 – 18	20:00	62,00	4,06	0,61
18.	03 – 05 – 18	21:10	58,00	3,15	0,59
19.	03 – 05 – 18	19:45	50,00	1,33	0,57

Prema tablici vidimo da je najmanja koncentracija aktivnosti radona u vodovodnoj vodi, no i da je u svim drugim uzorcima koncentracija aktivnosti daleko ispod dozvoljenih 100 Bq/l.

Prosječna koncentracija aktivnosti radona u vodi iz prirodnih izvora u općini Slavonski Šamac iznosi 3,17 Bq/l sa pripadnom standardnom devijacijom 1,13 Bq/l.

Iz tablice također vidimo da vodovodna voda koju koristi škola ima najmanju koncentraciju radona. Razlog tome je što se vodovodna voda tretira raznim procesima pročišćavanja i poboljšanja kakvoće, a tijekom tih procesa radon uslijed mreškanja izlazi van iz vode. Vodovodna voda u općini Slavonski Šamac uzima se iz crpilišta u Sikirevcima. Prema podacima koje sam dobila na Odjelu za fiziku vodovodna voda iz škole bila je 16. 2. 2016. podvrgnuta istom mjerenju ali pomoću AlphaGuard uređaja. Tada je dobivena vrijednost koncentracije radona iznosila $(2{,}2 \pm 1{,}2)$ Bq/l.

Samo uzorkovanje vode glavni je izvor pogrešaka pri mjerenjima. Smatram da je uzorkovanje bunarske vode bilo s najmanje gubitaka radona jer nema pumpanja i mreškanja te drugih tehnoloških procesa koji bi mogli utjecati na gubitke radona. Stoga, statističkim testovima sam provjerila postoji li statistički značajna razlika između uzoraka uzetih iz bunara i pumpi te između uzoraka uzetih iz bunara i hidrofora.

Iako drugim dvjema metodama postoji veća šansa za gubitak radona, statistički t – testovi pokazali su da između uzoraka ne postoji statistički značajna razlika, odnosno da način uzorkovanja vode nema statistički značajan utjecaj na rezultate, što znači da je način na koji sam uzorkovala vodu iz ovih izvora nije utjecao značajno na dobivene rezultate.

T – testove sam radila u SPSS IBM programu, programu za statističku obradu podataka. Prije samog t – testa bilo je potrebno provjeriti jesu li rezultati raspoređeni prema normalnoj razdiobi, što je potvrdila plot analiza u SPSS – u.

Na slikama su rezultati t – testa za uzorke iz bunara i pumpi te uzorke iz bunara i hidrofora. Na početku t – testa definiram nul hipotezu, H_0 – između uzetih skupina uzoraka na postoji statistički značajna razlika.

T-Test

[DataSet0]

Group Statistics

	vrsta	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
koncentracija	b	10	3,0840	,77257	,24431
	p	4	2,6900	,97478	,48739

Independent Samples Test

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
									95% Confidence Interval of the Difference	
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	Lower	Upper
koncentracija	Equal variances assumed	,158	,698	,805	12	,437	,39400	,48972	-,67300	1,46100
	Equal variances not assumed			,723	4,600	,505	,39400	,54519	-1,04491	1,83291

Slika 24. Rezultati t -testa dobiveni u SPSS programu za uzorke uzete iz bunara i pumpi.

Na temelju rezultata t – testa vidimo da za ovu analizu p vrijednost iznosi 0,437 što je više od 0,05. Stoga prihvaćamo nul – hipotezu, odnosno ne postoji statistički značajna razlika između uzetih uzoraka.

T-Test

[DataSet0]

Group Statistics

	vrsta	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
koncentracija	b	10	3,0840	,77257	,24431
	h	4	3,8675	1,87779	,93889

Independent Samples Test

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
									95% Confidence Interval of the Difference	
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	Lower	Upper
koncentracija	Equal variances assumed	3,945	,070	-1,149	12	,273	-,78350	,68206	-2,26959	,70259
	Equal variances not assumed			-,808	3,415	,472	-,78350	,97016	-3,66929	2,10229

Slika 25. Rezultati t -testa dobiveni u SPSS programu za uzorke uzete iz bunara i hidrofora.

Na temelju rezultata t – testa vidimo da p vrijednost za ovu analizu iznosi 0,273 što je veće od 0,05. Stoga, ponovno prihvaćamo nul – hipotezu, odnosno ne postoji statistički značajna razlika između uzetih uzoraka.

Budući da su uzorci vode podjednako uzeti (kao što je već rečeno uzorkovanje vode najveći je uzrok pogrešaka), izračunata je efektivna doza koju prime odrasli i djeca pijenjem vode obogaćene radonom određene koncentracije, E_{ing}. Ona se računa prema formuli:

$$E_{ing} = K \cdot c \cdot KM \cdot T \tag{10}$$

[39]

gdje je:

$$K - konverzijski\ faktor, K\ (odrasli) = 10^{-8}\frac{Sv}{Bq}, K\ (djeca) = 2 \cdot 10^{-8}\frac{Sv}{Bq}$$

$$c - koncentracija\ aktivnosti\ radona\ (\frac{Bq}{l})$$

$$KM - količina\ prosječno\ ispijene\ vode\ u\ danu, KM = 2\ l$$

$$T - vrijeme, T = 1\ god$$

Tablica 3. Godišnja efektivna doza (10) koju primi čovjek pijući dnevno 2 l vode s izmjerenom koncentracijom aktivnosti radona, c.

UZORAK	c (Bq/l)	E_{ing} E (μSv/god) odrasli	E_{ing} E (μSv/god) djeca
1.	3,64	26,6	53,1
2.	2,74	20,0	40,0
3.	4,52	33,0	66,0
4.	1,16	84,7	16,9
5.	2,11	15,4	30,8
6.	2,74	20,0	40,0
7.	5,28	38,5	77,1
8.	3,30	24,1	48,2
9.	3,45	25,2	50,4
10.	3,23	23,6	47,2
11.	3,08	22,5	45,0
12.	3,61	26,3	52,7
13.	1,78	13,0	26,0
14.	0,42	30,7	6,1
15.	4,97	66,3	72,6
16.	2,92	21,3	42, 6
17.	4,06	29,6	59,3
18.	3,15	23,0	46,0
19.	1,33	97,1	19,4

Srednja vrijednost godišnje efektivne doze primljene pijenjem dvije litre vode iz prirodnih izvora u općini Slavonski Šamac iznosi $33{,}90 \pm 23{,}79$ μSv/god za odrasle dok za djecu ona iznosi $46{,}30 \pm 16{,}52$ μSv/god.

Godišnja efektivna doza koju primi čovjek inhalacijom radona koja izlazi iz vode obogaćene radonom računa se prema izrazu:

$$E_{inh} = k \cdot c \cdot R \cdot t \cdot F \tag{11}$$

[39]

gdje je:

$$k - konverzijski\ faktor, k = 9\ \frac{nSv}{Bq\ m^3 h}$$

$$c - koncentracija\ aktivnosti\ radona$$

$$R - omjer\ između\ radona\ u\ zraku\ koji\ dolazi\ iz\ vode\ i\ radona\ iz\ vode,$$

$$R = 10^{-4}$$

$$t - prosječan\ broj\ sati\ koje\ osoba\ provede\ u\ zatvorenom\ prostoru$$

$$t = 7000\frac{h}{god}$$

$$F - faktor\ ravnoteže\ između\ radona\ i\ njegovih\ potomaka, F = 0{,}4$$

Dobivena vrijednost predstavlja, dakle, koncentraciju radona koji u zrak dospijeva oslobađanjem iz vode. Doza uslijed inhalacije prirodno prisutnog atmosferskog radona veća je od gore izračunate i do milijun puta. No, točna koncentracija radona koji iz atmosfere dospijeva u zatvorene prostore priča je za sebe. Niska izmjerena koncentracija radona u jednoj građevini ne može dati relevantne informacije niti garantirati nisku koncentraciju radona u susjednoj građevini. Zbog toga je koncentraciju radona potrebno mjeriti na svakoj lokaciji.

Tablica 4. Godišnja efektivna doza (11) koju čovjek primi inhalacijom radona koji se (tuširanjem, pranjem odjeće) oslobađa iz vode obogaćene radonom.

UZORAK	c (Bq/l)	E_{inh} E (nSv/god)
1.	3,64	9,17
2.	2,74	6,90
3.	4,52	1,3
4.	1,16	2,92
5.	2,11	5,32
6.	2,74	6,90
7.	5, 28	13,3
8.	3,30	8,32
9.	3,45	8,70
10.	3,23	8,14
11.	3,08	7,76
12.	3,61	9,10
13.	1,78	4,49
14.	0,42	1,06
15.	4,97	12,5
16.	2,92	7,36
17.	4,06	10,2
18.	3,15	7.94
19.	1,33	3,35

Srednja vrijednost godišnje efektivne doze koju primi čovjek inhalacijom radona koji izlazi iz vode iznosi $(7{,}98 \pm 2{,}84)$ nSv/god.

U sljedećoj tablici navedene su maksimalne i minimalne vrijednosti koncentracije aktivnosti radona u vodi iz bunara, pumpi i hidrofora. Koristeći izraz:

$$z = \frac{c - \bar{c}}{\sigma} \tag{12}$$

[40]

izračunato je maksimalno odstupanje najviše i najniže koncentracije aktivnosti radona za vodu iz bunara (B), hidrofora (H) i pumpi (P) od srednje vrijednosti svih uzoraka vode iz navedenih izvora. Uzorcima s najvišom koncentracijom pridružena je oznaka „max“ (B – max, P – max i H – max) dok je uz najnižu koncentraciju pridružena oznaka „min“ (B – min, P – min i H – min). Vidimo da je najveće odstupanje od srednje vrijednosti kod vode iz hidrofora, i to uzorka s najvećom koncentracijom (u Tablici 5. uzorak H – max).

Tablica 5. Maksimalno odstupanje najviše i najniže vrijednosti koncentracije aktivnosti radona (12) u vodi iz bunara (B), pumpi (P) i hidrofora (H) od srednje vrijednosti svih uzoraka vode iz navedenih izvora.

UZORAK	c (Bq/l)	z
B - max	4,52	1,92
B - min	1,78	-1,23
P - max	3,61	0,39
P - min	1,33	-1,63
H - max	5,28	1,86
H - min	1,16	-1,78

Obzirom na uzete uzorke vode iz prirodnih izvora u općini Slavonski Šamac (njih 18) i činjenicu da neznatan broj kućanstva koristi vodovodnu vodu, procijenjena koncentracija aktivnosti radona u bunarskoj vodi u Slavonskom Šamcu (u statistici cijelog skupa iako je ukupan broj uzoraka nepoznat) sa 95% pouzdanosti iznosi između 2,65 i 3,69 Bq/l.

Sa 99% pouzdanosti vrijednost prosječna koncentracija aktivnosti radona u vodi u općini Slavonski Šamac iznosi između 2,46 i 3,88 Bq/l. Interval procjene računamo prema sljedećem izrazu:

$$P(L_1 < \mu < L_2) = 1 - \alpha \tag{13}$$

$$P(\bar{c} - t_{\frac{\alpha}{2},n-1}\, s\, e\, (\bar{x}) < \mu < \bar{c} + t_{\frac{\alpha}{2},n-1}\, s\, e\, (\bar{x})) = 1 - \alpha \tag{14}$$

[40]

gdje je:

$$\bar{c} - \ srednja\ vrijednost\ koncentracije\ aktivnosti\ za\ dani\ uzorak$$

$$n - broj\ uzoraka$$

$$t_{\frac{\alpha}{2},n-1} - koeficijent\ pouzdanosti\ (n < 30 - studentova\ raspodjela)$$

$$s\, e\, (\bar{x}) - standardna\ pogreška\ procjene\ artimetičke\ sredine$$

$$s\, e\, (\bar{x}) = \frac{\sigma'}{\sqrt{n}}$$

$$\sigma' - procijenjena\ varijanca\ cijelog\ skupa\ uzoraka$$

$$\sigma' = \sigma^2 \frac{n}{n-1}$$

$$(1 - \alpha) - vjerojatnost\ da\ će\ se\ parametar\ \mu\ naći\ u\ granicama\ L_1\ i\ L_2$$

7. Zaključak

Prema dobivenim rezultatima uzorci vode uzeti u Općini Slavonski Šamac potpuno su ispravni za piće u pogledu koncentracije aktivnosti radioaktivnog plina radona. Prosječna koncentracija aktivnosti radona u tim uzorcima koja iznosi $(3{,}17 \pm 1{,}13)$ Bq/l oko 32 puta je manja od maksimalne dopuštene vrijednosti. Godišnja efektivna doza koju primi čovjek pijući prosječno 2 l ove vode iznosi iznosi $(33{,}90 \pm 23{,}80)$ μSv/god i daleko je ispod referentne razine. Isto tako, koncentracija aktivnosti radona koji iz vode izlazi van neznatnim dijelom doprinosi koncentraciji radona koja se nalazi u nekoj zatvorenoj građevini (ukupna koncentracija radona u zraku veća je i do milijun puta u odnosu na koncentraciju radona koja iz vode izlazi u zrak).

Na temelju ovih mjerenja dalo bi se zaključiti da voda u općini Slavonski Šamac u prosjeku sadrži neznatne količine otopljenog radona. No, upravo je to najveći problem kod mjerenja radona. Mjerenjima je potvrđeno da se koncentracije aktivnosti radona u zraku pa tako i vodi mogu znatno razlikovati iako je područje mjerenja vrlo blizu jedno drugome. Stoga, za mjerenje radona nikada nije uzet dovoljan broj uzoraka kako bi se primjerice u nekoj općini odredila prosječna koncentracija aktivnosti radona. Strategija zaštite od radona zahtijeva dakle veliki broj mjerenja na određenom prostoru.

Kod mjerenja radona u vodi način uzorkovanja najbitniji je parametar mjerenja. Kako bi rezultati bili vjerodostojni bitno je vodu uzorkovati bez mreškanja i mućkanja i bez mjehurića unutar bočice za uzorkovanje. Provedenim t – testovima pokazano je da su uzorci za ovaj rad uzeti pravilno, odnosno da način uzorkovanja nije utjecao značajno na dobivene rezultate. Statističkom analizom izračunato je odstupanje maksimalnih i minimalnih vrijednosti svake vrste uzoraka (uzoraka iz bunara, hidrofora i pupmi) od srednje vrijednosti te je izračunata procijenjena koncentracija radona za sve uzorke vode, no ponovno napominjem da bi se odredila prosječna koncentracija radona u vodi u općini Slavonski Šamac, potrebno je uzeti uzorak iz svake građevine, odnosno kućanstva.

Prema dobivenim mjerenjima, obzirom da su dobivene vrijednosti daleko ispod referentnih razina, daljnja mjerenja koncentracije aktivnosti radona kao i poduzimanje mjera zaštite, nisu potrebna.

8. Popis literature

[1] https://www.hzjz.hr/aktualnosti/svjetski-dan-bubrega-2019/ (Datum pristupanja: 25.7.2019.)

[2] http://www.svjetskidanbubrega.org/p4-endemska-nefropatija.htm (Datum pristupanja: 25.7.2019.)

[3] http://www.world-nuclear-news.org/Articles/Help-the-public-understand-radiation,-advises-canc (Datum pristupanja: 20.11.2018.)

[4] https://www.ingenia.org.uk/Ingenia/Articles/f945fdad-1593-4536-9b6c-c572d1e3df35 (Datum pristupanja: 20.11.2018.)

[5] https://www.theguardian.com/environment/2011/apr/26/obesity-smoking-more-dangerous-radiation (Datum pristupanja: 20.11.2018.)

[6] http://radon.fizika.unios.hr/ (Datum pristupanja: 8.8.2019.)

[7] World Health Organisation (WHO). Guidelines fordrinking water quality, third edn. Volume 1. World Health Organization (2004).

[8] Akcijski plan za radon, Narodne novine, br. 118/18.

[9] https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/radon-and-health (Datum pristupanja: 8.8.2019.)

[10] https://sosradon.org/files/sosradon/HealthCareProvidersGuide%20%281%29.pdf

[11] http://www.mhs.ox.ac.uk/moseley/university/ (Datum pristupanja: 5.8.2019.)

[12] https://element.hr/artikli/file/2434 (Datum pristupanja: 8.8.2019.).

[13] http://www.fizika.unios.hr/of4/wp-content/uploads/sites/47/2016/04/05-Nuklearna_fizika_predavanje.pdf (Datum pristupanja: 5.8.2019.)

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

[15] https://radioaktivniotpad.org/radioaktivnost/ (Datum pristupanja: 8.8.2019.)

[16] http://silverstripe.fkit.hr/kui/assets/Uploads/Osvjezimo-znanje-331-332.pdf (Datum pristupanja: 27.8.2019.)

[17] http://radon.dzrns.hr/o-radonu/ (Datum pristupanja: 8.8.2019.)

[18] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). Effects of Ionising Radiation. Volume I UNSCEAR 2006 Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation to the General Assembly. United Nations. New York. 2008. ISBN 978-92-1-142263-4.

[19] https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/radon-and-health (Datum pristupanja: 8.8.2019.)

[20] http://tehnika.lzmk.hr/tehnickaenciklopedija/plemeniti_plinovi.pdf (Datum pristupanja: 5.8.2019.)

[21] http://www.chemistryexplained.com/elements/P-T/Radon.html (Datum pristupanja: 8.8.2019.)

[22]https://inis.iaea.org/search/searchsinglerecord.aspx?recordsFor=SingleRecord&RN=21062308 (Datum pristupanja: 8.8.2019.)

[23] http://www.rsc.org/periodic-table/element/86/radon (Datum pristupanja: 8.5.2019.)

[24] http://nuclearsafety.gc.ca/eng/resources/fact-sheets/radon-fact-sheet.cfm (Datum pristupanja: 8.8.2019.)

[25] ICRP, 2014. Radiological protection against radon exposure. ICRP Publication 126. Ann. ICRP 43(3).

[26] ICRP, 2010. Lung Cancer Risk from Radon and Progeny and Statement on Radon. ICRP Publication 115, Ann. ICRP 40(1).

[27] https://sosradon.org/files/sosradon/HealthCareProvidersGuide%20%281%29.pdf (Datum pristupanja: 5.8.2019.)

[28] AEA, Safety Standards for protecting people and the environment, Specific Safety Guide No. SSG-32. Protection of the Public against Exposure Indoors due to Radon and Other Natural Sources of Radiation.

[29] Safety reports series, No 33, Radiation protection against radon in workplaces other than mines, International Atomic Energy Agency, Vienna, 2003.

[30] World Health Organization (WHO). Handbook on Indoor Radon: A Public Health Perspective, WHO, 2009.

[31] World Health Organisation (WHO). Guidelines for Drinking Water Quality, Third edn. Volume 1. World Health Organization (2004).

[32] Pavlacic A. Usporedba metoda mjerenja koncentracija aktivnosti radona uvodi. Diplomski rad. Odjel za fiziku Sveučilišta J. J. Strossmayera u Osijeku. (2018.)

[33] Bošnjaković, M. Radon u prirodnim mineralnim vodama. Diplomski rad. Odjel za fiziku Sveučilišta J. J. Strossmayera u Osijeku. (2018.)

[34] http://www.phy.pmf.unizg.hr/~bosnar/pfec/scintilator.pdf (Datum pristupanja: 8.8.2019.)

[35] Ross, H., Noakes, J. E., Spaulding, J. D. Liquid Scintillation Counting and Organic Scintillators. ISBN 0-87371-246-3.

[36] https://www.perkinelmer.com/lab-products-and-services/application-support-knowledgebase/radiometric/liquid-scintillation-cocktails.html (Datum pristupanja: 8.8.2019.)

[37] QuantaSmart™ for the Tri-Carb® Liquid Scintillation Analyzer, (Models 4810TR, 4910TR, 5110TR, and QuantulusTM GCT 6220). Reference Manual.

[38] 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. EnvironmentalProtectionAgency. 89119.

[39] Todorović[1], N., Jakonić[2], I., Nikolov[1], J., Hansman[1], J., Vesković[1], M. Establishment of a Method for ^{222}Rn Determination In Water by Low-level Liquid Scintillation Counter. [1]Faculty of Sciences, Department of Physics, University of Novi Sad, Novi Sad, Serbia, [2]Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad, Novi Sad, Serbia.

[40] Montgomery, D.C., Runger, G.C.: Applied Statistics and Probability for Engineers, Third Edition, John Wiley & Sons, Inc., New York, 2003.

Životopis

Janja Zubović rođena je 5. prosinca 1994. u Slavonskom Brodu. Osnovnu školu „Josip Kozarac“ završila je u Kruševici. Nakon završene osnovne škole upisuje Gimnaziju „Matija Mesić“ u Slavonskom Brodu. Po završetku Gimnazije, 2013. godine, radi ljubavi prema prirodnim znanostima, odlučuje se nastaviti svoje obrazovanje na osječkom Odjelu za fiziku. 2016. godine, nakon završetka Preddiplomskog studija nastavlja svoj studij na Diplomskom studiju fizike i informatike. U slobodno vrijeme čita i uči strane jezike.