

Procjena godišnje efektivne doze u stambenom objektu u Donjem Miholjcu

Košćak, Matea

Master's thesis / Diplomski rad

2019

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:160:441636>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-14**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
ODJEL ZA FIZIKU

MATEA KOŠČAK

PROCJENA GODIŠNJE EFEKTIVNE DOZE U
STAMBENOM OBJEKTU U DONJEM MIHOLJCU

Diplomski rad

Osijek, 2019.

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
ODJEL ZA FIZIKU

MATEA KOŠĆAK

PROCJENA GODIŠNJE EFEKTIVNE DOZE U
STAMBENOM OBJEKTU U DONJEM MIHOLJCU

Diplomski rad

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

Osijek, 2019.

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

Predgovor

U ovom diplomskom radu provedeno je i analizirano istraživanje koncentracije radona u zraku u stambenom objektu u Donjem Miholjcu. Mjerenje koncentracije radona u zraku provedeno je dvjema metodama: Solid State Nuclear Track – etched Detector (SSNTD) i Termoluminiscentnim dozimetrima (TLD). Radon je radioaktivni plin koji izlazi iz zemlje a akumulira se u stambenim objektima izgrađenim na tom tlu. Ovisno o vrsti tla, točnije udjelu uranija ^{238}U u tlu, koncentracija radona može biti veća ili manja. Stambeni objekt koji je odabran za provođenje mjerenja meni je značajan iz više razloga. Prvi od tih razloga je taj što sam ja tamo odrasla i živjela većinu svog života. Drugi razlog je taj što se stambeni objekt, odnosno zgrada nalazi na četiri etaže te se mogu mjeriti koncentracije radona na svakoj etaži zgrade čime se dobiva vertikalni profil koncentracije radona. Zgrada je izgrađena 1990 – ih godina, a takav je tip stambenih objekata vrlo čest u ovom dijelu Republike Hrvatske. Također, za provođenje ovog mjerenja motiviralo me to da svoju okolinu upoznam sa prirodnim zračenjem kojim smo svakodnevno okruženi. Ljudi vrlo često nemaju saznanja o ionizirajućem značenju i njegovom učinku na čovjeka. Vrlo često na spomen riječi „zračenje“ imaju negativne emocije koje su prouzročene ne znanjem. Iz svih tih razloga mjerenje se provodilo sa dvije vrste detektora. Odabrane su dvije vrste detektora da se mogu usporediti doprinosi rezultata mjerenja i iz njih donijeti validan zaključak.

Zahvala

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

Velika hvala mojoj obitelji i dečku na podršci.

Sadržaj

1. UVOD.....	1
2. RADIOAKTIVNOST	3
2.1. VRSTE RADIOAKTIVNOG RASPADA	4
2.1.1. α RASPAD	4
2.1.2. β RASPAD	6
2.1.3. γ RASPAD	9
2.2. ZAKON RADIOAKTIVNOG RASPADA	10
3. DOZIMetriJA.....	14
3.1. DOZIMetriJSKE VELIČINE I NJIHOVE MJerNE JEDINICE.....	14
3.2. UTJECAJ IONIZIRAJUĆEG ZRAČENJA NA STANICU.....	18
4. RADON.....	20
4.1. FIZIKALNE I KEMIJSKE KARAKTERISTIKE RADONA.....	20
4.2. RADON U TLU I ZRAKU	24
5. EKSPERIMENTALNI POSTUPCI – MJerENJE RADONA U ZRAKU	29
5.1. SSTND (SOLID STATE NUCLEAR TRACK DETECTOR) DETEKTORI.....	29
5.1.1. MJerENJE RADONA DETEKTORSKOM KUTIJIcOM SSNTD	31
5.1.2. REZANJE FILMOVA.....	32
5.1.3. OZNAČAVANJE FILMOVA.....	33
5.1.4. ČUVANJE FILMOVA NAKON IZLAGANJA DO JETKANJA I IZLAGANJE FILMOVA.....	33
5.1.5. POSTAVLJANJE DETEKTORSKE POSUDE.....	35
5.1.6. KEMIJSKA OBRADA FILMOVA LR 115 S tip II	35
5.1.7. BROJANJE FILMOVA	37
5.1.8. MATEMATIČKI IZRAZI ZA RAČUNANJE.....	37
5.2. TERMOLUMINISCENTNI DOZIMetri (TLD)	39
5.2.1. FILMSKI DOZIMetri.....	39
5.2.2. TERMOLUMINISCENCIJA	40
5.2.3. PANASONIC UD - 802 AT DOZIMETAR	42
6. REZULTATI I RASPRAVA	46
6.1. ANALIZA REZULTATA.....	57
7. ZAKLJUČAK	66
8. LITERATURA.....	69
9. ŽIVOTOPIS.....	72

Diplomski rad

PROCJENA GODIŠNJE EFEKTIVNE DOZE U STAMBENOM OBJEKTU U DONJEM MIHOLJCU

MATEA KOŠČAK

Sažetak

U teorijskom dijelu diplomskog rada navedene su, opisane i objašnjene vrste radioaktivnog raspada. Opisane su dozimetrijske veličine, kao i utjecaj ionizirajućeg zračenja na ljudsko tijelo. Navedene su fizikalne i kemijske karakteristike radona i njegovih kratkoživućih potomaka. Također je opisan način prijenosa radona iz tla u zrak. Nadalje, objašnjeni su razlozi istraživanja radona i njegovog opasnog djelovanja na zdravlje čovjeka. U radu su korištene dvije metode mjerenja: SSNTD detektorima i TL dozimetrima. SSNTD detektorima je mjerena koncentracija radona u zraku kroz određeni vremenski period dok je TL okolišnim dozimetrima mjereno ukupno zračenje u periodu od godinu dana.

U eksperimentalnom dijelu rada opisani su uređaji i metode pomoću kojih su izvršena mjerenja koncentracije radona u zraku, te su izneseni rezultati mjerenja. Izračunata je godišnja efektivna doza zračenja za osobe koje žive u promatranom stambenom objektu. Na kraju diplomskog rada iznesen je zaključak vezan za metodologiju provedenog istraživanja, dobivene rezultate mjerenja te njihovu korektnost.

66 stranica, 23 slike, 20 tablica, 32 literaturna navoda

Rad je pohranjen u knjižnici Odjela za fiziku

Ključne riječi: radioaktivnost / dozimetrijske veličine / radon / SSNTD detektor / TL dozimetar

Mentori : doc. dr. sc. Marina Poje Sovilj (Odjel za fiziku), izv. prof. dr. sc. Branko Petrincec (Institut za medicinska istraživanja i medicinu rada)

Ocjenjivači: doc. dr. sc. Zvonko Glumac, mr. sc. Slavko Petrinšak

Rad prihvaćen: 25. listopada 2019.

ESTIMATION OF THE ANNUAL EFFECTIVE DOSE IN A RESIDENTIALN BUILDING IN DONJI MIHOLJAC

Abstract

The types of radioactive decay are listed, described and explained in the theoretical part of the thesis. Dosimetric quantities are described as well as the effect of ionizing radiation on the human body. The physical and chemical characteristics of radon and its short-lived offspring are listed. A method for transferring radon from the ground to the air is also described. Furthermore, the reasons for the study of radon and its hazardous effects on human health are explained. Two methods of measurement were used in the paper: SSNTD detectors and TL dosimeters. SSNTD detectors measured radon concentration in the air over a period of time, while TL dosimeters measured total radiation over a period of one year.

The experimental part of the paper describes the devices and methods used to measure radon concentration in the air and presents the results of the measurements. The annual effective radiation dose for persons living in the monitored dwelling was calculated. At the end of the thesis, a conclusion is made regarding the methodology of the conducted research, obtained measurement results and their correctness.

66 pages, 23 figures, 20 tables, 32 references

Thesis deposited in Department of Physics library

Keywords: radioactivity / dosimetric quantities / radon / SSNTD detector / TL dosimeters

Supervisors: Assistant professor, Marina Poje Sovilj, PhD; Associate professor, Branko Petrinec, PhD

Reviewers: Assistant professor, Zvonko Glumac, PhD; Lecturer Slavko Petrinšak, MSc

Thesis accepted: October 25th, 2019

1. UVOD

Sva živa bića žive izložena prirodnoj radioaktivnosti koju primaju od okolišnih čimbenika kao što su zrak, voda, hrana i tlo (zemlja). Svo zračenje koje živo biće primi putem okoline je dio okoline u kojoj živimo. Veliki udio primljene doze tog zračenja (oko 50% ukupne doze zračenja) potječe od radona, prirodnog radioaktivnog plina [22]. Veliku važnost u količini primljenog zračenja imaju i potomci radona koji nastaju pri njegovom raspadu.

Radon je radioaktivni plin koji nastaje alfa radioaktivnim raspadom radija $^{226}_{88}\text{Ra}$ koji je potomak u lancu raspada uranija $^{238}_{92}\text{U}$. Poznato je oko dvadesetak izotopa, a od toga su tri prirodno radioaktivna izotopa koji nastaju u tlu radioaktivnim raspadom radija (tj. nalaze se u radioaktivnim nizovima uranija i torija): $^{222}_{86}\text{Rn}$ (radon), $^{220}_{86}\text{Rn}$ (toron) i $^{219}_{86}\text{Rn}$ (aktinon). Radon je plemeniti plin koji se nalazi u tlu, kroz tlo izlazi u atmosferu te se miješa sa zrakom. Tu smjesu radona i zraka putem dišnog sustava čovjek unosi u svoj organizam. Glavna bolest koja je karakterizirana kao posljedica inhalacije velikih koncentracija radona je nastanak karcinoma pluća.

Kako se radon pojavljuje u plinovitom stanju, može ući u kućanstva. Ta pojava može biti izuzetno opasna. Koncentracija radona u kućanstvu ovisi o tome na kakvoj vrsti tla su sagrađeni stambeni objekti. Izvor zračenja također mogu predstavljati i građevinski materijali od kojih je sam stambeni objekt izgrađen. Također, radon je topiv u vodi te na taj način konzumiran, predstavlja opasnost pri nastanku bolesti gastrointestinalnog sustava.

U ovom diplomskom radu provedeno je istraživanje koncentracije radona u stambenom objektu u Donjem Miholjcu. Istraživanje je provedeno na dva načina: Termoluminiscentnim dozimetrima (TLD) i SSNTD (Solid State Nuclear Track-etched Detector) detektorima. U Hrvatskoj su karakteristične tri klimatološke zone, a i tlo unutar svake od njih je vrlo heterogeno. Što je tlo manje permeabilnosti, radon teže prolazi kroz slojeve tla u stambene objekte. Nasuprot tome, što je tlo rahlije i manje veće permeabilnosti, radon lakše prolazi kroz tlo te se nakuplja u većim količinama u takvim stambenim objektima. Također je bitno za napomenuti na kojoj se etaži vrši mjerenje iz razloga što etaže koje su bliže tlu, imaju veću koncentraciju radona. Istraživanje je također zanimljivo iz razloga što i različite klimatološke zone sa sobom nose i različite oscilacije temperature tijekom godine. To je zanimljiva činjenica iz razloga što u područjima u kojima su većinu godine zastupljene niže temperature, stanovnici stambenih objekata imaju naviku rjeđeg provjetravanja prostora u kojem borave te je koncentracija radona u takvim prostorima veća nego u područjima gdje je većinu godine zastupljena viša temperatura. U ovom

radu iznijet ću rezultate mjerenja koja su provedena u četiri etaže (podrum, prizemlje, prvi kat, drugi kat) u stambenoj zgradi u Donjem Miholjcu. Pomoću TL dozimetara mjerena je ukupna doza zračenja na sve četiri etaže stambene zgrade. Termoluminiscentni dozimetri (TLD) koji su korišteni pri mjerenju možemo izmjeriti ukupnu energiju fotona i elektrona. Određivanjem osobnog doznog ekvivalenta Hp(10) mogli smo vidjeti ukupnu količinu zračenja kroz određeni vremenski period izlaganja detektora.

2. RADIOAKTIVNOST

Radioaktivnost je prirodna pojava pri kojoj dolazi do raspada nestabilne jezgre nekog radionuklida. Prilikom raspada nestabilne jezgre dolazi do ionizirajućeg zračenja što ima za posljedicu promjenu strukture atomske jezgre.

Wilhelm Conrad Röntgen 1895. godine sasvim slučajno tijekom pokusa otkriva novu vrstu zraka kojima je dao naziv rendgenske zrake. O tom otkriću pisao je u svom radu „O jednoj vrsti zraka“ u kojemu je opisao razliku između katodnih zraka i zraka koje je otkrio izvodeći pokus, rendgenskih zraka. Röntgen je otkrio da se rendgenske zrake šire pravocrtno, prolaze kroz materiju te se ne otklanjaju u magnetskom polju.

Nakon Röntgena, francuski fizičar Antoine Henri Becquerel 1896. godine pretpostavlja kako su rendgenske zrake i sjaj minerala koji je izložen jakom svjetlu povezani. Tu pretpostavku pokušao je dokazati eksperimentom pomoću dvosoli kalijeva i uranova sulfata koju je postavio na fotografsku ploču te ju izložio sunčevoj svjetlosti. Prilikom razvoja fotografske ploče uočio je jasan otisak soli te je smatrao da je svoju pretpostavku dokazao. Rezultate svog eksperimenta htio je predstaviti Pariškoj akademiji istovremeno provodeći svoj eksperiment. Na žalost, vrijeme narednih dana je bilo oblačno te je sol omotao tkaninom te ju zajedno sa fotografskom pločom spremio u ladicu dok ne dođe sunčano vrijeme. Nakon nekoliko dana kada je izvadio sol i fotografsku ploču iz ladice, primijetio je kako je fotografska ploča pocrnjela unatoč tome što sol nije bila izložena nikakvom sunčevom zračenju. Tada je došao do zaključka kako sol emitira zrake koje imaju posebne karakteristike. Te zrake je isprva nazvao „uranijeve zrake“, a naknadno su postale poznate kao „Becquerelove zrake“. Becquerel je također zapazio da te zrake djeluju na kožu čovjeka, te je na osnovi svog pokusa otkrio novu metodu za istraživanje radioaktivnosti.[5]

Nakon Becquerela, krajem 1897. godine, bračni par Marie Sklodowska Curie i Pierre Curie počeli su se baviti istraživanjem radioaktivnosti. Početkom 1898. godine, Marie objavljuje svoj prvi rad o radioaktivnosti u kojem je navela da torij i njegovi spojevi imaju ista svojstva kao i uranij. Primijetila je da torij i njegovi spojevi također emitiraju „Becquerelove zrake“ te je to svojstvo nazvala radioaktivnim. Taj naziv je uskoro prihvaćen te je naziv „Becquerelove zrake“ zamijenio naziv radioaktivnost. Daljnjim istraživanjem uranijeva smolinca, Marie je otkrila neotkrivene elemente koji su pokazivali svojstva velike radioaktivnosti. Daljnjim istraživanjem, bračni par Curie, otkrio je nova dva elementa. Jedan element su nazvali polonij prema domovini Marie Curie – Poljskoj, a drugi su nazvali radij prema latinskoj riječi „radius“ što znači zraka. 1903. godine Becquerel i bračni par Curie dobivaju Nobelovu nagradu iz područja fizike za ova

velika i značajna otkrića za radioaktivnost. Marie Curie je bila prva žena profesor na Sorbonskom sveučilištu.[5]

Znanstvenik koji je zaslužan za razvoj fizike iz područja radioaktivnosti, Ernest Rutherford, na temelju pokusa, zaključio je da postoji više vrsta zraka: alfa i beta zrake. Te zrake se međusobno razlikuju od rendgenskih zraka. Nakon alfa i beta zraka, Paul Villard je otkrio da postoje i gama zrake. Gama zrake su prodornije od alfa i beta zraka. [5]

Mlađa kći Marie Sklodowske Curie, Irène Joliot-Curie i F. Joliot 1934. godine otkrili da se radioaktivni elementi mogu umjetno sintetizirati na način da se element izloži zračenju alfa čestica. Tim postupkom dolazi do promjene početnog elementa u novi element ili novi izotop. Ta pojava dobila je naziv „umjetna radioaktivnost“ te su za nju dobili i Nobelovu nagradu za kemiju.

2.1. VRSTE RADIOAKTIVNOG RASPADA

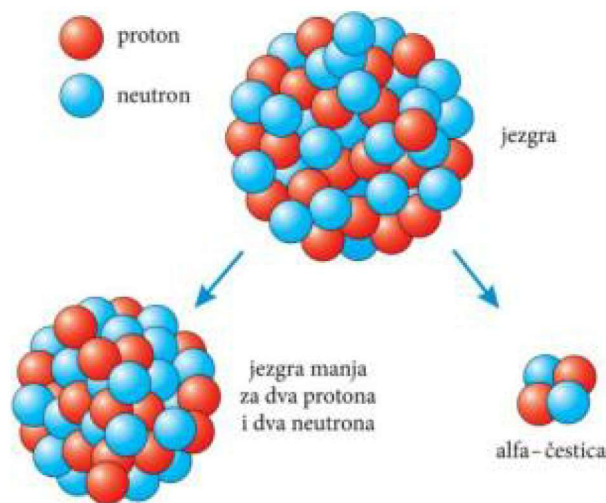
Postoje tri vrste radioaktivnog raspada, a to su alfa (α), beta (β) i gama (γ) raspad. Bitna značajka kod α i β raspada je ta da nestabilna jezgra emitira α ili β česticu kako bi došla u stabilno ili stabilnije stanje. Za razliku od α i β raspada, kod γ raspada, jezgra emitira energiju pri prijelazu iz pobuđenog u stabilno stanje, te ne dolazi do pretvorbe kemijskog elementa.

2.1.1. α RASPAD

α raspad (Slika 1.) je proces pri kojemu dolazi do spontanog raspada nestabilnih jezgara pri čemu se emitira alfa čestica. α čestica je jezgra helija koja sadrži dva protona i dva neutrona ${}^4_2\text{He}$ te oni odnose veliki dio jezgre. Nakon raspada nestabilne jezgre, alfa čestice emitiranjem odnose veliki dio prvotne energije jezgre. Posljedica α raspada je nova jezgra, čiji je atomski broj umanjen za dva, a nukleonski broj za četiri u odnosu na prvotnu jezgru „roditelj“.

Proces α raspada možemo zapisati na sljedeći način:





Slika 1. Prikaz α raspada. [15]

Kao primjer α raspada možemo navesti:



gdje ${}^{226}_{88}\text{Ra}$ predstavlja radij, ${}^{222}_{86}\text{Rn}$ predstavlja radioaktivni plin radon koji nam je bitan za ovaj diplomski rad, te ${}^4_2\text{He}$ predstavlja jezgru helija, odnosno α česticu.

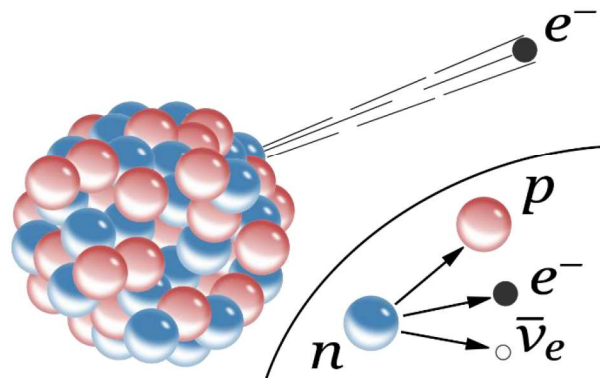
Alfa zračenje ima definiran energijski linijski spektar. Iako alfa čestica ima točno definiran interval kinetičke energije koju nosi sa sobom (između 4-10 MeV). zbog svoje velike mase i dva protona, ima vrlo jako međudjelovanje sa tvari kroz koju prolazi te joj domet iznosi svega nekoliko centimetara. Iz razloga što α zračenje ima kratak doseg djelovanja, ono primljeno izvana nije opasno za ljude (koža ga zaustavlja). Opasno je ukoliko uđe u organizam osobe (ingestijom, udisanjem), te tada dolazi do razarajućeg djelovanja na organizam čovjeka zbog velikih energija koje sa sobom nose α čestice.

2.1.2. β RASPAD

Kada govorimo o β raspadu, obuhvaćamo sve tri vrste β raspada:

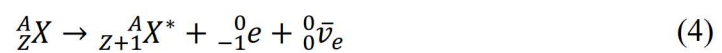
- β^- raspad
- β^+ raspad
- elektronski uhvat.

β^- raspad (Slika 2.) se događa kod jezgara koje imaju višak neutrona. Tijekom procesa β^- raspada dolazi do pretvorbe neutrona iz nestabilne jezgre u proton koji ostaje u jezgri, te iz jezgre izlijeću dvije čestice: elektron (β^- čestica) i antineutrino. Pri tom procesu dolazi do povećanja protonskog broja za jedan, dok nukleonski broj ostaje nepromijenjen. Dolazi do transformacije atomske jezgre.



Slika 2. Prikaz β^- raspada. [1]

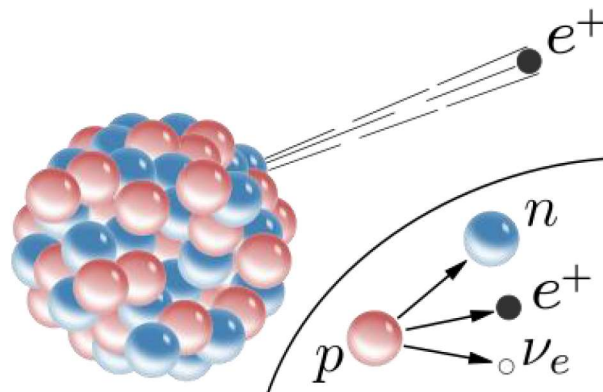
Proces β^- možemo općenito zapisati na sljedeći način:



odnosno kao:



β^+ raspad (Slika 3.) karakterističan je kod jezgara koje imaju manjak neutrona. Kada dolazi do raspada takvih jezgara, proton se raspada na neutron, pozitron (β^+ česticu, odnosno antičesticu elektrona) i neutrino. Kao rezultat β^+ raspada nastaje nova atomska jezgra kojoj se protonski broj smanjuje za jedan dok nukleonski broj ostaje nepromijenjen.



Slika 3. Prikaz β^+ raspada.

Proces odvijanja β^+ raspada možemo zapisati na sljedeći način:

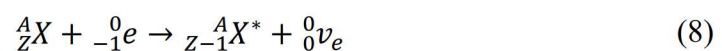


odnosno:



Uхват elektrona predstavlja proces u kojemu dolazi do raspada elektrona iz omotača (K – ljuska najbliža jezgri) kojeg povuče proton iz jezgre. Pri tom procesu, proton prelazi u neutron uz emitiranje neutrina.

Taj proces općenito možemo zapisati:

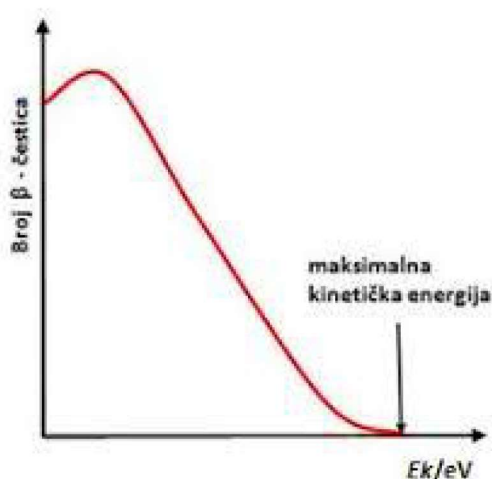


odnosno:



Također je bitno je naglasiti da su produkti raspada, neutrino i antineutrino, čestice koje imaju zanemarivo malu masu, te nemaju električni naboj. Interakcija s tvari kroz koju prolaze je iznimno mala.

Prilikom β raspada, β čestice mogu poprimiti bilo koju energiju u rasponu od 0 eV do neke određene maksimalne vrijednosti (Slika 4.).



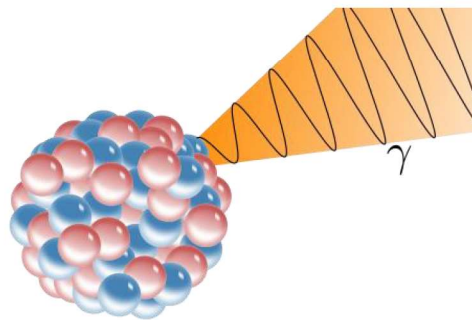
Slika 4. Kontinuirani spektar β zračenja. [4]

Doseg β čestice veći je od dosega α čestice, ali u zraku, on najviše ovisi o energiji samih β čestica. Na primjer, za energiju od 0,5 MeV β čestica ima doseg od približno 0,7 m, dok za β česticu koja ima energiju 3 MeV doseg iznosi 10-ak metara. β čestice su prodornije od α čestica, te ih zaustavlja debljina tanje aluminijske ploče od nekoliko mm. Također, bitno je napomenuti da su β čestice manje razorne od α čestica zbog manje energije koju nose sa sobom.

2.1.3. γ RASPAD

Prilikom γ elektromagnetskog zračenja ne dolazi do promjene protonskog ili nukleonskog broja kao pri α i β raspadu. Gama zračenje predstavlja elektromagnetsko zračenje kod kojeg ne dolazi do promjene same jezgre. Tijekom γ raspada, jezgra prelazi iz stanja više energije, tzv. pobuđenog stanja u stabilno stanje prilikom čega dolazi do emitiranja energije. Iznos te emitirane energije jednak je razlici između početnog i konačnog stanja u kojemu se jezgra nalazi.

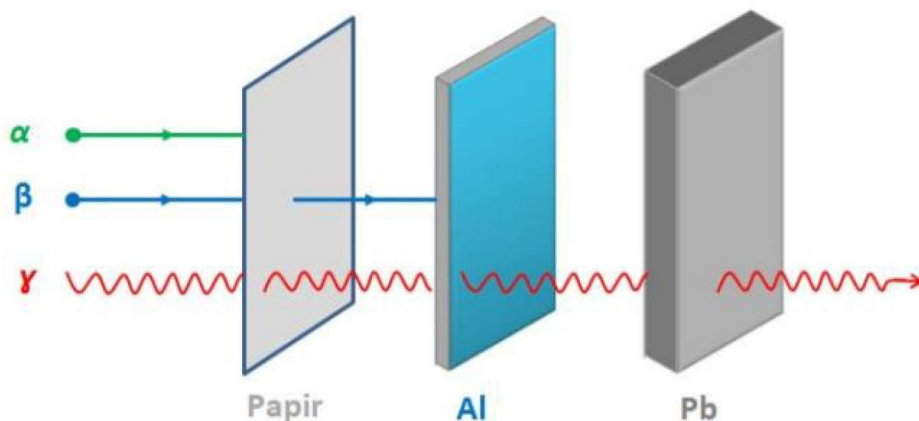
Tijek γ raspada možemo napisati na sljedeći način:



Slika 5. Prikaz γ zračenja. [8]

Vrijeme poluraspada γ zračenja je vrlo kratko, tako da možemo reći da se emisija γ zračenja odvija gotovo trenutačno po raspadu. Naravno, postoje iznimke gdje pri raspadu jedan dio radioaktivnih potomaka ostaje u metastabilnom stanju. U takvim stanjima γ raspadi imaju duže vrijeme poluraspada koje može od trajati nekoliko sati, do nekoliko dana.

γ zračenje sa sobom nosi jako velike energije koje iznose i milijun puta više od fotona vidljivog dijela spektra. Iz tog razloga oni su izuzetno prodorni. γ zračenje je prodornije od α i β zračenja (Slika 6.) te se pri prijelazu γ zračenja kroz neku materiju, fotoni predaju energiju materiji te na nju djeluju razorno. γ zračenje ima puno veći domet od α i β zračenja, a za njegovu apsorpciju se koriste materijali velikog atomskog broja i velike gustoće (npr. olovo).



Slika 6. Prolazak α , β i γ zračenja kroz različite materijale. [4]

2.2. ZAKON RADIOAKTIVNOG RASPADA

Nestabilne jezgre raspadaju se spontano emisijom α ili β zračenja koje je uobičajeno popraćeno γ zračenjem. Sam proces radioaktivnog raspada je statističke prirode što znači da se ne može sa sigurnošću predvidjeti kada će se određena jezgra raspasti. Na proces raspadanja radioaktivne jezgre ne može se nikako utjecati. Ono što možemo odrediti je nakon koliko će se vremena određen broj radioaktivnih jezgara raspasti. Uvedimo oznaku N_0 koja predstavlja početni broj radioaktivnih jezgara određenog uzorka u nekom početnom trenutku t_0 . Oznakom $N(t)$ označit ćemo broj neraspadnutih radioaktivnih jezgara nakon određenog intervala vremena Δt , dok nam ΔN predstavlja broj raspadnutih jezgri nakon nekog vremena t . Brzina raspada radioaktivnih jezgri proporcionalna je broju neraspadnutih jezgri $N(t)$, a konstanta proporcionalnosti je λ . λ je konstanta raspada koja je karakteristična za svaki radionuklid. Brzinu raspada možemo zapisati na sljedeći način:

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

gdje predznak minus označava da se prilikom radioaktivnog raspada broj jezgri smanjuje.

Ako prethodni izraz zapišemo kao:

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

te ga potom integriramo:

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

dobivamo sljedeći izraz:

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

gdje nam C predstavlja konstantu integracije. Ukoliko uvrstimo početne uvjete u dobivenu jednadžbu $t = 0$ i $N = N_0$ možemo izračunati konstantu C :

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

iz čega dobivamo konstantu C :

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

Ukoliko izjednačimo izraze (14) i (16) dobivamo:

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

Sređivanjem prethodnog izraza dobivamo:

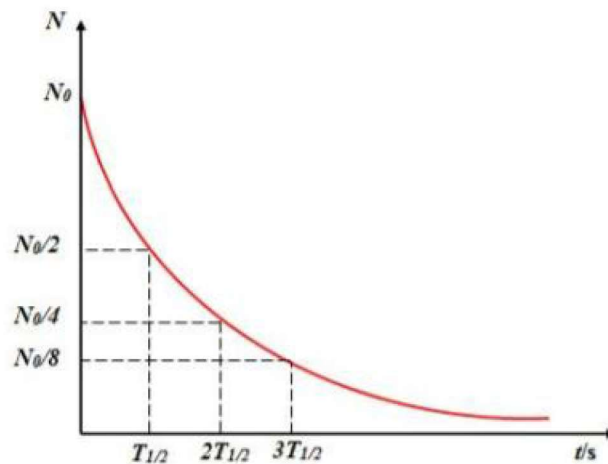
$$\ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t \quad (18)$$

odnosno:

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

gdje N_0 predstavlja početni broj jezgri u trenutku $t = 0$.

Zakon radioaktivnog raspada prikazan u eksponencijalnom obliku možemo prikazati i grafički:



Slika 7. Graf funkcije radioaktivnog raspada. [4]

Uz zakon poluraspada potrebno je i definirati vrijeme poluraspada jezgri. Vrijeme poluraspada $T_{1/2}$ je vrijeme potrebno da se raspadne polovina jezgri radioaktivnog uzorka (tvari).

Iz izraza:

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

i izraza:

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

dobivamo vezu između vremena poluraspada i konstante raspada. Taj izraz možemo zapisati na sljedeći način:

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}} \quad (22)$$

Sređivanjem dobivenog izraza dobivamo izraz za vrijeme poluraspada:

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda} \quad (23)$$

Nakon što smo definirali vrijeme poluraspada, potrebno je definirati aktivnost radioaktivnog izvora. Aktivnost radioaktivnog izvora (A) predstavlja broj raspada koji se u radioaktivnom izvoru dogodi u jedinici vremena. Za aktivnost radioaktivnog izvora možemo reći da je to brzina raspada, a zapisujemo ju na sljedeći način:

$$A(t) = \lambda N(t) = A_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad (24)$$

gdje A_0 predstavlja početnu aktivnost u vremenskom intervalu $t = 0$, odnosno A_0 definiramo na sljedeći način:

$$A_0 = \lambda N_0 \quad (25)$$

Međunarodna mjerna jedinica SI sustava za aktivnost radioaktivnog izvora je *bekerele* (Bq). 1 Bq označava jedan raspad u sekundi. Osim mjerne jedinice Bq, koristi se još i mjerna jedinica *kiri* (Ci) koja je u početku bila definirana kao aktivnost jednog grama radija. Danas se definira preko Bq na sljedeći način:

$$1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq} \quad (26)$$

3. DOZIMETRIJA

Dozimetrija je grana fizike pomoću koje promatramo utjecaj radioaktivnog zračenja i živih organizama. Samom interakcijom zračenja i organizama, dolazi do apsorpcije energije zračenja u organizmu. Prilikom apsorpcije zračenja, kod organizma dolazi do raznih kemijskih i bioloških promjena. Da bi mogli proučavati utjecaj zračenja na žive organizme, moramo definirati nekoliko fizikalnih veličina koje objašnjavaju i uključuju vrste zračenja kojima je organizam izložen.

3.1. DOZIMETRIJSKE VELIČINE I NJIHOVE MJERNE JEDINICE

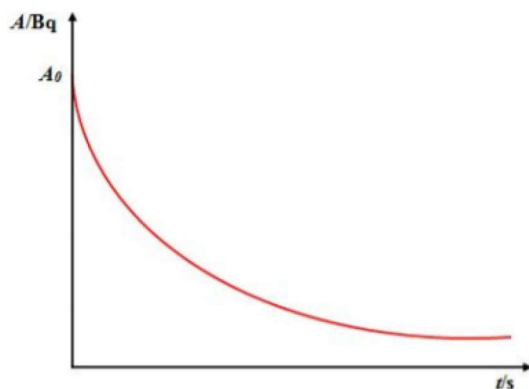
Prije svega, bitno je napomenuti da u tkivu dolazi do primjene samo onda kada tkivo apsorbira određeni dio energije.

Apsorbirana doza (oznaka **D**) ionizirajućeg zračenja je fizikalna veličina koja se definira kao omjer između srednje energije $d\bar{\epsilon}$ koja je predana ionizirajućim zračenjem u nekom elementu tvari volumena V i mase dm tog volumena. Matematički izraz za apsorbiranu dozu, možemo zapisati na sljedeći način:

$$D = \frac{d\bar{\epsilon}}{dm} \quad (27)$$

Apsorbirana doza pokazuje količinu energije apsorbirane po jedinici neke tvari. Mjerna jedinica apsorbirane doze ionizirajućeg zračenja u SI sustavu je *gray* (Gy). 1 Gy definiramo kao apsorbiranu dozu tijela mase 1 kg kojemu je ionizirajuće zračenje predalo energiju od 1 J. Starija mjerna jedinica za apsorbiranu dozu je *rad* (radiation absorbed dose) koja ima vrijednost:

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



Slika 8. Smanjenje aktivnosti izvora s vremenom. [4]

Prije nego definiramo sljedeću dozimetrijsku veličinu, potrebno je definirati **relativnu biološku učinkovitost** (RBE). Nju koristimo kada trebamo odrediti utjecaj pojedine vrste zračenja na ljudsko tkivo. Određuje se kao omjer doze neke vrste zračenja i doze rendgenskog zračenja koje uzrokuje jednake biološke učinke.

Nadalje, potrebno je definirati i **radijacijski težinski faktor**. Pomoću njega opisujemo učinak određenog tipa zračenja koje upada na tkivo. Taj faktor se zasniva na procjeni relativne biološke učinkovitosti i računa se iz energije koju određena vrsta zračenja prenese po jedinici dužine. Označavamo ga s w_R .

Ekvivalentna doza zračenja (ili **Težinska doza zračenja**) predstavlja sumu svih srednjih apsorbiranih doza zračenja koje potiču od zračenja R u nekom organu ili tkivu T pomnoženih s težinskim faktorima zračenja w_R . Oznaka ekvivalentne doze zračenja je H_T . Izraz za ekvivalentnu dozu zračenja možemo napisati na sljedeći način:

$$H_T = \sum_R w_R \cdot D_{T,R} \quad (28)$$

Mjerna jedinica za ekvivalentnu dozu zračenja je *džul po kilogramu* (J/kg), a nazvana je *sievert* (Sv). Stara mjerna jedinica od Sv je *rem* (roentgen equivalent man) ako je apsorbirana doza zračenja D izražena u radima.

Tablica 1. Težinski faktori zračenja ICRP 2007. [9]

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

Bitno je napomenuti da težinska doza zračenja ne uzima u obzir na koje tkivo utječe zračenje. Različita tkiva imaju različit sastav, građu i gustoću, te različito reagiraju na zračenje. Zbog toga je uveden težinski faktor zračenja. On ovisi o osjetljivosti određenog tkiva na zračenje. Težinski faktor označavamo oznakom w_T . Nakon što smo definirali težinski faktor, možemo definirati novu dozimetrijsku veličinu – efektivnu dozu.

Efektivna doza (oznaka **E**) predstavlja sumu svih težinskih doza zračenja H_T u svim tkivima T pomnožena s težinskim faktorima tkiva w_T .

Možemo ju zapisati na sljedeći način:

$$E = \sum_T w_T \cdot H_T = \sum_T w_T \sum_R w_R \cdot D_{T,R} \quad (29)$$

Mjerna jedinica SI sustava za efektivnu dozu je *sievert* (Sv). U Tablici 2. prikazane su vrijednosti težinskog faktora ozračivanja za određena tkiva.

Tablica 2. Težinski faktor ozračivanja za tkiva prema ICRP 1977., 1991., i 2006. godine.[10]

Dio tijela	Težinski faktori tkiva w_T		
	ICRP, 1977.	ICRP 1991.	ICRP 2007.
Gonade	0,25	0,20	0,08
Koštana srž	0,12	0,12	0,12
Debelo crijevo	/	0,12	0,12
Pluća	0,12	0,12	0,12
Želudac	/	0,12	0,12
Mjehur	/	0,05	0,05
Dojke	0,15	0,05	0,08
Jetra	/	0,05	0,05
Ždrijelo	/	0,05	0,05
Štitnjača	0,03	0,05	0,05
Koža	/	0,01	0,01
Površina kosti	0,03	0,01	0,01
Ostalo	0,30	0,05	0,12
Cijelo tijelo Σ	1,00	1,00	1,00

Čovjek je tijekom svoj cijelog životnog vijeka izložen prirodnoj radioaktivnosti. U prosjeku, efektivna doza po stanovniku Zemlje iznosi 2,4 mSv godišnje. Ono što je bitno naglasiti, da ako gledamo raspon individualnih doza, on je poprilično velik. Za većinu populacije (oko 65%) raspon vrijednosti iznosi između 1 i 3 mSv godišnje, dok za ostalih 25% populacije primljena doza iznosi 4 mSv. Samo oko 10% populacije primi dozu preko 3 mSv godišnje [31].

3.2. UTJECAJ IONIZIRAJUĆEG ZRAČENJA NA STANICU

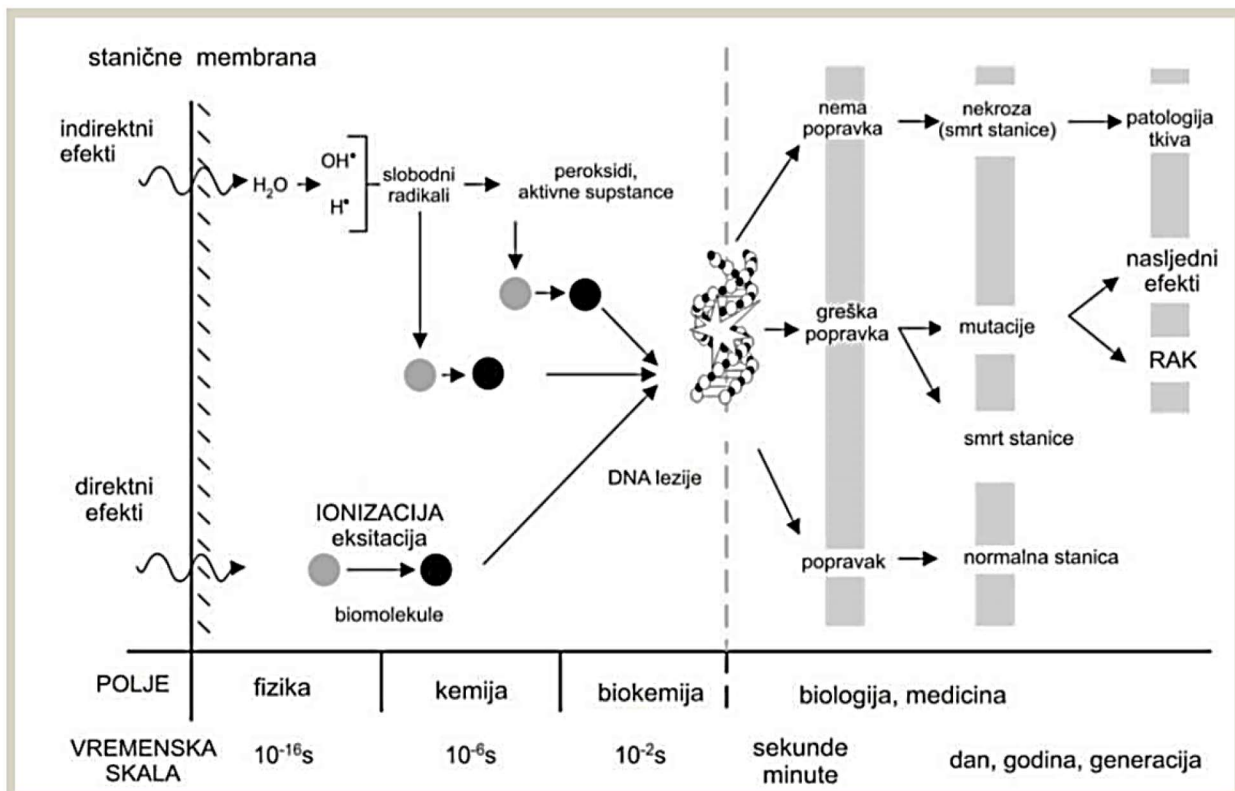
Glavna meta ionizirajućeg zračenja u živim organizmima i mjesto početka bioloških efekata i posljedica je DNA (Deoxyribonucleic acid). Postoji mnoštvo sličnosti među različitim organizmima s obzirom na reakcije na ionizirajuće zračenja, a mnogo različitosti u njihovim osjetljivostima na zračenje. Oštećenje organizma uslijed zračenja nastaje ionizacijom. Ionizacija se javlja kada zračenje ima dovoljno energije da izbaci jedan ili više orbitalnih elektrona iz atoma materije s kojom međudjeluje. Ionizirajuće zračenje je karakterizirano velikim oslobađanjem energije (prosječno 33 eV po događaju). Ta energija je i više nego dovoljna za razaranje kemijskih veza (npr. 4,9 eV dovoljno je za razaranje C=C veze). Ionizacijski procesi s rezultirajućim nabijenim česticama mogu značajno naštetiti biološkim stanicama. Takva se šteta naziva direktnim efektima. Mnogo biološke štete uslijed zračenja nastaje indirektnim efektima putem slobodnih radikala. Slobodni radikali su fragmenti atoma koji nastaju nakon ionizacije tih atoma. Slobodni radikali imaju nesparene orbitalne elektrone, što rezultira velikom kemijskom nestabilnošću. Slobodni radikali s lakoćom mogu uništiti kemijske veze i glavni su uzročnici oštećenja uslijed zračenja. Slobodni radikali reagiraju sa staničnim molekulama u vrlo kratkom vremenu nakon njihova nastanka, zbog čega imaju kratak životni vijek. Slobodni radikal OH^+ nastaje ionizacijom vode i najčešći je slobodni radikal zbog velike količine vode u biološkim tkivima (gotovo 80% žive stanice čini voda). Slobodni radikali ne nastaju samo kao rezultat zračenja, nego i različitih stresora: pušenjem, uslijed zagađenosti zraka, izlaganjem UV zračenju, upalnim procesima u tkivu i metaboličkim procesima. Šteta nastala uslijed slobodnih radikala tako je česta da je morao nastati vrlo efikasan mehanizam za popravak kod svih bioloških vrsta. [26]

Zračenje i nastali slobodni radikali mogu uzrokovati oštećenje DNA različitim vrstama lezija (npr. jednostruko pucanje lanca DNA – single strand breaks, dvostruko pucanje DNA – double strand breaks, dvostruko pucanje DNA – double strands breaks, promjene baze i sl.). Najteža oštećenja su dvostruka pucanja lanca DNA koja ima glavni utjecaj na preživljavanje ozračene stanice. Postoje učinkoviti mehanizmi popravka oštećenja za sve vrste lezija, međutim kod težih oštećenja (dvostrukog pucanja lanca DNA) prilikom popravka javljaju se greške popravka. [26]

Greške popravka mogu rezultirati smrću stanice, kromosomskim aberacijama ili mutacijama. Sudbina mutacije i njihov utjecaj unutar populacije ovisi o vrsti stanica unutar kojih se mutacija dogodila. Dvije osnovne vrste stanica su primarne i somatske. Primarne stanice uključuju osnovne stanice iz kojih se razvijaju spermij i jajna stanica. Sve druge stanice razvijaju se iz somatskih (kosti, mišići, krv i sl.). Mutacije u somatskim stanicama mogu dovesti do smrti

stanice, ili ako je oštećenje DNA u tim stanicama bilo popravljeno s greškom ali na način da je stanica još živa, mutacije u somatskim stanicama mogu dovesti do raka. Mutacije u reproduktivnim primarnim stanicama smanjuju broj gameta što povećava fetalni mortalitet ili njihove promjene mogu biti nasljedne za potomke. Za ljude, rizik od nasljednih efekata kod potomaka je oko 10% rizika od raka izloženih roditelja. Rizik od raka (ne nužno s fatalnim ishodom) za ljude procjenjuje se na $1 \cdot 10^{-5}$ po mSv. Za ne ljudsku biotu rizik od nasljednih efekata je nepoznat. Većina mutacija je štetna, ne daje nikakve prednosti jedinkama koje ih imaju, i s vremenom nestaje iz populacije. Ipak, neke mutacije su neutralne, nemaju nekih očitih utjecaja na jedinke koje ih imaju, i mogu trajati generacijama unutar populacije. Rijetko, mutacije mogu pružiti selektivne prednosti (npr. povećanje apsorpcije vode u korijenu biljaka). Štetni efekti ionizirajućeg zračenja za biološke sustave već su dugo poznati, kao i činjenica da su ovisni o dozi. Stoga je tijekom niza godina uložen značajan napor u definiranju efektivne doze za biološke sustave. Situacija je kompleksna jer efektivna doza ovisi ne samo o količini deponirane energije nego i o težinskom koeficijentu zračenja w_R (biološka učinkovitost pojedine vrste zračenja), kao i težinskom koeficijentu tkiva w_T (radio osjetljivosti tkiva). U SI sustavu mjernih jedinica, efektivna doza za ljude izražava se u Sievertima (Sv), a koja je zapravo apsorbirana doza Grey (Gy) uravnotežena s dva težinska koeficijenta w_R i w_T . Težinski faktori razvijeni samo za ljudsku radiobiologiju – težinski faktori za ne ljudsku biotu ne postoje. Stoga je dozu za ne ljudsku biotu pravilnije izražavati u Gy, a ne u Sv. [26]

Na Slici 9. prikazan je utjecaj ionizirajućeg zračenja na živu stanicu, nastajanje oštećenja, popravak oštećenja kod zdravih stanica, a u suprotnom teže posljedice za živi organizam kao što su mutacije i smrt.



Slika 9. Shematski prikaz utjecaja ionizirajućeg zračenja na živu stanicu, mehanizam prijenosa tog stresa na DNA; nastajanje oštećenja, popravak oštećenja (zdrava stanica) ili u suprotnom teže posljedice za živi organizam (mutacije, smrt). [26]

4. RADON

Radon je kemijski element koji je 1900. godine otkrio njemački fizičar Friedrich Ernest Dorn. Radon je peti otkriveni radionuklid. Otkriven je nakon uranija, polonija, radija i torija. Ime je dobio po radiju jer α raspadom radija nastaje radon. Prvi naziv mu je bio *niton* po latinskoj riječi *nitens* što znači sjajan.

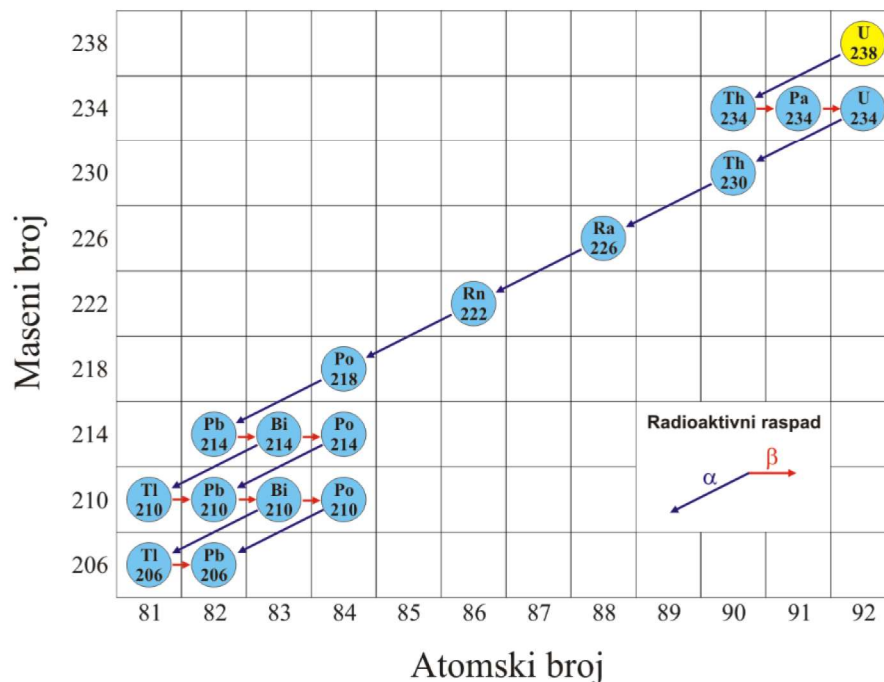
4.1. FIZIKALNE I KEMIJSKE KARAKTERISTIKE RADONA

Radon je kemijski element periodnog sustava s rednim brojem 86. Plemenit je plin te teško stupa u kemijske reakcije. Radon je radioaktivan plin, jako radiotoksičan te kancerogen ukoliko se udiše ili se unese u tijelo ingestijom. Pri normalnim uvjetima radon je plin bez boje, okusa i mirisa, gušći je od zraka (otprilike osam puta) pri sobnoj temperaturi. Radon je najteži poznati plemeniti plin. Talište radona je pri -62°C , a vrelište na -71°C . Zbog stabilne elektronske

konfiguracije vrlo je inerta, no pri određenim uvjetima može doći do kemijskih reakcija s fluorom. Poznato je oko dvadesetak izotopa radona, od kojih su tri prirodno radioaktivna. Oni nastaju u tlu radioaktivnim raspadom radija, odnosno nalaze se u radioaktivnim nizovima urana i torija, a to su $^{222}_{86}\text{Rn}$ (radon), $^{220}_{86}\text{Rn}$ (toron) i $^{219}_{86}\text{Rn}$ (aktinon). Ostali spomenuti izotopi ne nastaju u procesima koji se trenutno odvijaju u tlu.

Zbog svojeg najduljeg vremena poluraspada, najznačajniji izotop nam je $^{222}_{86}\text{Rn}$ koji je produkt α raspada izotopa $^{226}_{88}\text{Ra}$ i pripada uranijevom raspadnom nizu. Kada govorimo o radonu, uvijek mislimo na izotop $^{222}_{86}\text{Rn}$. Vrijeme poluraspada radona iznosi $T_{1/2} = 3,035$ dana, dok mu prosječno vrijeme života $\tau = 5,51$ dan.

$^{222}_{86}\text{Rn}$ ima četiri kratkoživuća potomka: $^{218}_{84}\text{Po}$, $^{214}_{82}\text{Pb}$, $^{214}_{83}\text{Bi}$, $^{214}_{84}\text{Po}$ od kojih se olovo i bizmut raspadaju β raspadom, dok se polonij i torij raspadaju α raspadom.



Slika 10. Prikaz uranijevog $^{238}_{92}\text{U}$ raspadnog niza. [32]

Sljedeći bitan izotop radona je $^{220}_{86}\text{Rn}$ (toron) kojemu vrijeme poluraspada iznosi $T_{1/2} = 55,6$ s, a prosječno vrijeme života $\tau = 80,2$ s. Ime toron dolazi od raspadnog niza u kojemu se izotop nalazi: raspadni niz torija. Kao i radon, toron ima četiri kratkoživuća potomka, a to su: $^{216}_{84}\text{Po}$, $^{212}_{82}\text{Pb}$, $^{212}_{83}\text{Bi}$ i $^{212}_{84}\text{Po}$. Kako toron ima kratko vrijeme poluraspada, on prevaljuje puno kraće udaljenosti nego što prevaljuje radon. Samim time, utjecaj torona nije toliko zanimljiv.

Treći, i nama posljednji zanimljiv izotop radona je $^{219}_{86}\text{Rn}$ aktinon. On je također dobio ime po raspadnom nizu u kojem se nalazi: aktinijevom raspadnom nizu. Aktinon ima najkraće vrijeme poluraspada od sva tri navedena izotopa, a ono iznosi $T_{1/2} = 3,9$ s. Zbog izuzetno kratkog vremena poluraspada, aktinon uglavnom nije predmet istraživanja.

U Tablici 3. navedena su vremena poluraspada izotopa radona i njihovih potomaka, ali i energije raspada za svaku vrstu zračenja.

Tablica 3. Vremena poluraspada izotopa radona, pripadajućih potomaka, te energije raspada za pojedinu vrstu zračenja.[25]

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

$^{215}_{84}Po$	1,78 ms	7,3136		
$^{211}_{82}Pb$	36,1 min		1,38	0,4049; 0,4270; 0,8319
$^{211}_{83}Bi$	2,14 min	6,279; 6,623		
$^{207}_{81}Tl$	4,77 min		1,43	0,8972

4.2. RADON U TLU I ZRAKU

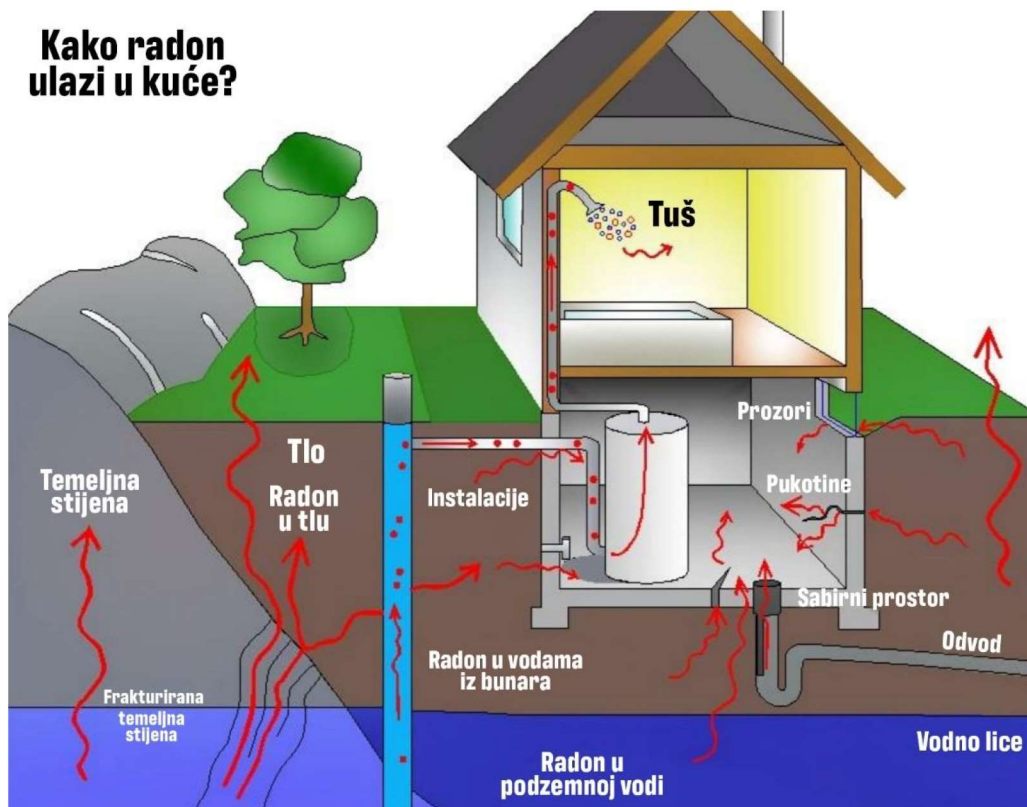
Radon nastaje radioaktivnim raspadom radija koji je potomak uranija. Samim time, koncentracija radona u tlu ovisi o koncentraciji uranija u tlu, stijenama i nalazimo ga posvuda u zemljinoj kori. Ono što je bitno za ovaj diplomski rad je koncentracija radona u kućanstvima. U kućanstvima se, u većini slučajeva radon akumulira iz zemlje, na kojoj je izgrađen stambeni objekt.

Glavni izvori radona u kućama su (tablica 4.):

Tablica 4. Glavni izvori radona u kućama. [20]

Izvor radona	Koncentracija
Tlo neposredno ispod kuće	85 – 90 %
Građevinski materijal	5 – 10 %
Podzemne vode	oko 5 %
Zemni plin	< 1%

Izvori radona u kućama prikazani su na Slici 11.:



Slika 11. Izvori radona u kući. [12]

Parametri koji imaju utjecaj na koncentraciju radona u kućama dijele se na dva dijela: prirodne i tehnološke. Prirodni parametri obuhvaćaju geološki sastav tla, strukturu tla, klimatske i meteorološke parametre, dok tehnološki parametri uzimaju u obzir načine gradnje stambenog objekta te životne navike ljudi kao što su način grijanja kućanstva i učestalost provjetravanja prostorija. Svi ti parametri direktno i indirektno utječu na koncentraciju radona u promatranom stambenom objektu. Najveće koncentracije radona potječu iz tla. Ovisno o vrsti i građi tla, koncentracija radona može biti veća ili manja. Tla koja su veće gustoće, manje permeabilnosti, teže propuštaju radon na površinu, te se u stambenim objektima koji su sagrađeni na takvoj vrsti tla nalaze manje koncentracije radona od stambenih objekata koji su sagrađeni na zemlji manje veće permeabilnosti.

4.3. OPASNOST ZA ZDRAVLJE

Kako se radon nakuplja u zatvorenim prostorijama, on predstavlja opasnost za osobe koje borave u njima. Udisanjem zraka, udišemo i radon koji se pritom u plućima raspada. Pri njegovom raspadu dolazi do oslobađanja velike energije koja oštećuje stanice respiratornog sustava, točnije plućnog tkiva. Kako radon ima relativno dugo vrijeme poluraspada, postoji vrlo mala vjerojatnost da se raspadne u plućima. Ukoliko dođe do unosa dovoljno velikih koncentracija radona, tada energija koja se oslobodi prilikom njegovog raspada nije zanemariva.

Potomci koji nastaju raspadom radona imaju puno veći utjecaj na zdravlje čovjeka. Oni se nakon raspada radona vežu za čestice zraka, te nakon toga udisanjem ulaze u pluća gdje dolazi do njihovog taloženja i radioaktivnog raspadanja. Upravo zbog toga, dolazi do povećanja rizika od karcinoma pluća i raznih anomalija dišnog sustava.

Za ovaj diplomski rad, bitno je proučavanje koncentracije radona u stambenom objektu. Kako se radon nakuplja u stambenim objektima, te se udisanjem unosi u organizam čovjeka, bitno je proučiti kolike su koncentracije radona u određenom stambenom objektu. Istraživanja su pokazala povezanost koncentracije radona i njegov utjecaj na rizik od razvoja karcinoma pluća.

Koncentracija radona u zraku koji udišemo na otvorenom je niska (između 5 i 15 Bq m⁻³) i općenito ne predstavlja zdravstveni problem, ali može biti visoka unutar zatvorenog prostora u kojem živimo i/ili radimo (od nekoliko desetaka do nekoliko tisuća Bq m⁻³). Glavni izvori radona u zatvorenim prostorima su: tlo neposredno ispod zgrade (85-90%), građevni materijal (5-10%), podzemne vode (oko 5%). Radon u zatvorene prostore ulazi kroz pukotine na podu ili na spojevima zidova, međuprostore oko cijevi i instalacija, odvoda i sl., pa su i koncentracije radona obično najveće u podrumu i prizemlju. Dugotrajna izloženosti visokim razinama radona povećava rizik nastanka karcinoma pluća što je svojedobno bilo uočeno u epidemiološkim istraživanjima na rudarima iz rudnika uranija. Iz tog razloga, Svjetska zdravstvena organizacija (WHO) je 1998. godine preko svoje Agencije za istraživanje karcinoma stavila radon na listu potencijalnih uzročnika karcinoma nedvojbeno utvrdivši da su radon i njegovi kratkoživi potomci kancerogeni za ljude. Provedeno istraživanje proučavalo je koncentraciju radona u nekim školama i vrtićima Istarske županije. Detektori koji su korišteni za mjerenje koncentracije radona su pasivni detektori nuklearnih tragova LR115 tip II, te su postavljeni u rujnu 2018. godine. Izloženi detektori

su se nalazili u svim prostorijama u kojima borave učenici i zaposlenici. Istraživanje je pokazalo su da postoje dnevne varijacije u koncentracijama radona (rast tijekom noćnih sati te postupno smanjenje tijekom radnog vremena), ali s različitim amplitudama. Takav obrazac radonskih razina karakterističan je za objekte s prirodnom ventilacijom i rezultat je promjenjivog gradijenta tlaka zraka između tla i objekta. Maksimalne vrijednosti koncentracije radona su u dane vikenda kada su škole zatvorene. Koncentracija radona u takvim situacijama bi se mogla smanjiti ranijim početkom provjetravanja škole (2 – 3 sata prije početka radnog vremena) ili instalacijom zatvorenog sustava izmjene zraka čime bi se smanjio/regulirao gradijent zraka između tla ispod objekta i samog objekta i time kontrolirao ulazak radona u objekt. [24]

Istraživanje koje je provela Regionalna agencija za zaštitu okoliša Apulia, u Italiji uzelo je u obzir mjerenje koncentracije radona ovisno o građevinskim i geološkim karakteristikama. Algoritam koji su kreirali temeljen je na iskustvima rudara te je bio u mogućnosti proizvesti procjene slučajeva karcinoma pluća koji se mogu pripisati radonu u različitim općinama. Tako je na primjer, u provinciji Lecce pokazano da postoji veći rizik od karcinoma pluća i to u Campi Salentina i Minervino sa 1,18 radnih mjeseci i 1,38 radnih mjeseci što odgovara učestalosti pojave karcinoma pluća. Mjesta u provinciji Bari koja imaju povećan rizik pojave karcinoma pluća su: Gravina di Puglia i Locorotondo. Glavne odrednice izloženosti radonu jesu i građevine koje su građene 1999. i 2001. godine. To su bile jednosobne zgrade s poroznim zidovima i građene su na tlu koje se sastoji od glinenog pijeska, šljunka i konglomerata, kalkarenita i propusnih litotipa. [6]

Dobro je utvrđeno da velika izloženost radonu povećava rizik od smrtnosti od raka pluća.[2] Učinci niske profesionalne izloženosti i čimbenici koji ometaju i mijenjaju taj rizik nisu jasni i potrebni su za informiranje o trenutnoj radijacijskoj zaštiti rudara. Rizik od smrtnosti od raka pluća pri niskoj izloženosti radonu (<100 radnih mjeseci) procijenjen je u zajedničkoj analizi čeških, francuskih i kanadskih rudara urana, zaposlenih 1953. godine ili kasnije. Statistička analiza temeljila se na linearnom Poissonovom regresijskom modeliranju s grupiranim podacima o preživljavanju zajednice. Dvije analize osjetljivosti korištene su za procjenu potencijalno o zbuđenosti od pušenja duhana. Utvrđena je statistički značajna linearna povezanost između izloženosti radonu i smrtnosti od raka pluća. Višak relativnog rizika po mjesecu radne razine iznosio je 0,022 (95% intervali pouzdanosti: 0,013-0,034), na temelju 408 smrtnih slučajeva od raka pluća i 394 236 osoba u godinama od rizika. Vrijeme od izlaganja bilo je statistički značajan

faktor: rizik se smanjivao s povećanjem vremena od izlaganja. Uočena je tendencija smanjenja rizika s povećanjem postignute dobi, ali to nije bilo statistički značajno. Otkriveno je da stopa izloženosti nije modifikator viška relativnog rizika. Procjenjuje se da je potencijalni zbunjujući učinak pušenja duhana mali i nije bitno promijenio procjene rizika od smrtnosti od raka radona. Ova zajednička analiza daje snažne dokaze za povećan rizik od smrtnosti od raka pluća od niske izloženosti profesionalnom radonu. Rezultati pokazuju da su mjere zaštite od zračenja i dalje važne kod današnjih rudara u rudnicima uranija. [16]

Provedeno je istraživanje o predrasudama i zabludama osječkih studenata o zračenju. Anketni upitnik proveden je u populaciji studenata osječkog Sveučilišta. Pitanja anketnog upitnika podijeljena su na tri područja: pitanja vezana za ionizirajuće zračenje, neionizirajuće zračenje te primjenu zračenja u medicini. Eksperimentalna skupina sadržavala je 172 studenta sa Odjela za fiziku i Medicinskog fakulteta dok je kontrolna skupina sadržavala 163 studenta Ekonomskog fakulteta. Nakon provedene ankete u obje skupine studenata, potvrđena je hipoteza da će studenti eksperimentalne skupine pokazati višu razinu znanja i informiranosti o zračenju nego što će pokazati studenti kontrolne skupine. Također, uočeno je da studenti diplomskog studija Odjela za fiziku imaju veći postotak točno odgovorenih pitanja nego studenti diplomskog studija što je i očekivano s obzirom na izvedbeni program ta dva studija. Nadalje, utvrđeno je da postoji statistički signifikantna razlika u točnim odgovorima između gimnazijalaca i učenika strukovnih škola. [14]

5. EKSPERIMENTALNI POSTUPCI – MJERENJE RADONA U ZRAKU

Radon općenito možemo mjeriti pomoću:

- 1) Detektora nuklearnih tragova – SSNTD
- 2) Poluvodičkih detektora (Si)
- 3) Ionizacijskih komora
- 4) Materijala osjetljivih na α čestice (polimeri i emulzije)
- 5) Alfa scintilacijskih ćelija
- 6) Tekućinskih scintilacijskih ćelija
- 7) Optičke detekcije na udaljenost
- 8) Gama spektroskopije
- 9) Elektrometra
- 10) Termoluminiscencije
- 11) Apsorpcije

Pri provođenju mjerenja koncentracije radona u zraku u okviru ovog diplomskog rada, korištene su dvije metode mjerenja:

- 1) Pasivnim detektorima nuklearnih tragova SSNTD (Solid State Nuclear Track-etched Detector)
- 2) Termoluminiscentnim TL dozimetrima

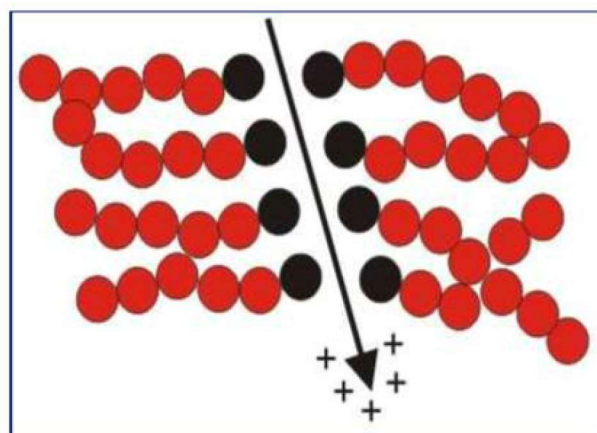
5.1. SSTND (SOLID STATE NUCLEAR TRACK DETECTOR) DETEKTORI

Detektori nuklearnih tragova „SSNTD – Solid State Nuclear Track-etched Detector“ su pasivni detektori, dielektrici, najčešće polimerne plastike. Detektori koji se koriste na Odjelu za Fiziku Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku su LR 115 (nitroceluloza) i CR-39 (allyl diglycol carbonate). Princip rada im je baziran na tome da teške, nabijene čestice (od protona na više) ostavljaju na detektoru latentna oštećenja, promjera desetine nanometra koja se mogu uočiti elektronskim mikroskopom. Latentni tragovi nastaju zbog djelovanja nabijenih čestica na strukturu detektora tako da se kidaju lanci molekula. Elektroni, neutroni i gama zrake ne ostavljaju nikakve tragove na detektorima. [17]

Nastali latentni tragovi mogu se proširiti kemijskom obradom kiselinom ili lužinom (jetkanjem) kako bi se vidjeli optičkim mikroskopom, promjera od μm na više, te ih tada nazivamo tragovima. Broj tragova na detektoru po površini zove se gustoća tragova. Ona je povezana sa koncentracijom aktivnosti radona pri kojoj je detektor bio izložen određeni vremenski period, a prilikom baždarenja detektora.

Brojanje tragova može biti optičko ili automatsko. Optičko brojanje podrazumijeva vizualno brojanje tragova na određenoj površini detektora uz pomoć mikroskopa, dok automatsko brojanje podrazumijeva korištenje drugih tehnika za brojanje gdje ne moramo vizualno brojati. Automatsko brojanje može se provesti s pomoću električnih iskri, koje preskaču s jedne elektrode kroz trag (rupa u filmu) na drugu elektrodu. Nju su otkrili Cross i Tommasino 1970. godine, a koristili su činjenicu da je film dielektrik. Jedna od elektroda je metalizirana plastična traka, pa kada iskra prođe na tu elektrodu kroz trag, metal na tom dijelu ispati i tako se zatvori taj električni put te zbog toga ne može brojati više iskri kroz isti trag. Uspješnost navedene metode je oko 95% u usporedbi s vizualnim brojanjem. Metoda je dobra do par tisuća tragova po centimetru kubičnom kada dolazi do zasićenja. [17]

Kako bismo izbjegli pogreške mjerenja uzrokovano drugim elementima koji zrače α čestice prije poluvodičkog detektora, stavljamo filtar koji propušta radon (plin), dok istovremeno zaustavlja ulazak prašine iz zraka u unutarnji dio detektora. Taj prostor između filtra i detektora naziva se detekcijska komora. Poluvodički detektori mogu biti pasivni (radon ulazu u detekcijsku komoru difuzijom) ili aktivni (pumpom prisilno ubacujemo zrak u detekcijsku komoru). Pri mjerenju koncentracije radona za ovaj diplomski rad, korišteni su pasivni detektori.



Slika 12. Shematski prikaz kidanja polimernih lanaca uslijed prolaska nabijene čestice.[26]

5.1.1. MJERENJE RADONA DETEKTORSKOM KUTIJICOM SSNTD

Određivanje koncentracije radona u stambenom objektu temelji se na određivanju koncentracije radona u zraku. Mjerenje je vršeno pasivnom metodom s detektorima nuklearnih tragova LR 115 S tip II (film) proizvođača Dosirad, Francuska. Cilindrična plastična detektorska posuda je promjera 11 cm i visine 7 cm, a na vrhu je prekrivena filter papirom veličine 3x3 cm², koji služi kao difuzni detektor. Difuzni detektor bilježi samo tragove α čestica emitirane od radona, jer radonovi potomci ne mogu proći kroz filter papir.[17]



Slika 13. Detektorska posuda.

5.1.2. REZANJE FILMOVA

Pri izradi detektorske kutijice koristimo jedan film (unutarnji) LR 115 S tip II. To je odvojivi film „Strippable (S)“, nitroceluloza kemijske formule $C_{20}H_{16}N_4$ gdje oznaka tip II znači deklariranu debljinu od 12 μm , proizvođača Dosirad, Francuska. Filmovi su pakirani u kutiji i namotani u dugačku traku duljine 13 m i širine 9 cm. Detektor za mjerenje koji koristimo treba biti dimenzija 3x3 cm stoga je traku potrebno izrezati u odgovarajuće dimenzije. Filmovi se izrezuju skalpelom pomoću kartonskog podloška. Tolerancija rezanja je ± 1 mm, jer nije potrebna veća preciznost. Prilikom rezanja filmova treba razlikovati aktivnu i neaktivnu stranu. Film je napravljen tako da se preko jedne strane celuloidne baze stavlja aktivni sloj celuloidnog nitrata obojen u crveno. Na neaktivnoj strani je goli celuloid, a na aktivnoj strani je crveni sloj, a i sam film je malo savinut u stranu na kojoj se nalazi aktivni sloj. Prilikom rezanja filma, moramo paziti da nam je aktivna strana okrenuta prema gore. Pri rukovanju filmovima, treba biti pažljiv te ih što manje doticati prstima da ih ne bi kontaminirali. Najbolje je raditi u pamučnim rukavicama, ili ukoliko nemamo rukavice, rukovati sa filmom tako da ga hvatamo za vrhove pritom izbjegavajući središnji dio filma. [17]

5.1.3. OZNAČAVANJE FILMOVA

Filmove treba označiti laganim urezivanjem čeličnom pisaljkom na neaktivnu stranu, odnosno celuloidnu bazu u jednom od kutova filma. Pri tome moramo biti pažljivi da se oznaka filma vidi jasno, a da ne probijemo film i oštetimo aktivnu stranu. Filmove smo označavali oznakom SV-broj filma. Svaki film je imao svoju oznaku, dok smo u posebnu bilježnicu napisali lokaciju označenog filma i vremenski period koji je predviđen za mjerenje.

5.1.4. ČUVANJE FILMOVA NAKON IZLAGANJA DO JETKANJA I IZLAGANJE FILMOVA

Svi detektori se čuvaju na postojanoj temperaturi u hladnjaku prema uputama proizvođača (temperatura ispod 20°C, relativna vlažnost okoline ispod 50%). Prije skladištenja detektora u hladnjak do jetkanja, detektori se umotavaju u aluminijsku foliju kako bi se zaštitili od mehaničkih oštećenja i zračenja. Aluminijska traka je obična alu-folija koja se koristi u domaćinstvima. Ona se izrezuje u dimenzije koje su veće od detektora i pritom se detektori umataju. Posao označavanja i umatanja trebaju raditi dvije osobe. Kontrola upisivanja se vrši na taj način da se najprije u knjigu rezanja upisuje pojedini broj detektora, potom se taj broj upisuje na detektor. Druga osoba zamata detektor u aluminijsku traku i upisuje broj zamotanog detektora na traku.

Neizlagani detektori čuvaju se u posebnoj plastičnoj posudi na kojoj piše „Neizlagani detektori“ koja je pohranjena u hladnjaku, dok se izlagani detektori čuvaju u posebnoj plastičnoj posudi do kemijske obrade, odnosno jetkanja na kojoj piše „Izlagani detektori“.

Filmovi se lijepe ljepljivom trakom tako da se difuzni film lijepi na unutarnju stranu poklopca. Filmove lijepimo na način da ljepljivom trakom zalijepimo samo kutove filma, pazeći pri tom da je doticajna površina filma i ljepljive trake najmanja moguća. Aktivna strana filma uvijek treba biti okrenuta prema van.

Difuzni film kakav smo koristili pri mjerenjima, registrira samo tragove α čestica emitiranih od radona jer radonovi potomci ne mogu proći kroz difuzni otvor (filter papir). Koncentracija radona u zraku određena je kao produkt koeficijenta osjetljivosti i gustoće tragova na difuzijskom filmu.

Vanjskim detektorom (mi ga nismo koristili prilikom mjerenja koncentracije radona) se registrira ukupan broj α čestica koje potječu od radona i njegovih kratkoživućih potomaka. On za razliku od difuznog detektora detektira i radonove potomke. [17]

5.1.5. POSTAVLJANJE DETEKTORSKE POSUDE

Opisana detektorska posuda namijenjena je mjerenju radona u zraku. Filmovi se lijepe na licu mjesta kako ne bi detektirali radon prilikom transporta. Ukoliko dolazi do transporta detektora, tada detektor treba cijeli zaštititi i vakuumirati. Ukoliko nije, u računu kasnije treba uzeti u obzir doze zračenja i uvrstiti taj transport.

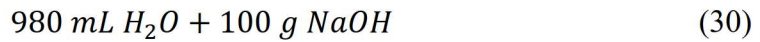
Sastavljena detektorska posuda postavlja se na ormar u dnevnu sobu, spavaću sobu (ili neku drugu prostoriju gdje se najviše boravi) na ormar tako da je otvor sa mrežicom okrenut prema gore.

5.1.6. KEMIJSKA OBRADA FILMOVA LR 115 S tip II

Filmovi se pripremaju za kemijsku obradu (jetkanje) tako što moraju biti čisti, bez ostataka ljepila ili prljavštine. Filmovi se jedan po jedan vade iz aluminijske folije, te se broj filma upisuje u knjigu jetkanja. Uzima se vanjski prsten za jetkanje odvojivih filmova i upisuje se njegov broj tako da se broju filma pridoda broj vanjskog prstena u knjizi jetkanja. Film se tada pažljivo odvoji od celuloidne baze te se stavlja u vanjski prsten. Film je tanak i sa njime se treba postupati izuzetno pažljivo. Potom se uzima unutarnji prsten i utisne u vanjski prsten tako da film ostane učvršćen između ta dva prstena. Višak filma pažljivo uklonimo skalpelom kako se film ne bi izvukao iz prstena i pokidao. Vanjski prsten na vrhu ima probušenu rupicu, pa ga se može objesiti na stalak za jetkanje. Na stalak za jetkanje između filmova se obavezno mora staviti plastični separator kako se filmovi ne bi priljubili jedan uz drugog, te se loše kemijski obradili u procesu jetkanja. Vanjski i unutarnji prsten trebaju biti čisti i suhi, oprani prije upotrebe. Peru se tako da se stave u petrijevu zdjelicu, operu pod mlazom vode i posuše se čistim papirnatim ubrusom. Uz sve izložene filmove stavlja se i nulti film koji je izrezan kada i svi ostali filmovi, samo što ga se pohranjuje u hladnjaku. On služi za određivanje pozadinskog zračenja od radona. Prije samog postupka jetkanja, filmovi se zajedno sa stalkom za jetkanje stavljaju u destiliranu vodu na 20 minuta kako bi se oprali. Nakon toga su spremni za postupak jetkanja.

Tragovi zabilježeni filmovima nisu direktno vidljivi pa se prije postupka brojanja moraju proširiti što se postiže jetkanjem. Jetkanje se radi sa 10%-tnom vodenom otopinom NaOH, ukupnog volumena 1 L kako bi svi filmovi koji se nalaze na stalku za jetkanje bili potopljeni u otopinu unutar kalorimetrijske posude. Tijekom jetkanja otopina se ne smije dirati niti miješati.

Recept za pravljenje 10%-tne NaOH otopine je sljedeći:



Bitno je napomenuti da se zrnca NaOH ne smiju doticati prstima jer je kemikalija higrofilna i lužnata pa bi ostavila kemijsku ozljedu. Zrnca NaOH se iz male laboratorijske čaše presipaju u veliku čašu s destiliranom vodom te se otopina miješa staklenim štapićem sve dok se ne otope. Treba pripaziti da se sva zrnca NaOH otope, odnosno da se neko zrnce nije zalijepilo na stranice staklene čaše. Proces otapanja NaOH je egzoterman, što znači da dolazi do oslobađanja topline, pa je potrebno paziti na povišenu temperaturu. Također je bitno cijeli proces obavljati u dobro prozračenoj prostoriji ili digestoru, da ne bi došlo do inhalacije toksičnih para, te imati na rukama i tijelu zaštitnu opremu (naočale, rukavice, masku, kutu). [17]

Kada su se sva zrnca otopila u staklenoj čaši i tekućina postala bistra, potrebno ju je presipati u kalorimetar. Uz kalorimetar se stavlja termometar koji služi za dodatnu kontrolu temperature i pritom se poklopi poklopcem s rupom u sredini kroz koju viri termometar.

Kalorimetar se upravlja pomoću elektroničkog uređaja za postizanje željene temperature i odbrojavanja vremena jetkanja, a spaja se sa kabelom s pripadajućim elektroničkim ruskim sustavom. Kada uključimo uređaj, tada postavljamo željenu temperaturu jetkanja i vremenski interval jetkanja. Temperatura jetkanja iznosi 50°C za filmove LR 115 S tip II, a vrijeme trajanja jetkanja je 150 minuta za navedeni tip filma.

Nakon isteka jetkanja pažljivo se skida poklopac kalorimetra, vadi se stalak sa filmovima za jetkanje te se sačeka kako bi se ocijedila sva tekućina sa filmova. Nakon toga se filmovi zajedno sa stalkom stavljaju u destiliranu vodu na završno pranje koje traje 20 minuta uz povremeno dizanje i spuštanje stalka sa filmovima. Termometar ponovno uranjamo u otopinu i provjeravamo temperaturu. Nakon provjere temperature, gasi se u elektronički uređaj koji smo koristili za jetkanje.

Nakon pranja, filmovi se suše na stalku u sobi na zraku 24 sata.

5.1.7. BROJANJE FILMOVA

Brojanje je postupak brojanja tragova na određenoj površini filma. Trag predstavlja oštećenje filma uzrokovano α česticama (rupa u filmu) koje je procesom jetkanja prošireno. Nakon kemijske obrade i sušenja filmova, tragovi na filmu automatski se broje pomoću uređaja Spark Counter AIST-2V. Broj tragova upisuje se u knjigu brojanja, ali je potrebno iz knjige jetkanja vidjeti o kojem se filmu radi jer je na vanjskom prstenu broj prstena, a ne oznaka filma o kojemu se radi. Naknadno se vrši račun koncentracije radona i pogreške mjerenja.

5.1.8. MATEMATIČKI IZRAZI ZA RAČUNANJE

Gustoća tragova ρ je broj tragova na filmu po cm^2 , a računa se pomoću izraza:

$$\rho = \frac{\sum t_i}{N \cdot P} \quad (31)$$

Mjerna jedinica za gustoću tragova je trag po centimetru kvadratnom (trag/cm^2).

Pogreška brojanja tragova σ_ρ računa se kao drugi korijen izbrojanih tragova:

$$\sigma_\rho = \frac{\sqrt{\frac{\sum t_i}{N}}}{P} \quad (32)$$

gdje $\sum t_i$ predstavlja broj svih tragova na jednom filmu, N predstavlja broj polja (4), dok P predstavlja površinu brojanog područja filma koje iznosi za film LR 115 S $1,06 \text{ cm}^2$. Mjerna jedinica za pogrešku brojanja tragova iznosi trag po centimetru kvadratnom (trag/cm^2).

Izračun gustoće tragova nultog filma ρ_0 računamo na sljedeći način:

$$\rho_0 = \frac{\sum t_{oi}}{N \cdot P} \quad (33)$$

Izraz za pogrešku brojanja tragova nultog filma σ_{ρ_0} je:

$$\sigma_{\rho_0} = \frac{\sqrt{\frac{\sum t_{oi}}{N}}}{P} \quad (34)$$

gdje $\sum t_{oi}$ predstavlja zbroj svih tragova na nultom filmu, N predstavlja broj polja (4), a P predstavlja površinu brojanog područja filma ($1,06 \text{ cm}^2$).

Za izračun nam je također bitno znati i Δt koji nam pokazuje koliko je dana proteklo od početka mjerenja. Račun razlike između gustoće tragova filma i nultog filma označavamo oznakom n , a možemo ga prikazati na sljedeći način:

$$n = \rho - \rho_0 \quad (35)$$

Da bi mogli napraviti izračun gustoće tragova u vremenu difuznog filma D' potreban nam je izraz:

$$D' = \frac{n}{\Delta t} \quad (36)$$

Iz svih navedenih izraza, u konačnici računamo aktivnost radona, odnosno češće korišten izraz **koncentracije radona c_{Rn}** .

$$c_{Rn} = D' \cdot k \quad (37)$$

gdje k predstavlja koeficijent osjetljivosti koji za ovu tehniku iznosi $65 \pm 23 \text{ Bq m}^{-3}/\text{trag cm}^{-2} \text{ dan}^{-1}$. Mjerna jedinica za koncentraciju aktivnosti radona iznosi Bq/m^3 .

U konačnici, da bi izračunali pogrešku mjerenja koncentracije radona $\sigma_{c_{Rn}}$ koristimo se izrazom:

$$\sigma_{c_{Rn}} = \sqrt{(D' \cdot 23)^2 + \left(\frac{65}{\Delta t} \cdot \sigma_\rho\right)^2 + \left(\frac{65}{\Delta t} \cdot \sigma_{\rho_0}\right)^2} \quad (38)$$

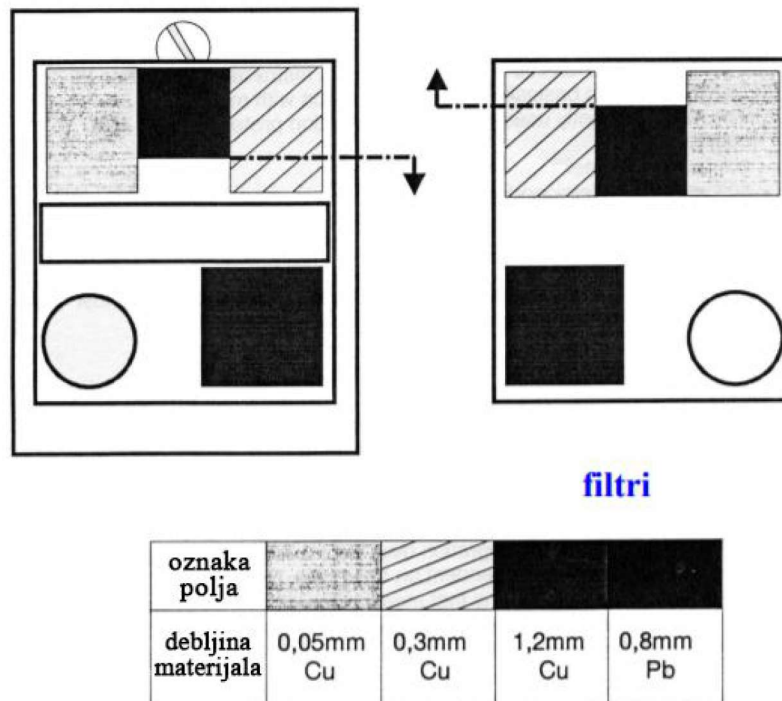
Mjerna jedinica za pogrešku mjerenja koncentracije radona iznosi Bq/m^3 . [17]

5.2. TERMOLUMINISCENTNI DOZIMETRI (TLD)

Dvije najčešće vrste dozimetara koje se upotrebljavaju su filmski i termoluminiscentni dozimetri.

5.2.1. FILMSKI DOZIMETRI

Filmski dozimetar je najduže u uporabi i najčešća je vrsta dozimetra u dijagnostičkoj radiologiji. Princip rada filmskog dozimetra je jednostavan, a sastoji se od mjerenja zacrnljenja filma nakon njegovog izlaganja zračenju kroz određeni vremenski period, te usporedbi tog zacrnljenja sa zacrnljenjem filma izloženog djelovanju poznate doze zračenja. Filmski dozimetar sastoji se od plastične kutijice s ugrađenim metalnim filtrima od različitog materijala i različite debljine. U kutijici između filtera smješten je film dimenzija uglavnom 4 x 3 cm, gdje je četvrtina filtera slobodna i registrira meka zračenja i moguću kontaminaciju radioaktivnim supstancama, dok su preostale tri četvrtine površine filtera prekrivene filtrima: Cu debljine 0,05 mm, 0,3 mm, 1,2 mm, te Pb debljine 0,8 mm.



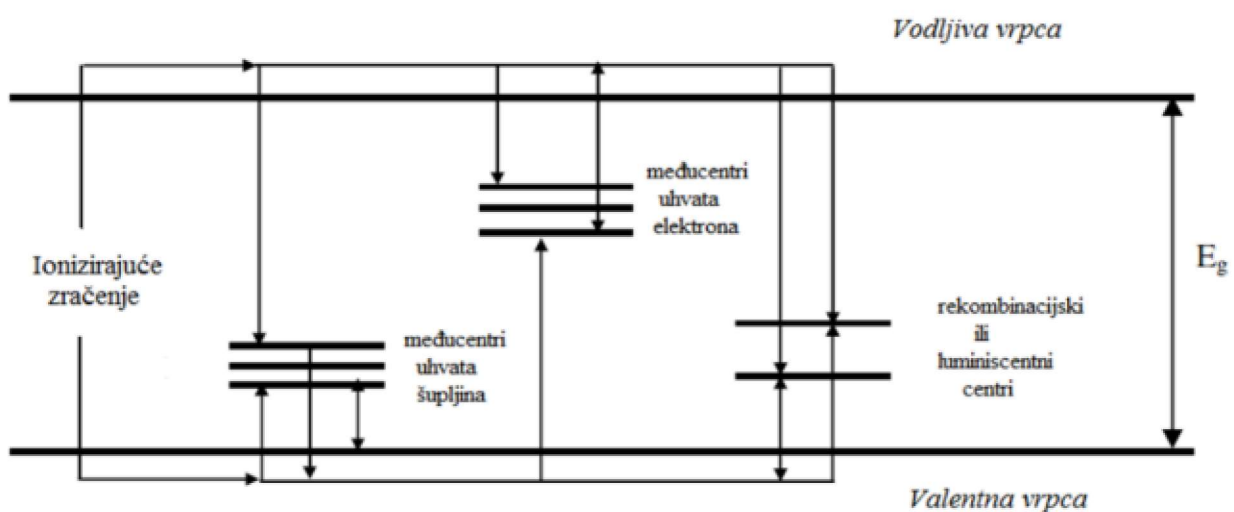
Slika 14. Prikaz filtera filmskog dozimetra.

Nakon određenog, uvijek istog vremena izlaganja dozimetra, filmski dozimetar se šalje na fotografsku obradu, te se nakon razvijanja filma mjeri gustoća zacrnljenja filma pomoću optičkog

ili fotoelektričkog denzitometra. Stupanj zacrnljenja filma proporcionalan je kumulativnoj dozi zračenja kojoj je bio izložen tijekom izlaganja zračenju. Nakon rada, dozimetar se obavezno ostavlja izvan zone zračenja. S njim je potrebno pažljivo rukovati te ga čuvati od mehaničkih oštećenja. [28]

5.2.2. TERMOLUMINISCENCIJA

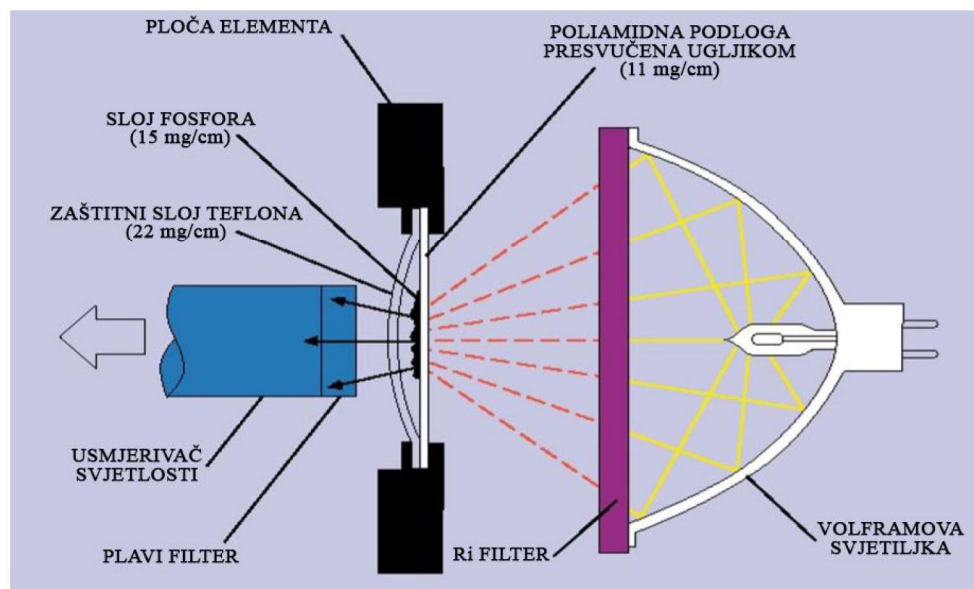
Termoluminiscencija je proces stvaranja svjetlosti u materijalu uvjetovana prethodnim termalnim pobuđenjem atoma ili molekula u TL materijalu. Javlja se kod materijala izolatora i poluvodiča koji sadrže ione nečistoća i defekte. U čistim izolatorima imamo gotovo punu valentnu i gotovo praznu vodljivu vrpca koje su odvojene zabranjenim pojasom, procjepom u kojem nema dopuštenih elektronskih nivoa. Ono što je također bitno napomenuti je da elektroni mogu prelaziti iz valentne u vodljivu vrpca i stvarati slobodne elektrone, a za sobom ostavljajući slobodne šupljine. Nečistoće i defekti u materijalu, u zabranjenom procjepu između vodljive i valentne vrpce, mogu stvoriti nove, lokalizirane nivoe. Položaj tih nivoa određen je prirodom defekata i matične rešetke. Neki od tih nivoa mogu uhvatiti elektron ili šupljinu, te ih zovemo međucentrima uhvata elektrona ili šupljina (traps – eng.). Osim njih, u materijalu postoje i luminiscentni centri. Kada je takav materijal izložen ionizirajućem zračenju, dolazi do redistribucije naboja u materijalu. Apsorbirana energija u kristalnoj rešetki pohranjuje se u obliku elektrona i šupljina uhvaćenih u međucentre i luminiscentne centre. Opisanu situaciju prikazuje Slika 15.



Slika 15. Shematski prikaz procesa termoluminiscencije.

Količina uhvaćenih elektrona proporcionalna je apsorbiranom zračenju te su zato ovi materijali pogodni za dozimetriju. Vanjskom stimulacijom, u TL slučaju grijanjem, ti se elektroni oslobađaju i postaju mobilni, te su provučeni u suprotno nabijene luminiscentne centre. Rekombinacijom elektrona i šupljine oslobađa se energija u obliku svjetlosti. Nakon ovog procesa materijal sadrži manje ne sparenih elektrona i šupljina u centrima te je time vraćen u prvobitno stanje u kakvom je bio prije apsorpcije ionizirajućeg zračenja.

Pulsirajuća svjetlost svjetiljke usmjerena je na TL element. Tri impulsa u trajanju od 0,1 do 0,4 s obično će inducirati tri TL vrha. Prvi je vrlo mali i brzo propadajući *peak* s niskom energijom. Drugi je dominantan i stabilan *peak* na otprilike 210°C. Treći je produkt oslobađanja klopki duboke energije koji učinkovito zagrijava element za ponovno korištenje.



Slika 16. Prikaz zagrijavanja elementa.

Tijekom očitavanja TL dozimetara materijal se zagrijava kontrolirano s konstantnim prirastom temperature. Time je porast temperature proporcionalan vremenu koje je prošlo od početka zagrijavanja.

Kroz cijelo vrijeme mjerenja korištenjem fotomultiplikatorske ćelije prima se, bilježi i pojačava svaki nastali svjetlosni signal odnosno termoluminiscencija. Grafički rezultat zabilježenog TL intenziteta u ovisnosti o vremenu je time ujedno i prikaz ovisnosti TL intenziteta o temperaturi zagrijavanja i naziva se krivulja isijavanja. Oblik same krivulje isijavanja ovisi o vrsti i količini defekata i nečistoća prisutnih u materijalu. Površina ispod krivulje isijavanja daje nam mjeru primljene doze. Važna karakteristika TL materijala je da s vremenom i prije očitavanja

može doći do nasumičnog otpuštanja uhvaćenih elektrona zbog moguće nekontrolirane termalne ili optičke stimulacije. To je efekt gubitka signala.

Svaki TL materijal je, iako se svi u osnovi baziraju na istom fizikalnom efektu, jedinstven i pokazuje različite karakteristike. Istraživanjem tih karakteristika razvijeni su i zbog svojih prednosti poprilično rašireni u komercijalnoj upotrebi za osobnu dozimetriju. Prilikom korištenja ovakve vrste dozimetara određuje se ukupna doza koja je akumulirana tijekom vremenskog perioda korištenja dozimetra.

5.2.3. PANASONIC UD - 802 AT DOZIMETAR

Panasonic TL dozimetar koristi četiri tanka TL elementa unutar samog dozimetra, obrađenih u čitaču velike brzine koristeći optičku metodu grijanja. Panasonic UD - 802 AT je vrsta dozimetra koji se sastoji od četiri elementa čiji je sastav naveden u Tablici 5.



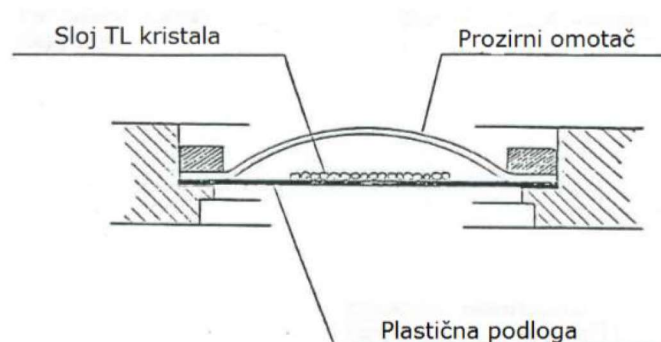
Slika 17. Panasonic UD-802AT dozimetar korišten pri mjerenju.

TL materijali sastoje se od zrnaca kristala ugrađenih u kap ljepila koje je položeno na crnu podlogu. Podloga i ljepilo načinjeni su od iste poliamidne mješavine. Gornja strana kristala prekrivena je teflonskim prozirnim omotačem koji štiti kristal dok istovremeno omogućava prolazak TL svjetlosti. Teflon nije otporan na plin i vlagu tako da oni mogu prodrijeti do kristala i uzrokovati promjene u krivuljama isijanja elemenata te u konačnici utjecati na rezultate mjerenja.

Tablica 5. Karakteristike termoluminiscentnih dozimetara tipa Panasonic UD 802 AT.[31]

		Element 1	Element 2	Element 3	Element 4
UD 802 AT Termoluminiscentni dozimetri	kemijski sastav TL elementa	${}^n\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$	${}^n\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$	CaSO_4	CaSO_4
	prednja filtracija	plastika 14 mg/cm ²	plastika 160 mg/cm ²	plastika 160 mg/cm ²	olovo 0,7 mm
	stražnja filtracija	plastika 14 mg/cm ²	plastika 160 mg/cm ²	plastika 160 mg/cm ²	olovo 0,7 mm
	osjetljivost	β, γ	β, γ	β, γ	γ
	karakteristike	TL dozimetar s četiri elementa koji se koristi za osobnu dozimetriju fotona i elektrona, a uz odgovarajuću poznatu energijsku korekciju može se koristiti i za neutronske dozimetriju.			

Presjek TL elementa prikazan je na Slici 18. Svaki element je načinjen od zrnaca promjera oko 90 μm posloženih u približno jedan sloj na bazu od poliamidnog filma debljine oko 100 μm , uključujući i nešto ugljika.



Slika 18. Presjek TL elementa.

Luminiscentni materijali koji se koriste za TL dozimetre su litijev tetraborat aktiviran bakrom $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu}$ i kalcijev sulfat aktiviran tulijem $\text{CaSO}_4:\text{Tm}$. Korišteni TLD Panasonic sustav je umjeren za određivanje osobnog doznog ekvivalenta $\text{Hp}(10)$ od fotonskog zračenja u području energija 33 kV do 1,3 MeV. Raspon doza koje se mogu pouzdano mjeriti je od $85\mu\text{Sv}$ do 100 mSv.

TL dozimetri se očitavaju u čitaču TL dozimetra, a očitane vrijednosti za pojedini dozimetar se korigiraju uporabom korekcijskih faktora elemenata (eng. element correction factors). Metoda za određivanje $\text{Hp}(10)$ od fotonskih zračenja koristi samo vrijednost očitavanja na drugom elementu (E2) jer energijski odziv za taj element odstupa oko -20% za energije ispod 100 keV u odnosu na energiju izotopa $^{137}_{55}\text{Cs}$ koji se koristi za umjeravanje sustava. Za energije više od 100 keV krivulja energijskog odziva je praktički horizontalna oko vrijednosti 1. Od tako izračunate korigirane vrijednosti za pojedini dozimetar, oduzima se prosječna vrijednost od pozadinskog zračenja koja je mjerena grupom TL dozimetara u laboratoriju, te se rezultat dodatno korigira zbog gubitka signala tijekom perioda mjerenja dozimetra. Tako dobivena vrijednost predstavlja osobni dozni ekvivalent $\text{Hp}(10)$ za osobu koja je nosila taj dozimetar.

Primijenjena metoda mjerenja zove se „Određivanje $\text{Hp}(10)$ korištenjem termoluminiscentnih dozimetara“ i akreditirana je prema normi HRN EN ISO IEC 17025.

Prednosti TL detektora:

- Postojanje TL materijala efektivnog atomskog broja približno ekvivalentnog mekom tkivu
- Zadovoljavajuće visoka osjetljivost i točnost
- Mogućnost izrade malih komercijalnih detektora
- Pogodnost za dozimetriju kože i ekstremiteta
- Dostupnost TL materijala sa vrlo dobrom stabilnošću s obzirom na utjecaje različite okoline
- Mogućnost ponovnog korištenja

Nedostatci TL detektora:

- Visoka cijena
- Osjetljivost na temperaturu

TL dozimetre koji su korišteni za mjerenje koncentracije radona u ovom diplomskom radu pripremio i očitao je Jerko Šiško, dipl. inž. fizike sa Instituta za medicinska istraživanja i medicinu rada, Jedinica za dozimetriju zračenja i radiobiologiju.

6. REZULTATI I RASPRAVA

Prvi dio mjerenja odnosi se na mjerenja izvršena SSNTD detektorima u stambenoj zgradi u Donjem Miholjcu. Zgrada u kojoj su mjerenja vršena izgrađena je 1992. godine, a sastoji se od četiri etaže: podrum, prizemlje, prvi kat i drugi kat. Mjerenje je rađeno na način da su na svaku od navedene četiri etaže postavljena tri detektora, sveukupno 12 detektora po vertikali stambenog objekta. Vrijeme izlaganja prvog niza detektora na svakoj etaži iznosilo je 3 mjeseca, drugog niza detektora 6 mjeseci, a trećeg 12 mjeseci, odnosno godinu dana. Mjerenja su počela 01.12.2016. godine, a završila su 30.11.2018. godine. Ukupno trajanje mjerenja koncentracije aktivnosti radona SSNTD detektorima trajalo je dvije godine. Na svim etažama, osim u podrumu nalaze se stanovi koji su nastanjeni. Nakon dvije godine mjerenja, u Tablici 6. prikazani su rezultati mjerenja SSNTD detektorima u sve četiri etaže stambene zgrade.

Tablica 6. Rezultati mjerenja dobiveni SSNTD detektorima (prikazani su u tablici na sljedećoj stranici).

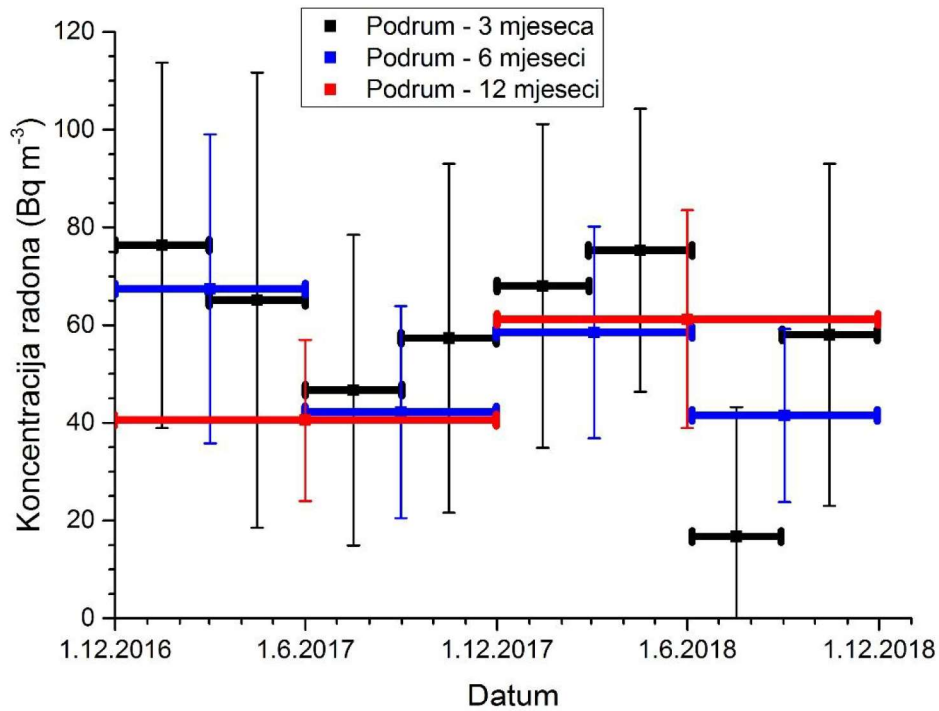
		Ime i prezime: Matea Koščak Adresa: Naselje Tržnica 8 Mjesto: Donji Miholjac Poštanski broj: 31540				La Lon Napomena: Svi rezultati mjer	
R.B.	Detektor	Kat	Početak mjerenja	Završetak mjerenja	Datum jetkanja	Trajanje izlaganja	Trajanje izlaganja
1.	SV - 1	-1	1.12.2016	1.3.2017	17.3.2017	3 mjeseca	2160
2.	SV - 2	-1	1.12.2016	1.6.2017	14.6.2017	6 mjeseci	4368
3.	SV - 3	-1	1.12.2016	1.12.2017	1.12.2017	12 mjeseci	8760
4.	SV - 4	0	1.12.2016	1.3.2017	17.3.2017	3 mjeseca	2160
5.	SV - 5	0	1.12.2016	1.6.2017	14.6.2017	6 mjeseci	4368
6.	SV - 6	0	1.12.2016	1.12.2017	1.12.2017	12 mjeseci	8760
7.	SV - 7	1	1.12.2016	1.3.2017	17.3.2017	3 mjeseca	2160
8.	SV - 8	1	1.12.2016	1.6.2017	14.6.2017	6 mjeseci	4368
9.	SV - 9	1	1.12.2016	1.12.2017	1.12.2017	12 mjeseci	8760
10.	SV - 10	2	1.12.2016	1.3.2017	17.3.2017	3 mjeseca	2160
11.	SV - 11	2	1.12.2016	1.6.2017	14.6.2017	6 mjeseci	4368
12.	SV - 12	2	1.12.2016	1.12.2017	1.12.2017	12 mjeseci	8760
13.	SV – 64	-1	1.3.2017	1.6.2017	14.6.2017	3 mjeseca	2208
14.	SV – 65	0	1.3.2017	1.6.2017	14.6.2017	3 mjeseca	2208

R.B.	Detektor	Kat	Početak mjerenja	Završetak mjerenja	Datum jetkanja	Trajanje izlaganja	Trajanje izlaganja
15.	SV - 66	1	1.3.2017	1.6.2017	14.6.2017	3 mjeseca	2208
16.	SV - 67	2	1.3.2017	1.6.2017	14.6.2017	3 mjeseca	2208
17.	SV - 68	-1	1.6.2017	1.9.2017	8.9.2017	3 mjeseca	2208
18.	SV – 85	-1	1.6.2017	1.12.2017	1.12.2017	6 mjeseci	4392
19.	SV – 86	0	1.6.2017	1.9.2017	8.9.2017	3 mjeseca	2208
20.	SV – 87	0	1.6.2017	1.12.2017	1.12.2017	6 mjeseci	4392
21.	SV - 88	1	1.6.2017	1.9.2017	8.9.2017	3 mjeseca	2208
22.	SV – 89	1	1.6.2017	1.12.2017	1.12.2017	6 mjeseci	4392
23.	SV – 90	2	1.6.2017	1.9.2017	8.9.2017	3 mjeseca	2208
24.	SV – 91	2	1.6.2017	1.12.2017	1.12.2017	6 mjeseci	4392
25.	SV – 92	-1	1.9.2017	1.12.2017	1.12.2017	3 mjeseca	2184
26.	SV – 127	0	1.9.2017	1.12.2017	1.12.2017	3 mjeseca	2184
27.	SV – 128	1	1.9.2017	1.12.2017	1.12.2017	3 mjeseca	2184
28.	SV – 129	2	1.9.2017	1.12.2017	1.12.2017	3 mjeseca	2184
29.	SV - 130	-1	1.12.2017	27.2.2018	2.3.2018	3 mjeseca	2112
30.	SV – 181	-1	1.12.2017	6.6.2018	7.6.2018	6 mjeseci	4488
31.	SV – 182	-1	1.12.2017	30.11.2018	4.12.2018	12 mjeseci	8736
32.	SV – 183	0	1.12.2017	27.2.2018	2.3.2018	3 mjeseca	2112
33.	SV – 184	0	1.12.2017	6.6.2018	7.6.2018	6 mjeseci	4488

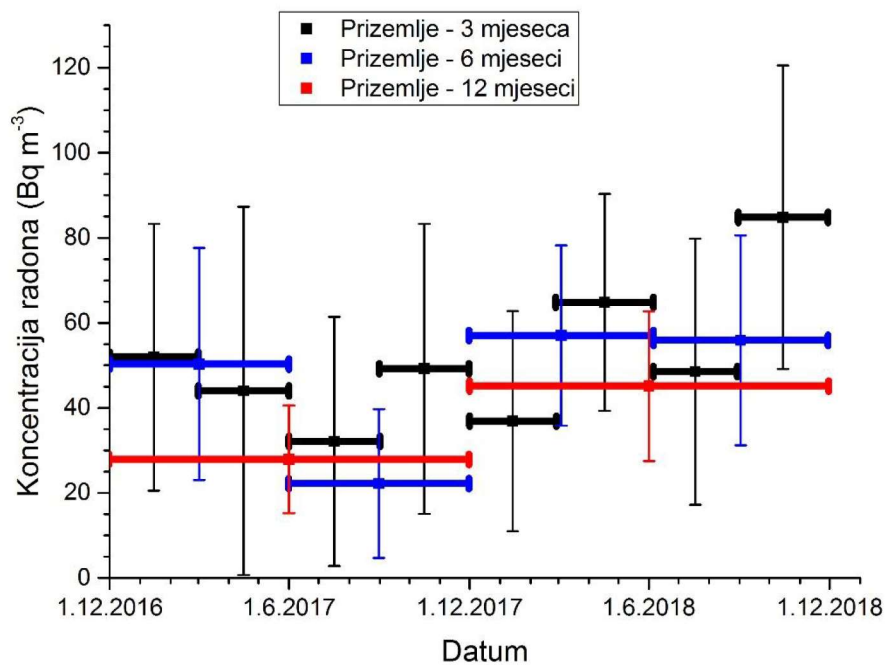
R.B.	Detektor	Kat	Početak mjerenja	Završetak mjerenja	Datum jetkanja	Trajanje izlaganja	Trajanje izlaganja
34.	SV – 185	0	1.12.2017	30.11.2018	6.12.2018	12 mjeseci	8736
35.	SV – 186	1	1.12.2017	27.2.2018	2.3.2018	3 mjeseca	2112
36.	SV – 187	1	1.12.2017	6.6.2018	7.6.2018	6 mjeseci	4488
37.	SV – 188	1	1.12.2017	30.11.2018	4.12.2018	12 mjeseci	8736
38.	SV – 189	2	1.12.2017	27.2.2018	2.3.2018	3 mjeseca	2112
39.	SV – 190	2	1.12.2017	6.6.2018	7.6.2018	6 mjeseci	4488
40.	SV -191	2	1.12.2017	30.11.2018	6.12.2018	12 mjeseci	8736
41.	SV – 192	-1	27.2.2018	6.6.2018	7.6.2018	3 mjeseca	2376
42.	SV – 222	0	27.2.2018	6.6.2018	7.6.2018	3 mjeseca	2376
43.	SV – 223	1	27.2.2018	6.6.2018	7.6.2018	3 mjeseca	2376
44.	SV – 224	2	27.2.2018	6.6.2018	7.6.2018	3 mjeseca	2376
45.	SV – 225	-1	6.6.2018	30.8.2018	3.9.2018	3 mjeseca	2040
46.	SV – 254	0	6.6.2018	30.8.2018	3.9.2018	3 mjeseca	2040
47.	SV – 255	1	6.6.2018	30.8.2018	3.9.2018	3 mjeseca	2040
48.	SV - 256	2	6.6.2018	30.8.2018	3.9.2018	3 mjeseca	2040
49.	SV – 257	-1	6.6.2018	30.11.2018	4.12.2018	6 mjeseci	4248
50.	SV – 258	0	6.6.2018	30.11.2018	4.12.2018	6 mjeseci	4248
51.	SV – 259	1	6.6.2018	30.11.2018	6.12.2018	6 mjeseci	4248
52.	SV – 260	2	6.6.2018	30.11.2018	6.12.2018	6 mjeseci	4248

R.B.	Detektor	Kat	Početak mjerenja	Završetak mjerenja	Datum jetkanja	Trajanje izlaganja	Trajanje izlaganja
53.	SV – 261	-1	31.8.2018	30.11.2018	6.12.2018	12 mjeseci	2184
54.	SV – 285	0	31.8.2018	30.11.2018	4.12.2018	3 mjeseca	2184
55.	SV – 286	1	31.8.2018	30.11.2018	6.12.2018	6 mjeseci	2184
56.	SV – 287	2	31.8.2018	30.11.2018	6.12.2018	12 mjeseci	2184

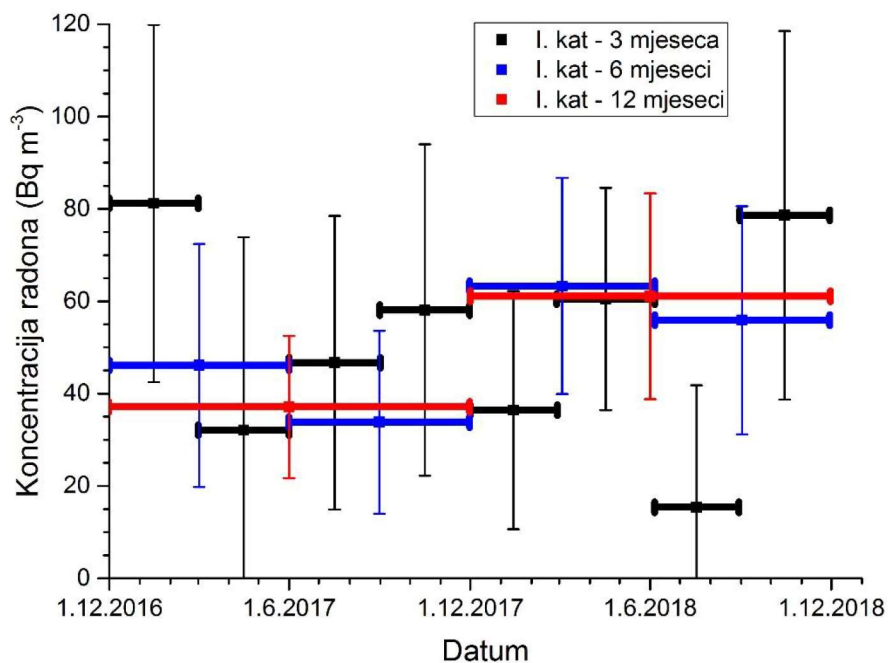
Prikazane podatke u Tablici 6. možemo prikazati i grafički:



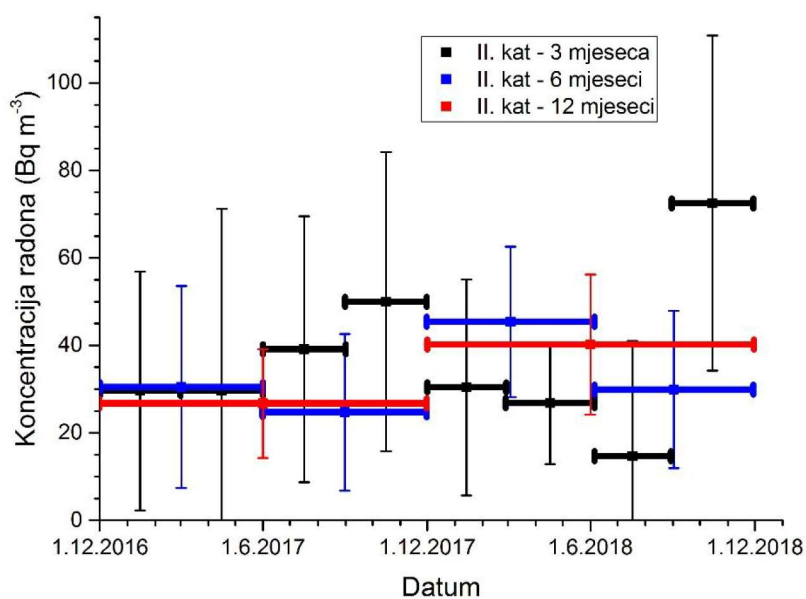
Slika 19. Grafički prikaz koncentracije radona u podrumu.



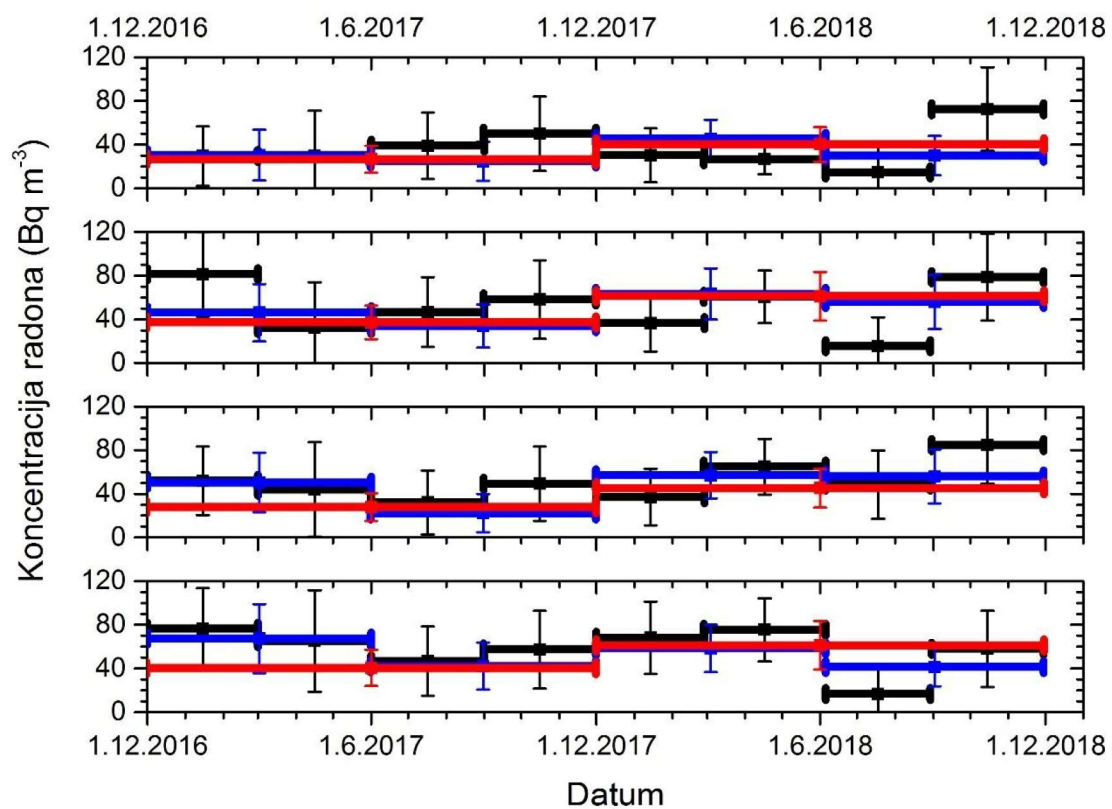
Slika 20. Grafički prikaz koncentracije radona u prizemlju.



Slika 21. Grafički prikaz koncentracije radona na prvom katu.



Slika 22. Grafički prikaz koncentracije radona na drugom katu.



Slika 23. Prikaz koncentracije radona na sve četiri etaže kroz dvije godine mjerenja u intervalima po tri, šest i dvanaest mjeseci.

Drugi dio mjerenja koncentracije radona u zraku vršen je TL dozimetar u trajanju od dvije godine. Po jedan TL dozimetar postavljen je na svaku od navedenih etaža. Vrijeme mjerenja prve serije TL dozimetara trajalo je godinu dana. Nakon toga, TL dozimetri su poslani na Institut za medicinska istraživanja i medicinu rada – Jedinica za dozimetriju zračenja i radiobiologiju na očitavanje. Nakon prve serije TL dozimetara postavljena je druga serija, također kao i prvi put: na svaku etažu stambene zgrade postavljen je jedan TL dozimetar u trajanju od godinu dana. Ukupno trajanje mjerenja TL dozimetrima trajalo je godinu dana i tri mjeseca. U Tablici 7. prikazani su rezultati mjerenja za prvu etapu mjerenja u Tablici 8. za drugu etapu mjerenja, Tablici 9. za treću etapu mjerenja, u Tablici 10. za četvrtu etapu mjerenja i u Tablici 11. za petu etapu mjerenja TL dozimetara.

Tablica 7. Rezultati mjerenja TL dozimetara (prva etapa).

Oznaka dozimetra	Početak mjerenja	Završetak mjerenja	Lokacija	Datum obrade	Brzina doze $H^*(10)/t$ [nSv/h]	Ukupna ambijetalna doza $H^*(10)$ [mSv]
6181020	01.12.2016.	01.03.2017.	podrum	01.03.2017.	66	0,160
6181021	01.12.2016.	01.03.2017.	prizemlje	01.03.2017.	94	0,226
6181037	01.12.2016.	01.03.2017.	1. kat	01.03.2017.	82	0,197
6181039	01.12.2016.	01.03.2017.	2. kat	01.03.2017.	89	0,214

Tablica 8. Rezultati mjerenja TL dozimetara (druga etapa).

Oznaka dozimetra	Početak mjerenja	Završetak mjerenja	Lokacija	Datum obrade	Brzina doze $H^*(10)/t$ [nSv/h]	Ukupna ambijetalna doza $H^*(10)$ [mSv]
6181024	01.03.2017.	01.06.2017.	podrum	06.06.2017.	84	0,200
6181026	01.03.2017.	01.06.2017.	prizemlje	06.06.2017.	113	0,268
6181038	01.03.2017.	01.06.2017.	1. kat	06.06.2017.	107	0,255
6181048	01.03.2017.	01.06.2017.	2. kat	06.06.2017.	123	0,293

Tablica 9. Rezultati mjerenja TL dozimetara (treća etapa).

Oznaka dozimetra	Početak mjerenja	Završetak mjerenja	Lokacija	Datum obrade	Brzina doze $H^*(10)/t$ [nSv/h]	Ukupna ambijetalna doza $H^*(10)$ [mSv]
6181017	01.06.2017.	01.09.2017.	podrum	18.09.2017.	74	0,200
6181011	01.06.2017.	01.09.2017.	prizemlje	18.09.2017.	100	0,269
6181019	01.06.2017.	01.09.2017.	1. kat	18.09.2017.	89	0,238
6181005	01.06.2017.	01.09.2017.	2. kat	18.09.2017.	116	0,311

Tablica 10. Rezultati mjerenja TL dozimetara (četvrta etapa).

Oznaka dozimetra	Početak mjerenja	Završetak mjerenja	Lokacija	Datum obrade	Brzina doze H*(10)/t [nSv/h]	Ukupna ambijetalna doza H*(10) [mSv]
6181065	01.09.2017.	01.12.2017.	podrum	06.12.2017.	107	0,254
6181061	01.09.2017.	01.12.2017.	prizemlje	06.12.2017.	125	0,298
6181064	01.09.2017.	01.12.2017.	1. kat	06.12.2017.	119	0,284
6181050	01.09.2017.	01.12.2017.	2. kat	06.12.2017.	135	0,320

Tablica 11. Rezultati mjerenja TL dozimetara (peta etapa).

Oznaka dozimetra	Početak mjerenja	Završetak mjerenja	Lokacija	Datum obrade	Brzina doze H*(10)/t [nSv/h]	Ukupna ambijetalna doza H*(10) [mSv]
6181055	01.12.2017.	01.03.2018.	podrum	06.03.2018.	62	0,148
6181056	01.12.2017.	01.03.2018.	prizemlje	06.03.2018.	89	0,210
6181057	01.12.2017.	01.03.2018.	1. kat	06.03.2018.	92	0,219
6181038	01.12.2017.	01.03.2018.	2. kat	06.03.2018.	96	0,228

6.1. ANALIZA REZULTATA

Dobiveni rezultati SSNTD detektora i TL dozimetara statistički su obrađeni na način da je promatrano ima li statistički značajne razlike između odabranih varijabli mjerenja. U svim je provedenim testovima odabran uvjet statističke značajnosti od 95% ($p < 0,05$).

Kako je SSNTD detektorima mjerena koncentracija radona u vremenskom periodu od dvije godine, postavljena je nul-hipoteza koja pretpostavlja da između dvije godine mjerenja nema statistički značajne razlike između SSNTD detektora. Provođenjem t – testa, dobiveni rezultat je potvrdio postavljenu nul-hipotezu da između dvije godine mjerenja SSNTD detektorima nema statistički značajne razlike. U Tablici 12. su prikazane vrijednosti dobivene t - testom, a vrijednosti parametara t-testa su: $t = -7,833$, $df = 3$, $p = 0,004$, te možemo reći da je utvrđeno da ne postoji statistički značajna razlika u prvoj i drugoj godini mjerenja između SSNTD detektora.

Tablica 12. Rezultati dobiveni provođenjem t – testa između prve i druge godine mjerenja koncentracije radona SSNTD detektorima. [27]

	Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)
	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference				
				Lower	Upper			
Pair 1 godina_mjerenja_1 - godina_mjerenja_2	-18.750	4.787	2.394	-26.367	-11.133	-7.833	3	.004

U sljedećoj statističkoj analizi testirane su razlike koncentracija radona u podrumu (etaža - 1) i na drugom katu (etaža 2). Korišten je t – test za male nezavisne uzorke, te je postavljena nul-hipoteza da postoji statistički značajna razlika u koncentracijama radona između najniže i najviše etaže stambenog objekta. Vrijednosti parametara t – testa su: $t_{-1} = 3,535$, $df_{-1} = 26$, $p = 0,002$, $t_2 = 3,535$, $df_2 = 26$, $p = 0,002$, gdje t_{-1} predstavlja rezultate t – testa dobivene za podrum (etažu - 1), a t_2 predstavlja rezultate t – testa dobivene za drugi kat (etaža 2). Iz dobivenih rezultata možemo zaključiti da postoji statistički značajna razlika između koncentracije radona u podrumu i koncentracije radona na drugom katu, čime je prihvaćena pretpostavljena nul-hipoteza. Nadalje, u Tablici 13. prikazani su dobiveni rezultati nakon testiranja postavljene hipoteze. Ova hipoteza testirana je da bi se pokazalo postoji li statistički značajna razlika u koncentracijama radona izmjerenim SSNTD detektorima između najniže i najviše etaže stambenog prostora. Radon je teži od zraka zbog čega se akumulira u većim koncentracijama u nižim etažama stambenih objekata, nego što se pojavljuje u višim etažama stambenih objekata, a ovom statističkom analizom je to i dokazano.

Tablica 13. Rezultati dobiveni provođenjem t – testa između koncentracije radona u podrumu i koncentracije radona na drugom katu. [27]

		Independent Samples Test								
		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
								Lower	Upper	
koncentracija	Equal variances assumed	.465	.501	3.535	26	.002	20.214	5.719	8.460	31.969
	Equal variances not assumed			3.535	25.509	.002	20.214	5.719	8.449	31.980

Kako bi se naglasila važnost trajanja vremenskog intervala izlaganja detektora u svrhu preciznog određivanja efektivne doze zračenja od radona i njegovih kratkoživućih potomaka, a zbog njegove snažne sezonske varijabilnosti, postavljena je nul-hipoteza da je vremenski interval od 3 mjeseca dovoljan period izlaganja SSNTD detektora za točnu procjenu godišnje efektivne doze zračenja od radona i njegovih potomaka. Proveden je t – test između svih detektora na svim etažama koji su bili izloženi u vremenskom intervalu od 3 mjeseca i svih detektora koji su bili izloženi na svim etažama u vremenskom intervalu od 12 mjeseci. U Tablici 14. prikazani su dobiveni parametri t – testa: $t = 1,032$, $df = 7$, $p = 0,337$ gdje je očigledno da je vrijednost parametra $p > 0,05$ te se odbacuje postavljena nul-hipoteza i prihvaća alternativna hipoteza da vremenski interval od 3 mjeseca nije reprezentativan period izlaganja SSNTD detektora za procjenu godišnje efektivne doze zračenja od radona i njegovih potomaka.

Tablica 14. Rezultati dobiveni provođenjem t – testa da je vremenski interval od 3 mjeseca dovoljan period izlaganja SSNTD detektora za točnu procjenu godišnje efektivne doze zračenja od radona i njegovih potomaka. [27]

		Paired Differences							
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference		t	df	Sig. (2-tailed)
					Lower	Upper			
Pair 1	koncentracija_3_mjeseca - koncentracija_12_mjeseci	8.875	24.334	8.603	-11.468	29.218	1.032	7	.337

Kako je u prošlom testiranju (Tablica 14.) provjerena i odbačena hipoteza da je vremenski interval od 3 mjeseca dovoljan period izlaganja SSNTD detektora za točnu procjenu godišnje efektivne doze zračenja od radona i njegovih potomaka, napravljeno je još jedno testiranje u kojem je postavljena nul-hipoteza da je vremenski interval od 6 mjeseci dovoljan period izlaganja SSNTD detektora za točnu procjenu godišnje efektivne doze zračenja od radona i njegovih potomaka, za dodatnu provjeru utjecaja njegove snažne sezonske varijabilnosti. Ta je nul-hipoteza provjerena pomoću t – testa te su dobiveni sljedeći rezultati prikazani u Tablici 15.: $t = -0,388$, $df = 7$, $p = 0,710$, gdje je lako uočljivo kako je vrijednost parametra $p > 0,05$. Zbog te činjenice postavljenu nul-hipotezu odbacujemo i prihvaćamo alternativnu hipotezu, te zaključujemo da vremenski interval od 6 mjeseci nije dovoljan period izlaganja SSNTD detektora za točnu procjenu godišnje efektivne doze zračenja od radona i njegovih potomaka.

Tablica 15. Rezultati dobiveni provođenjem t – testa da je vremenski interval od 6 mjeseci dovoljan period izlaganja SSNTD detektora za točnu procjenu godišnje efektivne doze zračenja od radona i njegovih potomaka. [27]

Paired Samples Test

	Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)
	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference				
				Lower	Upper			
Pair 1 koncentracija_6_mjeseci - koncentracija_12_mjeseci	-2.875	20.979	7.417	-20.414	14.664	-.388	7	.710

Kako su mjerenja provedena dvama vrstama detektora, određena je korelacija između efektivne doze izmjerene SSNTD detektorima i ukupne ambijentalne doze H*(10) izmjerene TL dozimetrima. Pri određivanju korelacije, uzeti su samo oni SSNTD detektori i TL dozimetri koji su izlagani istovremeno. Ti su detektori izmjenjivani svaka tri mjeseca u vremenskom intervalu od 15 mjeseci. Postavljena je nul-hipoteza da postoji korelacija između dvije vrste detektora izlaganih u istim vremenskim intervalima tijekom 15 mjeseci. Koristeći Pearsonov koeficijent korelacije između mjerenja ostvarenih SSNTD detektorima i TL dozimetrima utvrđena je statistički značajna povezanost između doza izmjerenih SSNTD detektorima i TL dozimetrima u iznosu $r = -0,449$, $p = 0,047$. U Tablici 16. prikazani su dobiveni rezultati korelacije između SSNTD detektora i TL dozimetara. Iz dobivenih parametara korelacije može se zaključiti da postoji statistički značajna povezanost između izmjerenih doza zračenja dvama vrstama detektora izlaganih u istim vremenskim intervalima tijekom 15 mjeseci.

Tablica 16. Rezultati dobiveni provođenjem Pearsonovog testa korelacije između SSNTD detektora i TL dozimetara. [27]

Correlations			
		DET_SSNTD	DET_TLD
DET_SSNTD	Pearson Correlation	1	-.449*
	Sig. (2-tailed)		.047
	N	20	20
DET_TLD	Pearson Correlation	-.449*	1
	Sig. (2-tailed)	.047	
	N	20	20

*. Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

U sljedećoj statističkoj analizi u obzir su uzete samo ukupne ambijentalne doze H*(10) izmjerene TL dozimetrima u podrumu (etaža -1) i u prizemlju (etaža 0). Postavljena je nul-hipoteza koja govori o tome da postoji statistički značajna razlika između ambijentalne doze u podrumu i ambijentalne doze u prizemlju. Rezultati provedenog t – testa prikazani su u Tablici 17. i iznose: $t = -2,522$, $df = 8$, $p = 0,036$. Iz dobivenih rezultata može se donijeti zaključak da je utvrđena statistički značajna razlika u dozama izmjerenim TL dozimetrima u podrumu i prizemlju, čime prihvaćamo postavljenu nul-hipotezu.

Tablica 17. Rezultati dobiveni provođenjem t – testa između ambijentalnih doza TL dozimetara izmjerenih u podrumu i prizemlju. [27]

Independent Samples Test										
		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
doza	Equal variances assumed	.020	.891	-2.522	8	.036	-.06180	.02450	-.11830	-.00530
	Equal variances not assumed			-2.522	7.814	.036	-.06180	.02450	-.11854	-.00506

Nadalje, promatrano je postoji li statistički značajna razlika između doza izmjerenih TL dozimetrima na prizemlju (etaža 0) i prvom katu (etaža 1). Postavljena je nul-hipoteza da postoji statistički značajna razlika između ambijentalnih doza izmjerenih TL dozimetrima na prizemlju i prvom katu. Primjenom t – testa, pokazano je da ne postoji statistički značajna razlika između ambijentalnih doza izmjerenih na prizemlju i prvom katu. Vrijednosti parametara provedenog t – testa su sljedeće: $t = 1,519$, $df = 8$, $p = 0,167$. Iz dobivene vrijednosti parametra p (jer je veći od 0,05) evidentno je da treba odbaciti pretpostavljenu nul-hipotezu i zaključiti da postoji statistički značajna razlika u ambijentalnim dozama izmjerenim TL dozimetrima na prizemlju i prvom katu. U Tablici 18. prikazani su rezultati provedenog t – testa ukupnih ambijentalnih doza TL dozimetara na prizemlju i prvom katu.

Tablica 18. Rezultati dobiveni provođenjem t – testa između ambijentalnih doza TL dozimetara izmjerenih u prizemlju i prvom katu. [27]

Independent Samples Test										
		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
doza	Equal variances assumed	1.700	.229	1.519	8	.167	.06672	.04392	-.03456	.16800
	Equal variances not assumed			1.519	5.185	.187	.06672	.04392	-.04498	.17842

Nadalje, provjereno je postoji li statistički značajna razlika u ukupnim ambijentalnim dozama mjerenim TL dozimetrima između prvog (etaža 1) i drugog (etaža 2) kata. Postavljena je nul-hipoteza da postoji statistički značajna razlika u ukupnim ambijentalnim dozama mjerenim TL dozimetrima između prvog i drugog kata. Rezultati provedenog t – testa su: $t = -1,847$, $df = 8$, $p = 0,102$. Iz dobivenih rezultata testiranja, možemo zaključiti da između ukupnih ambijentalnih doza izmjerenih na prvom i drugom katu ne postoji statistički značajna razlika, čime se odbacuje nul-hipoteza. Time prihvaćamo alternativnu hipotezu koja govori da ne postoji statistički značajna razlika u ukupnim ambijentalnim dozama mjerenim TL dozimetrima na prvom i drugom katu stambenog objekta. U Tablici 19. prikazani su rezultati prethodno opisanog t – testa između ukupnih ambijentalnih doza TL dozimetara na prvom i drugom katu.

Tablica 19. Rezultati dobiveni provođenjem t – testa između ambijentalnih doza TL dozimetara izmjerenih na prvom i drugom katu. [27]

		Independent Samples Test								
		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
doza	Equal variances assumed	.679	.434	-1.847	8	.102	-.08572	.04640	-.19272	.02128
	Equal variances not assumed			-1.847	6.111	.113	-.08572	.04640	-.19876	.02732

U konačnici, postavljena je nul-hipoteza kako postoji statistički značajna razlika između ukupne ambijentalne doze mjerene TL dozimetrima u podrumu i na drugom katu. Provođenjem t – testa između najniže i najviše etaže promatranog stambenog objekta, dobiveni su sljedeći rezultati: $t = -2,814$, $df = 8$, $p = 0,023$. Dobiveni rezultati upućuju na to da je utvrđena statistički značajna razlika u dozama izmjerenim u podrumu i na drugom katu. Prihvaćamo postavljenu nul-hipotezu koja govori da postoji statistički značajna razlika između ukupne ambijentalne doze mjerene TL dozimetrima u podrumu i na drugom katu stambenog objekta. U Tablici 20. prikazani su rezultati dobiveni provođenjem t – testa između ukupnih ambijentalnih doza TL dozimetara u podrumu i na drugom katu.

Tablica 20. Rezultati dobiveni provođenjem t – testa između ukupnih ambijentalnih doza TL dozimetara u podrumu i na drugom katu. [27]

Independent Samples Test										
		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
doza	Equal variances assumed	.799	.398	-2.814	8	.023	-.08080	.02871	-.14701	-.01459
	Equal variances not assumed			-2.814	7.802	.023	-.08080	.02871	-.14731	-.01429

7. ZAKLJUČAK

U ovom diplomskom radu provedene su dvije vrste mjerenja: mjerenje koncentracije radona po vertikali stambene zgrade, odnosno efektivne doze od radona i njegovih kratkoživućih potomaka koristeći SSNTD detektore te mjerenje ukupne ambijentalne doze zračenja TL dozimetrima.

Mjerenje SSNTD detektorima provođeno je pune dvije godine. Utvrđeno je da između dvije uzastopne godine mjerenja SSNTD detektorima nema statistički značajne razlike u izmjerenoj koncentraciji radona. Taj rezultat je očekivan zbog toga što je prosječna koncentracija radona u vremenskom intervalu od jedne godine karakteristična za danu lokaciju. Na Slici 23. prikazane su koncentracije radona na sve četiri etaže kroz dvije godine mjerenja u intervalima po tri, šest i dvanaest mjeseci. Ukoliko se gledaju godišnje koncentracije radona na svakoj etaži kroz dvije godine mjerenja (Slika 23.), lako je uočljivo da su izmjerene koncentracije radona izlaganjem detektora u vremenskim intervalima od godinu dana podjednake, te da su mjerne nesigurnosti takvih mjerenja najmanje. Zbog te činjenice i dalje se inzistira na jednogodišnjem izlaganju radonskih detektora, a zbog njegove snažne sezonske varijabilnosti.

Napravljena je usporedba koncentracije radona mjerene SSNTD detektorima u podrumu i drugom katu. Utvrđeno je da postoji statistički značajna razlika u koncentracijama radona između najniže i najviše etaže stambenog objekta. Ovaj podatak je značajan jer pokazuje da se radon (zbog činjenice da je teži od zraka) akumulira u većim koncentracijama u etažama koje su bliže zemlji, dok su manje koncentracije radona na višim etažama stambenog objekta. Na Slici 19. prikazana je izmjerena koncentracija radona kroz cijeli dvogodišnji period mjerenja SSNTD detektorima u podrumu, dok je na Slici 22. prikazana izmjerena koncentracija radona kroz cijeli dvogodišnji period mjerenja SSNTD detektorima na drugom katu. Vrlo se lako uočava razlika u koncentraciji radona – u podrumu prosječna koncentracija radona uz pripadajuću standardnu devijaciju iznosi $(55 \pm 16) \text{ Bq m}^{-3}$, dok je na drugom katu prosječna koncentracija radona uz pripadajuću standardnu devijaciju $(35 \pm 14) \text{ Bq m}^{-3}$. Iz svih tih podataka evidentno je kako se koncentracija radona mijenja ovisno o etaži stambenog objekta, ali i o životnim navikama ljudi. Na Slici 22. može se vrlo jednostavno uočiti da je zadnji period mjerenja od 3 mjeseca SSNTD detektor izmjerio veću koncentraciju radona nego do tada. Razlog tome je teška bolest, a potom i smrtni slučaj osobe koja je živjela na toj etaži u zadnjem periodu mjerenja od 3 mjeseca. Kako nitko u tom vremenskom razdoblju nije živio u stanu,

izmjerena je viša koncentracija radona iz razloga što stan nije provjetravan. Nitko nije boravio u stanu te je sama promjena dinamike života stanara utjecala na promjenu izmjerene koncentracije radona.

Da bi se pokazalo da je za procjenu točne efektivne doze zračenja od radona i njegovih potomaka bitna duljina vremenskog perioda izlaganja SSNTD detektora, a zbog njegove snažne sezonske varijabilnosti, potvrđena je hipoteza da vremenski interval od 3 mjeseca nije reprezentativan period izlaganja SSNTD detektora za preciznu procjenu godišnje efektivne doze zračenja od radona i njegovih potomaka. Također je potvrđena hipoteza da niti vremenski interval od 6 mjeseci nije reprezentativan period izlaganja SSNTD detektora za točnu procjenu godišnje efektivne doze zračenja od radona i njegovih potomaka bez adekvatno primijenjenih sezonskih korektivnih faktora.

Rezultati mjerenja i primijenjenih statističkih testova pokazuju da se koncentracija radona mijenja tijekom vremena, ovisno o godišnjim dobima i navikama ljudi (stanara) promatranog stambenog objekta (zimi se manje provjetravaju prostorije, više se grije, dok je ljeti obrnuto). Kako bi što preciznije odredili godišnju efektivnu dozu od radona i njegovih kratkoživućih potomaka, nužno je da se SSNTD detektor izlaže u vremenskom periodu od godinu dana kako bi utjecaj svih čimbenika mogao biti uključen u mjerenje, pa i na sam rezultat mjerenja. Kraći vremenski period mjerenja moguć je uz primjenu odgovarajućih sezonskih korektivnih faktora.

Kako su mjerenja provedena s dvama vrstama detektora, određena je korelacija između efektivne doze od radona i njegovih kratkoživućih potomaka izmjerene SSNTD detektorima i ukupne ambijentalne doze izmjerene TL dozimetrima. Bitno je napomenuti da SSNTD detektori mjere koncentraciju radona u zraku, dok TL dozimetri mjere fotonsko zračenje. Iako te dvije vrste detektora mjere ionizirajuće zračenje, ali ne i istu vrstu zračenja, očekivano je da postoji korelacija između dobivenih doza zračenja ako su detektori izlagani na istim lokacijama u istim vremenskim intervalima. Prema Pearsonovom koeficijentu korelacije utvrđena je statistički značajna povezanost između efektivnih doza izmjerenih SSNTD detektorima i ambijentalnih doza izmjerenih TL dozimetrima. Dobiveni rezultat je očekivan iz razloga što oba detektora mjere ionizirajuće zračenje kroz isti vremenski period na istoj lokaciji.

U konačnici, promatrano je postoji li statistički značajna razlika između ukupnih ambijentalnih doza izmjerenih TL dozimetrima po etažama promatranog stambenog objekta. Utvrđena je statistički značajna razlika za ukupnu ambijentalnu dozu između podruma i

prizemlja, dok između prizemlja i prvog kata, te prvog kata i drugog kata ne postoji statistički značajna razlika u ukupnoj ambijentalnoj dozi. Statistički značajna razlika također postoji između podruma i drugog kata. Taj rezultat je očekivan isto kao i kod SSNTD detektora. Ako se koncentracija radona mjerena SSNTD detektorima između podruma i drugog kata postepeno smanjuje (kao i posljedična efektivna doza), onda se smanjuje i ambijentalna doza mjerena TL dozimetrima. Kako su mjerenja SSNTDDT i TL dozimetara u korelaciji, taj rezultat je više nego očekivan.

8. LITERATURA

[1] β^- raspad (https://hr.wikipedia.org/wiki/Beta_raspad)

[Dostupno 15.10.2019.]

[2] Tomasek L., Rogel, A., Tirmarche, M., Mitton, N., Laurier, D., (2008.) Lung cancer in French and Czech uranium miners; Radon – associated risk at low exposure rates and modifying effects of time since exposure and age at exposure.

[3] Detekcija i zaštita od zračenja (<http://www.nemis.hr/index.php/radioaktivnost/detekcija-i-zastita-od-zracenja.html>)

[Dostupno 23.09.2019.]

[4] Dresto Alač, B., Radioaktivnost, Predavanje iz fizike, Fakultet zdravstvenih studija, Sveučilište u Rijeci, Rijeka.

[5] Faj, Z., Pregled povijesti fizike, Drugo dopunjeno izdanje, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Pedagoški fakultet, Osijek, 1999.

[6] Ferri, GM., Intranuovo, G., Cavone, D., Corrado, V., Britolo, F., Tricase, P., Fuso, R., Vilardi, V., Sumerano, M., L'abbate, N., Vimercati, L. (2018.) Estimates of the Lung Cancer Cases Attributable to Radon in Municipalities of Two Apulia Provinces (Italy) and Assessment of Main Exposure Determinants.

[7] Franić, Z., (1993.) Ekvivalentna doza ili dozni ekvivalent? Zagreb, Republika Hrvatska. Institut za medicinska istraživanja i medicinu rada u Zagrebu.

[8] Gama zračenje (<https://hr.wikipedia.org/wiki/Gama-%C4%8Destica>)

[Dostupno 15.10.2019.]

[9] International Commission on Radiological Protection; General principles for the radiation protection of workers, ICRP Publication 75 (Oxford: Pergamon Press) (1997.)

[10] International Commission on Radiological Protection; 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 60 (Oxford: Pergamon Press) (1991.)

[11] International Commission on Radiological Protection; The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 103 (2007.)

[12] Izvori radona u kući (<https://www.quebec.ca/en/homes-and-housing/healthy-living-environment/residential-radon/>)

[Dostupno 15.10.2019.]

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

[14] Jović, M., (2014.) Predrasude i zablude studenata Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku o zračenju. Diplomski rad. Osijek, Republika Hrvatska: Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Odjel za fiziku, Osijek.

[15] Jurišić, D., (2010.) Mjerenje radona u Virovitičko – podravskoj županiji. Diplomski rad. Osijek, Republika Hrvatska: Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Odjel za matematiku, Osijek.

[16] Lane, RSD., Tomášek, L., Zablotska, LB., Rage, E., Momoli, F., Little J. (2019.) Low radon exposures and lung cancer risk: joint analysis of the Czech, French, and Beaverlodge cohorts of uranium miners.

[17] Miklavčić, I., (2015.) Mjerenje radona: Priprema za vježbu kolegija Viši fizikalni praktikum. Diplomski studij fizike, smjer fizika i informatika, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Odjel za fiziku.

[18] Mostečak, A., Perković, D., Kapor, F., Veinović, Ž., (2018.) Radon mapping in Croatia and its relation to geology.

[19] Neri, A., McNaughton, C., Momin, B., Puckett, M., Gallaway, M.S., (2018.) Measuring public knowledge, attitudes, and behaviors related to radon to inform control activities and practices.

[20] O radonu (<http://radon.dzrns.hr/o-radonu/>)

[Dostupno 23.09.2019.]

[21] Radioaktivnosti (<https://radioaktivniotpad.org/radioaktivnost/>)

[Dostupno 23.09.2019.]

[22] Radolić, V., (2000.) Mjerenje radona i radonovih potomaka u zraku pri različitim koncentracijama aerosola, Magistarski rad, PDM, Zagreb.

- [23] Radolić, V., Miklavčić, I., Stanić, D., Poje Sovilj, M., Krpan, I., Mužević, M., Vuković, B., (2015.) Koncentracije radona u kućama, školama i vrtićima u Istarskoj županiji.
- [24] Radolić, V., Stanić, D., Poje Sovilj, M., Miklavčić, I., (2019.) Dnevne varijacije radona u nekim školama i vrtićima Istarske županije u kojima je prosječna koncentracija radona viša od referentne vrijednosti – implikacije na procjenu primljene doze, Zbornik radova Dvanaestog simpozija Hrvatskog društva za zaštitu od zračenja, Eds. Popić, J., Coha, I., Krajcar Bronić, I., Knežević Medija, Ž., Zagreb 2019. godina. Str. 283 - 286.
- [25] Pavlačić, A., (2018.) Usporedba metoda mjerenja koncentracije aktivnosti radona u vodi, Diplomski rad, Osijek, Republika Hrvatska: Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera, Odjel za fiziku, Osijek.
- [26] Poje, M., (2012.) Detekcija neutrona u atmosferi. Doktorski rad. Osijek, Republika Hrvatska: Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno matematički fakultet, Poslijediplomski studij prirodnih znanosti, Fizika.
- [27] SPSS Statistics Software, Version 23, IBM Statistical Package for the Social Sciences.
- [28] Surić Mihić, M., (2012.) Vremenski razlučiva osobna dozimetrija rendgenskog zračenja vrlo niskih doza. Doktorski rad. Zagreb, Republika Hrvatska, Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno matematički fakultet, Poslijediplomski studij prirodnih znanosti, Fizika.
- [29] Tkalec Verčić, A., Sinčić Ćorić, D., Pološki Vokić, N., (2014.) Priručnik za metodologiju istraživanja u društvenim djelatnostima, M.E.P. d.o.o. Zagreb 2014., II.izdanje
- [30] Type test Data for Panasonic UD-802AT Dosimeter in Pouch Holder, TLD Systems Group, Radiation Instruments Department, Panasonic Industrial Europe (UK) (2011.).
- [31] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), Sources and Effects of Ionising radiation. Volume I: Sources. UNSCEAR 2008. Report to the General Assembly with scientific annexes. New York: United Nations, 2010.
- [32] Uranijev raspadni niz (<https://glossary.periodni.com/glosar.php?hr=radioactive+series>)
- [Dostupno 15.10.2019.]

9. ŽIVOTOPIS

Matea Koščak rođena je 22. prosinca 1993. godine u Osijeku. Završila je osnovnu školu „August Harambašić“ u Donjem Miholjcu, te 2008. godine upisuje Opću gimnaziju u Donjem Miholjcu. Nakon završetka gimnazije, akademske godine 2012./2013. upisuje preddiplomski studij fizike na Odjelu za fiziku Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku. Preddiplomski studij završava 2014./2015. godine te dobiva titulu prvostupnice fizike. Akademske godine 2015./2016. upisuje diplomski studij fizike i informatike na Odjelu za fiziku Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku. U slobodno vrijeme bavi se volontiranjem u gradskom društvu Crvenog križa Osijek te raznim sportskim aktivnostima.