

# Raspodjela ambijentalnog doznog ekvivalenta u Donjem Miholjcu

---

Juraneck, Martina

Master's thesis / Diplomski rad

2018

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:160:510284>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-09-28**



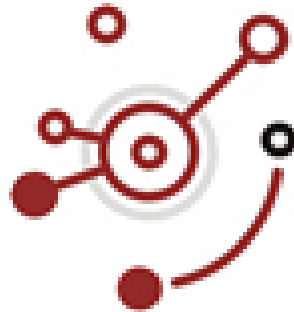
Repository / Repozitorij:

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



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU**

**ODJEL ZA FIZIKU**



**MARTINA JURANEK**

**RASPODJELA AMBIJENTALNOG DOZNOG  
EKVIVALENTA U DONJEM MIHOLJCU**

**Diplomski rad**

Osijek, 2018.

**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU**

**ODJEL ZA FIZIKU**



**MARTINA JURANEK**

**RASPODJELA AMBIJENTALNOG DOZNOG  
EKVIVALENTA U DONJEM MIHOLJCU**

**Diplomski rad**

Predložen Odjelu za fiziku Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku radi  
stjecanja akademskog naziva magistra edukacije fizike i informatike

Osijek, 2018.

Ovaj diplomski rad izrađen je u Donjem Miholjcu pod mentorstvom doc. dr. sc. Branka Petrinca u sklopu Sveučilišnog diplomskog studija fizike i informatike na Odjelu za fiziku Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku.

### **Zahvale**

*Zahvaljujem se Institutu za medicinska istraživanja i medicinu rada, Jedinici za zaštitu od zračenja, na dodjeli mjernog instrumenta na privremeno korištenje u svrhu prikupljanja mjernih podataka. Također se zahvaljujem Državnom hidrometeorološkom zavodu na danoj arhivi potrebnih meteoroloških podataka. Posebno se želim zahvaliti svome mentoru doc.dr.sc. Branku Petrincu, koji mi je svojim stručnim i korisnim savjetima pomogao u izradi ovog diplomskog rada, te predavaču Igoru Miklavčiću na izradi potrebne karte za ovaj diplomski rad.*

# Sadržaj

1. Uvod .....	1
2. Teorijski dio .....	2
2. 1. Zračenje .....	2
2. 2. Radionuklidi i radioaktivni raspadi .....	3
2. 2. 2. Ionizirajuće i neionizirajuće zračenje .....	5
2. 3. Vrste radioaktivnog raspada .....	6
2. 3. 1. Izvori i primjena u radioaktivnog zračenja u medicini .....	7
2. 3. 2. Rendgenski uređaji u medicini .....	9
2. 4. Utjecaj ionizirajućeg zračenja na čovjeka .....	12
2. 4. 1. Biološki efekti ionizirajućeg zračenja .....	12
2. 5. Prirodni izvori ionizirajućeg zračenja .....	18
2. 6. Umjetni izvori zračenja i njihova primjena .....	24
2. 7. Dozimetrija zračenja .....	25
2. 7. 1. Zaštitne dozimetrijske veličine .....	27
2. 7. 1. 1. Apsorbirana doza .....	27
2. 7. 1. 2. Ekvivalentna doza .....	28
2. 7. 1. 3. Efektivna doza .....	29
2. 7. 3. 1. Ambijentalni dozni ekvivalent .....	35
2. 7. 3. 2. Dozni ekvivalent smjera .....	36
2. 7. 3. 3. Osobni dozni ekvivalent .....	36
2. 8. Propisane granične vrijednosti primljene doze zračenja .....	37
2. 9. Mjere zaštite od zračenja .....	38
2. 10. Uređaji za mjerenje zračenja .....	39
2. 10. 1. Plinski brojači .....	39
2. 10. 2. Scintilacijski .....	40
2. 10. 3. Poluvodički .....	41
2. 10. 4. Neutronske detektori .....	43
3. Mjerenje brzine ambijentalnog doznog ekvivalenta u Donjem Miholjcu .....	44
3. 1. Korišteni instrumenti i aplikacije .....	44
3. 1. 1. RDS-31 S/R <i>Multi-Purpose Survey Meter</i> .....	45
3. 1. 2. CSW-31 .....	47
3. 1. 3. ArcGis .....	48
3. 1. 4. GPS Coordinates .....	49

3. 1. 5. Priprema mjernog uređaja RDS-31 .....	49
3. 2. Prikupljanje podataka .....	50
3. 3. Obrada podataka .....	51
3. 4. Analiza rezultata, rasprava i zaključak .....	53
4. Zaključak.....	59
Literatura .....	60
Životopis .....	64

## **RASPODJELA AMBIJENTALNOG DOZNOG EKVIVALENTA U DONJEM MIHOLJCU**

**MARTINA JURANEK**

### **Sažetak**

U teorijskom dijelu diplomskog rada opisani su temeljni pojmovi iz područja radioekologije, a ti pojmovi uključuju definiciju zračenja, navođenje dozimetrijskih veličina i uređaja za mjerenje. Nakon toga prikazana je metodologija mjerenja brzine ambijentalnog doznog ekvivalenta na području Donjeg Miholjca koja su provedena tijekom lipnja i srpnja 2017. godine. Cilj mjerenja bio je ispitivanje potencijalnog utjecaja ozračenja na stanovništvo Donjeg Miholjca. Grafički prikaz dobivenih rezultata prikazan je pomoću web GIS aplikacije koja na temelju zadanih parametara identificira položajne podatke. Rezultati istraživanja pokazali su da meteorološki parametri nemaju bitan utjecaj na brzinu ambijentalnog doznog ekvivalenta na području Donjeg Miholjca.

**Rad je pohranjen u knjižnici Odjela za fiziku**

**Ključne riječi:** brzina ambijentalnog doznog ekvivalenta, dozimetrijske veličine, ozračenje, stanovništva, web GIS aplikacija, zračenje

**Mentor:** doc. dr. sc. Branko Petrinec

**Ocjenjivači:**

**Rad prihvaćen:**

**DISTRIBUTION OF AMBIENT DOSE EQUIVALENT  
IN THE DONJI MIHOLJAC**

**MARTINA JURANEK**

**Abstract**

In the theoretical part of the thesis, the basic concepts in the field of radioecology are described and these concepts include the definition of radiation, the naming of dosimetric sizes and measuring devices. Thereafter, a methodology for measuring the velocity of the ambient dose equivalent in the area of Donji Miholjac was presented, which was carried out during June and July 2017. The aim of the measurements was to examine the potential influence of irradiation on the population of Donji Miholjac. A graphical representation of the results obtained is displayed using a web GIS application that identifies placement data based on the default parameters. The results of the research have shown that meteorological parameters do not have a significant influence on the velocity of the ambient dose equivalent in the area of Donji Miholjac.

**Thesis deposited in Department of Physics library**

**Key words:** ambient dose rate equivalent, dosimetric quantities, radiation, radiation exposure of the population, web GIS application

**Supervisor:** Assistant Professor Branko Petrinc, PhD

**Reviewers:**

**Thesis accepted:**



# 1. Uvod

Radionuklidi nestabilne su i radioaktivne jezgre atoma koje se spontano raspadaju i u tom procesu emitiraju zračenje koje može biti alfa-zračenje, beta-zračenje ili gama-zračenje. Oni se nalaze u čovjekovu okolišu te ih se može pronaći u zraku, vodi i tlu. Pojedini radionuklidi nastali su prije nastanka Sunčeva sustava. Prema porijeklu, zračenja i radionuklidi dijele se na zračenja i radionuklide nastale u prirodi (prirodno porijeklo) i na one nastale pod utjecajem čovjeka (umjetno porijeklo).

Iako zračenja i radionuklidi nastali pod djelovanjem čovjeka u suvremenom društvu imaju brojne korisne primjene, za čovjeka su oni još uvijek dosta štetni jer čovjekovo tijelo nema razvijeno osjetilo za detekciju ionizirajućeg zračenja. To dovodi do učestalog zanemarivanja mogućih posljedica prekomjerne izloženosti ionizirajućem zračenju.

Posljedično je došlo do razvoja potrebe za ispitivanjem i praćenjem prisutnosti različitih izvora zračenja u čovjekovoj okolini. Nadgledanje zračenja u okolišu podrazumijeva kontinuirano ispitivanje i praćenje kontaminacije radionuklidima u okolišu. Nadgledanje se provodi da bi se detektirale promjene u dugoročnim trendovima u koncentracijama aktivnosti ili brzinama ambijentalnog doznog ekvivalenta u okolišu. Na taj se način prate potencijalno opasni radionuklidi. Ovim se postupkom dobivaju podatci koji se koriste za analizu i evaluaciju kontaminacije okoliša.

U ovom se radu ispitalo kako meteorološki parametri utječu na brzinu ambijentalnog doznog ekvivalenta na području Donjeg Miholjca, odnosno mijenja li se brzina ambijentalnog doznog ekvivalenta s promjenom meteoroloških parametara. Nakon uvoda prikazana je teorijska podloga provedenom istraživanju s ciljem upoznavanja čitatelja s glavnim pojmovima iz područja zračenja i zaštite od zračenja. Drugi dio rada opisuje metodologiju mjerenja brzine ambijentalnog doznog ekvivalenta s ciljem procjene mogućeg ozračenja stanovništva Donjeg Miholjca. Na temelju dobivenih rezultata napisan je zaključak.

## 2. Teorijski dio

### 2. 1. Zračenje

Radioaktivnost je pojava ionizirajućeg zračenja u obliku brzih čestica ili fotona visokih energija koja nastaje pri raspadanju radionuklida tj. atoma s nestabilnim atomskim jezgrama [1]. Zračenje označava prijenos energije elektromagnetskim valovima bez posredovanja materije i na daljinu. Brzina širenja elektromagnetskih valova ( $c$ ), valna dužina ( $\lambda$ ) i frekvencija ( $f$ ) povezane su relacijom  $c = \lambda f$ . Zračenje ima dvojnu prirodu: korpuskularnu i valnu te su ove prirode zračenja povezane s nastankom zračenja [2].

Elektromagnetska zračenja valovi su energije s električkim i magnetskim svojstvima, a nastaju vibracijom i akceleracijom električnih naboja. Spektar elektromagnetskih valova proteže se od valova ekstremno visoke frekvencije i kratke valne dužine do valova ekstremno niske frekvencije ( $f$ ) i velike valne dužine ( $\lambda$ ). U smjeru smanjenja frekvencije spektar sadrži gama-zrake, rendgenske zrake, ultraljubičaste zrake (UV), svjetlosne zrake, infracrvene zrake (IR), mikrovalove i radiovalove.

Svi valovi šire se kroz vakuum jednakom brzinom od  $c = 299\,792\,458\text{ m/s}$ . Prolaskom kroz različita sredstva mijenjaju se brzina i valna duljina, a frekvencija ostaje konstantna, odnosno ona je u skladu s relacijom. Nadalje, svi pokazuju tipična svojstva valnog gibanja, uključujući difrakciju i interferenciju. To se posebno odnosi na toplinsko zračenje,  $0,1\text{ mm} < \lambda < 400\text{ mm}$ , čiji manji dio čini vidljiv spektar, dok veći dio pripada infracrvenom spektru.

Visokofrekventno kratkovalno zračenje povezano je s velikom energijom. Da bi nastalo takvo zračenje, mora doći do promjene u jezgri ili u elektronima unutarnje ljuske atoma. Primjerice, uzroci mogu biti:

- prelazak elektrona iz ljuske veće u ljusku manje energije dok se pritom oslobodena energija pretvara u fotone,
- raspad jezgre,

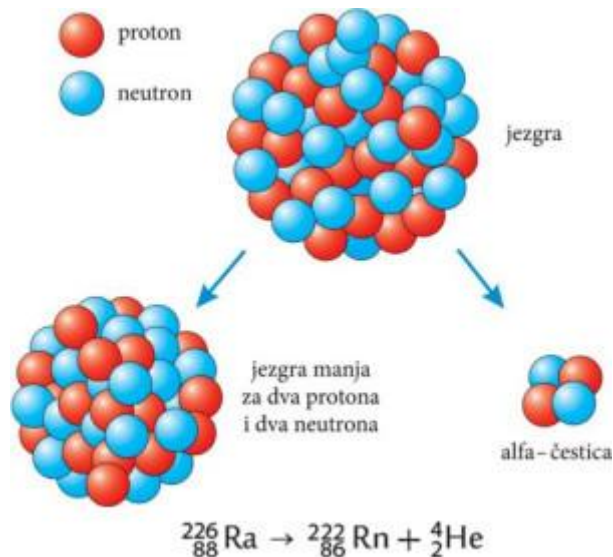
- bombardiranje jezgre neutronima ili elektronima dovodi do promjene u jezgri,
- oscilacija i akceleracija nabijenih čestica dovodi do promjene u elektronima.

Priroda je navedenog zračenja korpuskularna jer se temelji na česticama, fotonima koji imaju dvojni prirodu. U navedenu se skupinu ubrajaju kozmičke i rendgenske zrake koje su jako prodorne. Dugovalno zračenje koje nastaje promjenom električnog potencijala (primjerice, antene TV i radio stanica) također prolazi kroz materijale. Suprotno navedenom, vidljivi je spektar slabo prodoran, a izuzetak su neke kapljevine, primjerice voda te plastika i stakla. Navedeni spektar zahvaća područje valnih duljina od 0,38  $\mu\text{m}$  do 0,76  $\mu\text{m}$  te čini podgrupu šireg pojasa valnih dužina koje pripadaju toplinskom zračenju, 0,1  $\mu\text{m}$  do 400  $\mu\text{m}$  [2].

Spektar elektromagnetskog zračenja podijeljen je prema načinu nastanka zračenja ili nekim karakterističnim osobinama. Svi oblici imaju istu brzinu širenja u vakuumu, ali se razlikuju po valnim dužinama i izvoru zračenja. Nadalje, svi oblici zračenja proizvode toplinu kada su apsorbirani u nekom tijelu [2].

## 2. 2. Radionuklidi i radioaktivni raspadi

Radionuklidi nestabilne su radioaktivne jezgre atoma koje se spontano raspadaju i pritom emitiraju ionizirajuće zračenje koje može biti alfa-zračenje, beta-zračenje ili gama-zračenje. U prirodi postoji oko 1500 radionuklida, umjetno je proizvedeno još 800 radionuklida, a tržišno ih je dostupno pedesetak. Vrijeme poluraspada radionuklida dinamična je veličina. To znači da se ne može predvidjeti kada će se pojedini atom raspasti, no od brojnih atoma svake vrste radionuklida u jedinici vremena uvijek se raspadne isti postotak [3]. Spontana promjena nestabilnih jezgri naziva se radioaktivnim raspadom [4]. Prema zakonu radioaktivnog raspada, ako je u početku bilo  $N_0$  određenih radionuklida, vremena poluraspada  $T$ , tada će broj radionuklida nakon vremena  $t$  biti  $N = N_0 2^{-t/T}$  [3].



Slika 1: *Raspad atoma* [4]

### 2. 2. 1. Zakon radioaktivnog raspada

Zakon radioaktivnog raspadanja statistički opisuje koliko će se radioaktivnih atomskih jezgri raspasti u nekom uzorku radioaktivne tvari u određenom vremenskom intervalu. Broj raspadnutih jezgri ovisi o početnom broju radioaktivnih jezgri  $N_0$ , promatranom vremenu raspadanja  $t$  i vremenu poluraspada  $T_{1/2}$  [5].

Vrijeme poluraspada  $T_{1/2}$  radioaktivnog izotopa vrijeme je potrebno da se raspadne pola početne količine izotopa. Konstanta raspada  $\lambda$  određena je izrazom

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

Zakon je radioaktivnog raspada:

$$N = N_0 e^{-\lambda t} = N_0 2^{\frac{-t}{T_{1/2}}} = N_0 e^{\frac{-0,693t}{T_{1/2}}} \quad (2)$$

gdje je  $N_0$  broj jezgri u početnom trenutku  $t = 0$ , a  $N$  broj jezgri koje se još nisu raspale u trenutku  $t$ .

Aktivnost je uzorka s  $N$  jezgri, konstante raspada  $\lambda$  jednaka:

$$A = \lambda N \quad (3)$$

Jedinica je za aktivnost becquerel, a oznaka je jedinice Bq.  $Bq = s^{-1}$  [6].

## 2. 2. 2. Ionizirajuće i neionizirajuće zračenje

Zračenje je energija u obliku valova ili čestica. Ono se može podijeliti u dvije glavne skupine, a to su ionizirajuće i neionizirajuće zračenje.

Zračenje koje nosi dovoljno energije za razbijanje kemijskih veza i stvaranje iona naziva se ionizirajuće zračenje. Oštećivanje DNA može dovesti do pojave raka ili nekog drugog štetnog učinka na zdravlje, a ako se prenese, dovodi do mutacije. Ionizirajuće zračenje može biti u obliku čestica, kao što su alfa-čestice i neutroni ili u obliku zraka, kao što su gama-zrake i rendgenske zrake.

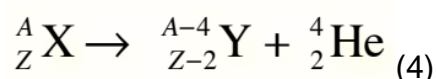
Svaki je čovjek izložen različitim količinama ionizirajućeg zračenja iz više izvora. To su prirodno (kozmičko i zemaljsko) i antropogeno; primjerice, medicinska primjena, atomska energija, zračenje od ispitivanja nuklearnog oružja u prošlosti i dr. Ionizirajuće zračenje koristi se za dijagnosticiranje i liječenje bolesti, a osobna razina izloženosti ionizirajućem zračenju ovisi o različitim aspektima života, primjerice, o mjestu stanovanja, o tome je li osoba bila zračena u nekom medicinskom postupku, o tome je li osoba zračenju izložena na radnom mjestu i sl. [9].

Neionizirajuće zračenje nema dovoljno energije za oštećivanje, no prenosi energiju na tkiva ili materijale, primjerice, zagrijavanjem. Neionizirajuće zračenje sastoji se od električnih i magnetskih polja. Treba napomenuti da neionizirajuće zračenje ima manju energiju od ionizirajućeg zračenja, a primjeri su neionizirajućeg zračenja vidljiva svjetlost, infracrveno zračenje, radiovalovi, mikrovalno zračenje i Sunčeva svjetlost [10].

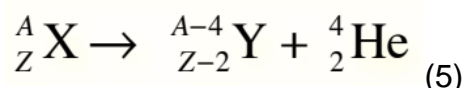
Energija je ionizirajućeg zračenja tolika da može izbaciti elektrone iz atoma. Na taj način narušava neutralnost atoma te on potom postaje pozitivno nabijen. Na taj način električki nabijene molekule i atomi nazivaju se ionima. Ionizirajuće zračenje odnosi se na zračenje koje potječe od prirodnih i umjetnih izvora zračenja nastalih kao posljedica ljudske aktivnosti. Ono je potencijalna opasnost za žive organizme [10].

## 2. 3. Vrste radioaktivnog raspada

Najčešće su vrste radioaktivnog raspada alfa, beta i gama-raspad. Alfa( $\alpha$ )-raspad emitiranje je alfa-čestica, tj. jezgre atoma helija (2 protona i 2 neutrona). Zbog svoje relativno velike mase nije prodorno i u zraku ima domet svega nekoliko centimetara. Alfa-čestice može zaustaviti čak i list papira te zbog toga alfa radioaktivni izvori ne predstavljaju ozbiljne opasnosti u odnosu na vanjske radioaktivne izvore. Opasne su alfa-čestice koje dođu u čovjekovo tijelo (interna kontaminacija) jer alfa-čestica ima veliku snagu ionizacije [4]. Jezgra koja se raspada naziva se roditelj, a jezgra koja nastaje kći. Općenita reakcija za alfa-raspad ima oblik [7]:



Beta( $\beta$ )-raspad emitiranje je beta-čestica, tj. elektrona ili pozitrona. Beta-zračenje je prodornije od alfa-zračenja te u zraku ima domet od nekoliko metara, a zaustaviti ga može već tanki sloj aluminijske folije. Kao vanjski radioaktivni izvor može prouzročiti oštećenja na koži i očima [4]. Ima više vrsta ovog raspada:  $\beta^-$  (beta-minus),  $\beta^+$  (beta-plus) i "uhvat elektrona", a općenita je formula beta-raspada:



Gama( $\gamma$ )-radioaktivnost prijelaz je između stanja više pobuđenosti atomske jezgre u stanje niže pobuđenosti ili u osnovno stanje, a elektromagnetsko zračenje visoke frekvencije koje se pritom emitira naziva se gama-zračenje. To je ista vrsta zračenja kao i rendgensko zračenje, a razlika je samo po načinu nastanka. Gama-zračenje jako je prodorno zračenje. Gama-zračenje opasno je kao vanjski i unutarnji izvor zračenja [4]. Atomska jezgra prelazi iz pobuđenog u osnovno energijsko stanje i pritom se preostala energija oslobađa u obliku fotona  $\gamma$  gama-zračenja:



gdje je  ${}^A_ZX^*$  označeno pobuđeno stanje jezgre  ${}^A_ZX$ . Gama-zračenje nema utjecaj na atomski ili maseni broj radionuklida [8].

### 2. 3. 1. Izvori i primjena u radioaktivnog zračenja u medicini

Otkriće rendgenskih zraka smatra se jednim od najvažnijih datuma u razvoju fizike. S obzirom na to da su do tada bile nepoznate osobine navedenih zraka, označene su znakom x. Nakon toga se dokazalo da valna duljina ovih zraka pripadala spektru valnih duljina elektromagnetskog zračenja. Prema spomenutoj klasifikaciji elektromagnetsko zračenje nastaje uslijed ubrzavanja ili usporavanja električnih čestica [11].

K. W. Röntgen 1895. je godine, nakon sedam tjedana napornog rada, otkrio nevidljive zrake koje izazivaju fluorescenciju kad prolaze kroz materiju. Nakon daljnjeg istraživanja utvrdio je da je takve zrake u svojim istraživanjima već uočio Nikola Tesla, a proizveo ih je djelovanjem električnog polja visoke frekvencije. Röntgen je uočio veliku sličnost između nepoznatih zraka i vidljive svjetlosti. Nepoznate zrake širile su se u pravcima i bacale su oštre sjene, a na fotografskoj ploči izazivale su fluorescenciju. Primijetio je da imaju veliku prodornost jer su mogle proći kroz zaslone velike debljine, a nije ih mogao sabiti lećom u žarište [11].

Röntgenovim otkrićem rendgenskog zračenja započinje sasvim nova era u medicinskoj dijagnostici. Razvijene su različite vrste rendgenskih uređaja, a oni omogućuju primjenu ionizirajućeg i neionizirajućega zračenja za [10]:

- prikaz unutrašnjosti ljudskog tijela (radiologija, dijaskopija, tomografija),
- uništavanje zaraženih stranica kod liječenja raka (radioterapija) i
- ogib rendgenskih zraka u kristalima, a on služi za strukturnu analizu kristala, molekula i teksture materijala.

Radiologija je grana medicine koja se bavi dijagnostičkim i intervencijskim postupcima uz primjenu ionizirajućeg i neionizirajućega zračenja. Ionizirajuće zračenje primjenjuje se kod konvencionalnih radioloških uređaja koji koriste rendgensku cijev. Neionizirajuće zračenje primjenjuje se kod magnetske rezonance.

Izvori zračenja koji se koriste u medicini mogu se podijeliti na:

- otvorene izvore ionizirajućeg zračenja<sup>1</sup>
- zatvorene izvore ionizirajućeg zračenja<sup>2</sup>.

U nuklearnoj medicini koriste se male količine medicinskih pripravaka otvorenih radionuklida koji se apliciraju pacijentu u dijagnostičke ili terapijske svrhe. Također, koriste se u specifičnim laboratorijskim pretragama, a u radioterapiji se koriste zatvoreni izvori ionizirajućeg zračenja. Nakon brojnih istraživanja i otkrića na području kemije, fizike, biologije, tehničkih znanosti i medicine, posljednji veliki korak u primjeni radioaktivnosti u medicini napravljen je na području slikovne dijagnostike. Na ovom su se području integriranjem sofisticiranih uređaja za slojevita snimanja koje koristi nuklearna medicina (SPECT<sup>3</sup>, PET<sup>4</sup>) i uređaja dijagnostičke radiologije (CT<sup>5</sup>, MR<sup>6</sup>) dobili najmoćniji, tzv. fuzijski uređaji SPECT/CT, SPECT/MR, PET/CT, PET/MR).

U dijagnostičke svrhe koriste se otvoreni radioaktivni izotopi. Većina se pretraga obavlja na odjelima nuklearne medicine. U osnovi primjene otvorenih radionuklida u medicini nalazi se činjenica da se radioaktivni izotop istog kemijskog elementa kemijski jednako ponaša kao i stabilni. Kemijskim postupcima ne mogu se razlikovati. Radioaktivnim izotopom nekog kemijskog elementa može se obilježiti biološki uzorak ili se takav izotop može ugraditi u kemijski spoj te se na taj način dobiva radiofarmak ili radioobilježivač. Radioaktivni spoj ponaša se isto kao i neobilježen spoj pa unesen u organizam prati iste fiziološke puteve, a budući da je radioaktivan, prenosi ionizirajuće zračenje koje se pogodnim uređajima može detektirati [13].

---

<sup>1</sup> Tvari u tekućem, praškastom ili plinovitom stanju koje nisu zaštićene i kao takve mogu izazvati radioaktivnu kontaminaciju

<sup>2</sup> Zatvoreni izvori ionizirajućeg zračenja oni su koji proizvode ionizirajuće zračenje kojim se ne može kontaminirati okoliš, odnosno oni kojima se ne mogu onečistiti prostor i radna sredina.

<sup>3</sup> Jednofotonska emisijska tomografija, akronim engleske riječi *Single Photon Emission Computed Tomography*

<sup>4</sup> Pozitronska emisijska tomografija (*Positron Emission Tomography*)

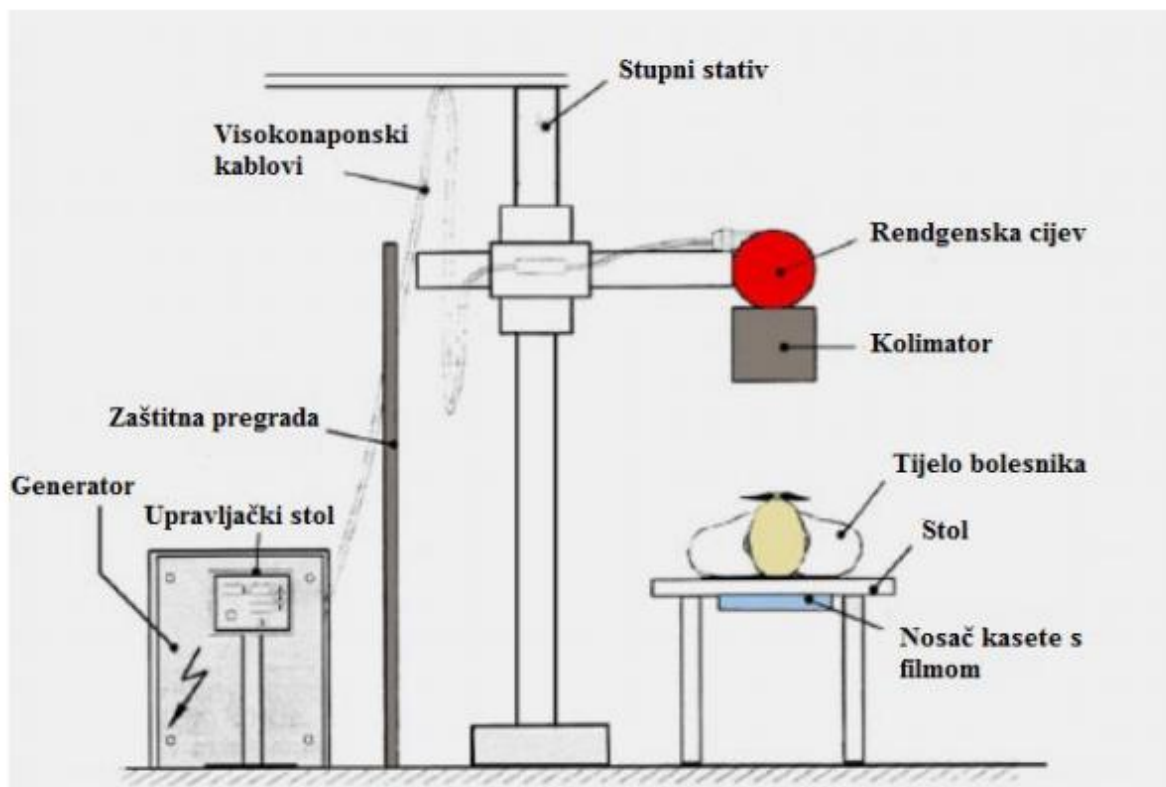
<sup>5</sup> Kompjuterizirana transmisijska tomografija

<sup>6</sup> Magnetna rezonancija



### 2. 3. 2. Rendgenski uređaji u medicini

Rendgenske uređaje može se podijeliti u dvije skupine: prema namjeni te prema snazi generatora i broju ispravljača električne energije. Prema namjeni, rendgenski se uređaji koriste za radiografiju (rendgenska snimanja), dijaskopiju te višenamjensku upotrebu i specijalnu upotrebu, dok se prema snazi i broju ispravljačica rendgenski uređaji dijele na poluvalne, cijelovalne, trofazne i visokofrekventne uređaje [14].



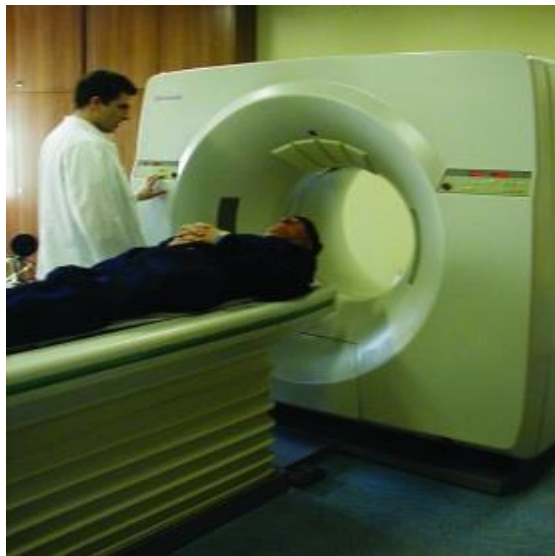
**Slika 2:** Dijelovi rendgenskog uređaja [14]

Dijagnostičke rendgenske zrake koje se upotrebljavaju u rendgenskim uređajima imaju energiju manju od  $\gamma$  zraka. Zbog visoke energije,  $\gamma$  zrake slabo se apsorbiraju u tkivu te nisu od koristi u slikovnoj dijagnostici. Rendgenske pak zrake imaju veliku sposobnost apsorpcije, a to doprinosi nastanku radiograma [14].

Zbog zaštite osoba koje su izložene zračenju, na prozor rendgenske cijevi stavljaju se filtri od aluminija ili bakra različite debljine, sukladno s namjenom rendgenskog uređaja. Noviji rendgenski uređaji imaju filter pomoću kojeg se može prilagoditi veličina snopa bez zračenja tijekom rada [14].

Razvojem medicine i tehnologije posljednjih nekoliko desetljeća postignut je veliki napredak u mogućnostima ranog otkrivanja i dijagnosticiranja bolesti. Računalna tomografija temelji se na tomografskoj tehnici. Princip tomografske tehnike temelji se na prolasku rendgenskog zračenja kroz tijelo pod različitim kutovima.

Glavni su dijelovi CT uređaja pokretni stol na kojem leži pacijent, kućište u kojem se nalaze rendgenska cijev i detektori, generator, komandni stol i radni stol s monitorom za obavljanje pregleda te računalo. Tijekom pregleda rendgenska se cijev rotira oko pacijenta. Rendgensko zračenje koje emitira rendgenska cijev prolazi kroz zadani sloj bolesnikova tijela. Rendgenske zrake prolaskom kroz različita tkiva nejednako slabe, ovisno o gustoći, sastavu i debljini tkiva. Tako nejednako oslabljeno rendgensko zračenje pada na detektore, a računalo sintetizira sliku nakon prethodne analize podataka dobivenih s detektora [15].



**Slika 3:** Računalna tomografija (CT) [15]

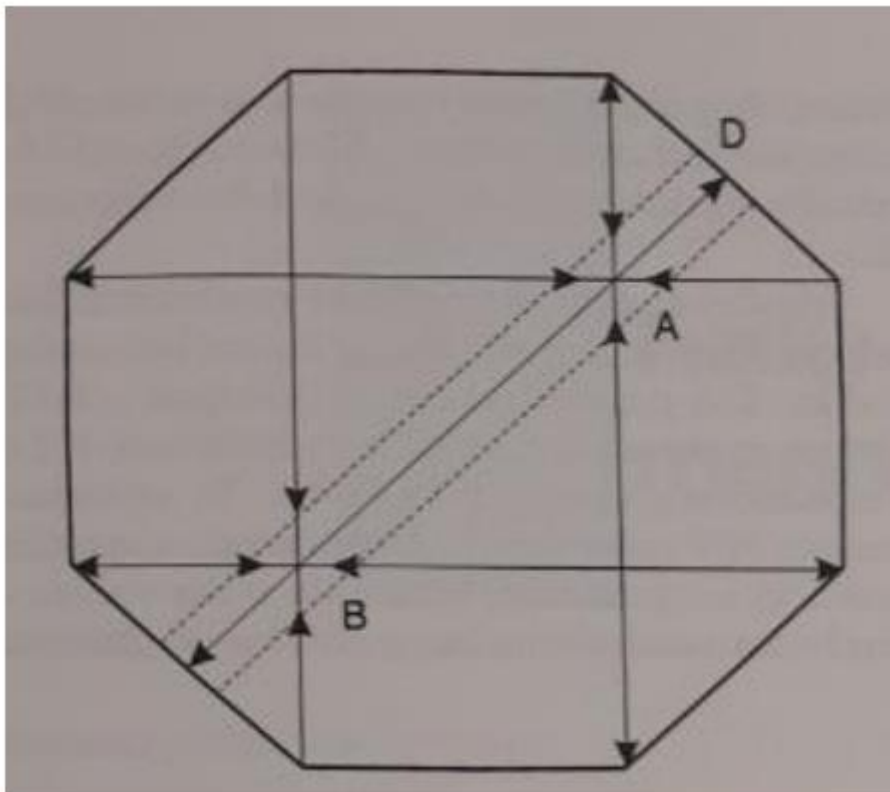
Danas je u primjeni nekoliko generacija CT uređaja. Tehnološka rješenja CT uređaja neprestano se poboljšavaju te omogućavaju sve kvalitetniju i bržu obradu pacijenata. Na CT uređaje priključuju se radne stanice s različitim programskim paketima (softverima) prilagođenim za prikaz pojedinih organa i organskih sustava. Takvi uređaji omogućavaju dvodimenzionalni i trodimenzionalni prikaz snimanog dijela tijela te se na taj način bitno unapređuje dijagnostika.

Glavne su prednosti računalne tomografije u usporedbi s klasičnim radiološkim metodama mogućnost mjerenja gustoće pojedinog patološkog procesa te točna

procjena veličine i odnosa sa susjednim anatomskim strukturama. Korištenjem kontrastnih sredstava omogućen je prikaz krvnih žila.

CT je danas nezaobilazna metoda u dijagnostici bolesti mozga, kralježnice, grudnog koša, uključujući plućna krila i sredoprsje, u dijagnostici trbušnih organa, no to se ne odnosi na želudac i crijeva [15].

Pozitronska emisijska tomografija (PET) temelji se na pozitronskom raspadu kojim nastaje antimaterija – pozitron. Kod sudara pozitrona i elektrona obje čestice iščeznu i dolazi do emitiranja  $\gamma$  zračenja (dvije zrake  $\gamma$  zračenja koje odlaze na istom pravcu, u suprotnom smjeru). Detektori su cirkularno razmješteni oko tijela te oni detektiraju  $\gamma$  zrake. Pozitronski izvor šalje parove  $\gamma$  zraka u svim smjerovima, a te zrake registriraju detektori. Položaj izvora određuje se kao sjecište pravaca na kojima leže detektorski parovi [14].



**Slika 4:** *Određivanje položaja pozitronskih izvora [14]*

PET metoda ne zahtijeva korištenje kolimatora zbog toga što anihilacijski fotoni istodobno dolaze na suprotne detektore [14].

Spin-odjek tehnika danas se najviše koristi zbog najkraćeg vremena snimanja i brze rekonstrukcije slike. Provode se mjerenja vremena  $T_1$  i  $T_2$  pomoću odjeka dobivenih pobuđivanjem odgovarajućih impulsa, a na kvalitetu slike utječe se variranjem dvaju parametara (TR i TE). Najčešće se koristi samo 2 - 5 odjeka zbog brže obrade, tj. rekonstrukcije slike [16].

## **2. 4. Utjecaj ionizirajućeg zračenja na čovjeka**

### **2. 4. 1. Biološki efekti ionizirajućeg zračenja**

Kad prođe kroz tijelo čovjeka, ionizirajuće zračenje izaziva promjene na živim stanicama, organima i na cijelom tijelu, a promjene koje izaziva nazivaju se biološki efekti zračenja. Prolaskom kroz tijelo zračenje ionizira molekule u čovjekovu tijelu što dovodi do njihova oštećenja ili čak do razaranja makromolekula tijela [17]. Promjena koja se u tkivu događa može izazvati lančanu reakciju bioloških promjena koje predstavljaju reakcije na zračenje. Ozračene stanice gube svoje funkcije, dolazi do poremećaja u njihovoj diobi, promjene gena pa i do smrti same stanice. Zračenje ne utječe na sve stanice isto niti su reakcije kod svih ljudi iste, a to znači da je osjetljivost individualna. Manju osjetljivost na zračenje imaju nediferencirane mlađe stanice tkiva i organa: koštane srži, jajnika, spermija, očne leće, a posebno embrija jer se one stalno obnavljaju [18].

Biološki efekti zračenja mogu se javiti na ozračenom pojedincu (somatski efekti) i na njegovu potomstvu (genetski efekti). Oni ovise o apsorbiranoj dozi, tj. o količini zračenja koja je primljena po jedinici mase tijela. Za navedeno se koriste posebni termoluminiscentni dozimetri. Kada dođe do mjerenja, doze se klasificiraju i to prema tome kolika je količina kojeg tkiva bila u vidnome polju, a potom se pomnože sa specifičnim faktorom koji uzima u obzir osjetljivost konkretnog tkiva na zračenje. Izmjerene se doze po tkivima zbroje i daju jedinstvenu brojčanu veličinu, tj. efektivnu dozu.

Maksimalne su doze propisane vrijednosti dozimetrijskih veličina te se one ne smiju prekoračiti ljudskim djelovanjem. One se ne odnose na prirodno ozračivanje ili ozračivanje u medicinske svrhe. Od nekoliko granica kojima se ograničavaju doze u

pojedininim situacijama za širu primjenu, važne su primarne granice doza koje se odnose na pojedinca i autorizirane granice doza koje propisuju državna tijela koja su nadležna za rad s izvorima ionizirajućih zračenja [19].

*Tablica 1: Granične doze zračenja za stanovništvo [19]*

Vrsta doze	Način ozračivanja	Vrijednost
<b>Individualna godišnja granica efektivne ekvivalentne doze za stanovnike zbog ozračenja iz svih tehničkih izvora</b>		$H_G = 0,2 \text{ mSv}$
<b>Individualna godišnja granica ekvivalentne doze za stohastičke učinke, za skupine pojedinaca iz stanovništva</b>	Ujednačeno, cijelo tijelo	$H_G = 5 \text{ mSv}$
<b>Individualna srednja godišnja efektivna ekvivalentna doza za tu skupinu</b>	Ujednačeno, cijelo tijelo	$H_E \leq 0,5 \text{ mSv}$
<b>Efektivna ekvivalentna doza</b>	Neujednačeno	$H_E \leq 5 \text{ mSv}$
<b>Godišnja granica ekvivalentne doze za pojedini organ ili tkivo</b>	Neujednačeno	$H_{I,G} = 5 \text{ mSv}$
<b>Srednja godišnja efektivna ekvivalentna doza tijekom života pojedinog stanovnika, dugogodišnje izlaganog blizu granica godišnje efektivne ekvivalentne doze</b>		$H_E \leq 1 \text{ mSv}$

**Tablica 2: Granične doze za osoblje profesionalno izloženo ionizirajućem zračenju [19]**

	Vrsta doze	Način ozračivanja	Vrijednost
<b>Stohastički učinci</b>	Individualna godišnja granica efektivne ekvivalentne doze	Ujednačeno cijelo tijelo	$H_G = 50 \text{ mSv}$
	Efektivna ekvivalentna doza	Neujednačeno	$H_E \leq 50 \text{ mSv}$
	Godišnja granica za pojedini organ ili tkivo <ul style="list-style-type: none"> <li>• Za očne leće i krvotvorne organe</li> <li>• Za ostale organe i tkiva</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Neujednačeno</li> <li>• Neujednačeno</li> </ul>	$H_G = 150 \text{ mSv}$ $H_G = 500 \text{ mSv}$
<b>Nestohastički učinci</b>	Individualna godišnja granica efektivne ekvivalentne doze <ul style="list-style-type: none"> <li>• Za očne leće i krvotvorne organe</li> <li>• Za ostale organe i tkiva</li> </ul>		$H_i = 150 \text{ mSv}$ $H_i = 500 \text{ mSv}$

Iskazane su količine  $H_i$  za ostale organe, no one su uvelike manje jer se ti dijelovi ne nalaze na izravnom putu zrake. Ako je primljena doza veća od 0,25 Sv (sivert), može uzrokovati promjenu krve slike, oštećenja kože, a i dugoročne posljedice kao što su leukemija i razne vrste zloćudnih bolesti. Doze od 2 do 3 Sv mogu uzrokovati probavne smetnje i radijacijsku bolest, a ako se ne liječe, moguća je i smrt. Doze od 4 Sv izazivaju smrt kod 50 % ozračenih osoba, a doze od 6 Sv izazivaju smrt u 100 % slučajeva ako se adekvatno ne liječe. Kod doza od 8 Sv smrtnost je 100 %-tna čak i ako se adekvatno liječi [20].

## 2. 4. 2. Deterministički i stohastički učinci ionizirajućeg zračenja

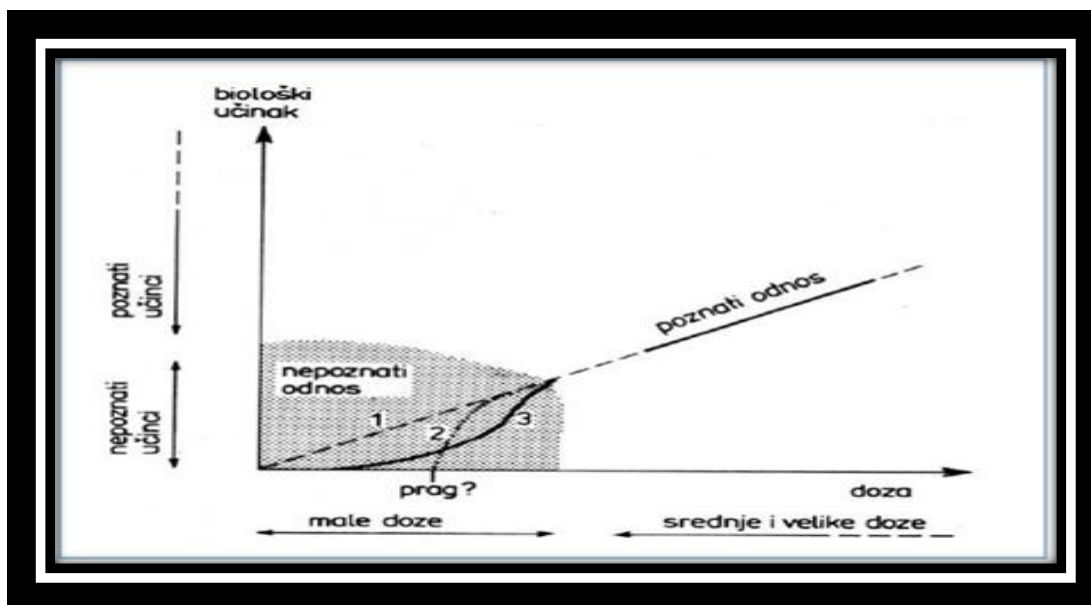
Biološki efekti ovise o trajanju i učestalosti ozračivanja te raspodjeli doze po tijelu. Što je veća primljena doza, veći je i biološki efekt. Biološki efekti mogu se podijeliti na [21]:

- determinističke učinke i
- stohastičke učinke.

Deterministički učinci javljaju se kada je ozračena osoba primila veliku količinu zračenja (0,25 do 1 Sv) koja je uzrokovala smanjenje broja stanica u koštanoj srži, fibroze, akutni radijacijski sindrom, zamućenost očne leće, gubitak kose, smanjeno lučenje slina i druge. Radijacijski sindrom uzrokuje u početku mučninu, povraćanje, proljev i sl., a navedeni simptomi traju 2 - 3 dana, nakon čega slijedi razdoblje od nekoliko tjedana u kojem nema nikakvih simptoma, ali se za to vrijeme događaju promjene u krvnoj slici.

Ne postoji specifično liječenje navedene bolesti, već se terapijom djeluje na prevladavanje oštećenja koja su nastala u koštanoj srži i poremećaja probavnog sustava. Osobi s ovom bolešću daje se transfuzija krvi i pojedinih krvnih pripravaka, a izolacijom u sterilnoj jedinici nastoji se spriječiti infekcija. Bolesnici koji su izliječeni od ove bolesti još dugo osjećaju umor i ne podnose tjelesne napore. Više godina od izliječenja mogu se javiti kasni učinci ozračenja: kronični radiodermatitis, zloćudne bolesti i genetske promjene.

Stohastički učinci zračenja mogu nastati i kod manjih doza zračenja jer ne postoji neka minimalna doza ispod koje se oni ne pojavljuju. Upravo zbog stohastičkih učinaka koji mogu nastati kod bilo koje doze, potrebno se držati principa da doza zračenja treba biti onoliko niska koliko se najviše može postići. Pod stohastičkim učincima podrazumijevaju se pojava raka i genetskih oštećenja. Male su doze radijacije te koje mogu uzrokovati promjene unutar DNA stanice. One ne moraju biti smrtonosne, no ipak mogu potaknuti mutacije koje naposljetku mogu završiti karcinomom. Najveći dio promjena zbiva se u DNA te se obično otkrije prije negoli nastanu problemi. Prema nekim stručnim mišljenjima, male doze zračenja mogu imati i blagotvorno djelovanje, a poznate su pod nazivom radijacijska hormeza [16].



**Slika 5:** Biološki učinci ovise o primljenoj dozi zračenja [22]

Na temelju utvrđenih veza doze i efekta zračenja daju se i preporuke o maksimalnim dozvoljenim dozama zračenja godišnje za djelatnike koji obavljaju preglede i stanovništvo.

**Tablica 3:** Maksimalne dozvoljene godišnje doze zračenja

Organ ili tkivo	Radnici	Stanovništvo (pojedinci)
Koštana srž	50 mSv	5 mSv
Reproduktivni organi	50 mSv	5 mSv
Koža i kosti	50 mSv	5 mSv
Štitna žlijezda	300 mSv	30 mSv
Šake, ruke, stopala	300 mSv	30 mSv
Zglobovi	750 mSv	75 mSv
Drugi organi	150 mSv	15 mSv

Mnogo je različitih razina zračenja koje se mogu mjeriti, a dvije su najčešće vrste kod dijagnostičke radiologije ulazna površinska izloženost (*Entrance Surface Exposure* - ESE) i efektivna doza. Kao što samo ime kaže, ulazna površinska izloženost (ESE) količina je zračenja koja pogađa neko tkivo. Može se jednostavno



izmjeriti tako da se mjerač (obično neka ionizirajuća komorica) izloži rendgenskim zrakama. Tu dozu obično određuje ovlaštena institucija kao osnovu za preporuke o razini izloženosti kada je riječ o pojedinim vrstama RTG pretraga. Tako je, na primjer, prihvaćen dokument o “referentnim dozama” za intraoralne zubne rendgenske snimke za različite vrste rendgenskih filmova [19].

Učinci malih doza zračenja ne mogu se mjeriti statističkom pouzdanošću, a za procjenu rizika ključno je razumijevanje celularnih mehanizama karcinogeneze. Karcinogeneza je proces nastanka tumora koji se odvija kroz više faza. Tumor nastaje kao posljedica djelovanja niza endogenih i egzogenih faktora koji dovode do oštećenja gena. Osobe koje su bile izložene prekomjernom ionizirajućem zračenju nakon latentnog perioda koji može trajati i nekoliko godina, vrlo često obolijevaju od leukemije, raka štitne žlijezde, raka kože i raka žlijezde slinovnice [16].

Na molekularnoj razini najopasnija oštećenja od zračenja nastaju na makromolekulama DNA. Biološke strukture poput DNA mogu biti oštećene izravno pucanjem kemijskih veza u molekulama DNA ili neizravno stvaranjem slobodnih radikala koji nastaju predavanjem energije molekulama vode. Izravni učinak javlja se u obliku pucanja jednog ili oba lanca molekule DNA. Mogućnost popravka nastalog oštećenja dva lanca molekule DNA rekombinacijom vrlo je mala i najčešće nastupa stanična smrt. Pucanje samo jednog lanca DNA može se popraviti. Slobodni radikali reagiraju s molekulama DNA, proteinima i drugim makromolekulama i na taj način nastaju novi, sekundarni radikali i molekule. U nastalim reakcijama može doći do reagiranja s molekulama kisika pa nastaje vodikov peroksid koji u budućim reakcijama može uzrokovati oštećenja važnih organskih molekula [21].

Drugi štetni učinak zračenja usporavanje je dijeljenja stranca. Usporavanjem brzine sinteze u DNA period se mitoze produžuje što dovodi do kašnjenja sljedeće mitoze, a na stupanj kašnjenja utječe doza primljenog zračenja. Zračenje može uzrokovati i lomove molekula kromosoma. Kod navedenih lomova najčešće dolazi do ponovnog spajanja polomljenih dijelova, ali se kod jednog dijela to ne dogodi. Kromosomi su nositelji genetskih informacija gdje stranica kći uslijed nastalog loma neće dobiti genetsku informaciju. Kod lomova dvaju ili više kromosoma nastaje mogućnost za stvaranje aberantnih kromosoma koji su nastali spajanjem u obliku mostova ili prstena odlomljenih dijelova koji su se ponovno spojili, ali nepravilno.

Stanice s takvim kromosomima nemaju mogućnost reprodukcije, a mogu imati i druge abnormalnosti [21].

Pucanje lanca DNA na određenim dijelovima može za posljedicu imati malignu transformaciju kod ozračivanja visokom dozom ili kontinuiranog ozračivanja niskim dozama. Razdoblje između nastanka ozračenja i nastanka raka različito je, a može biti i više godina. Za nastanak leukemije može biti čak osam godina, a za neke čvrste tumore i više.

Ionizirajuće zračenje može uzrokovati mutaciju gena. Mutacija je nespecifična promjena koja može nastati bilo kada u tijelu. Nekada dođe do promjene samo jednog gena, a ako se ta mutacija dogodi na spolnoj stanici, genetski defekt prenosi se na potomstvo. Ako se mutacija dogodi na somatskim stanicama, ona se također prenosi na stanice kćeri, a djelovanjem zračenja stvara se kumulativni učinak, tj. dovoljna je i mala doza zračenja da bi uzrokovala promjene [22].

## **2. 5. Prirodni izvori ionizirajućeg zračenja**

Izvori ionizirajućeg zračenja dijele se na prirodne i umjetne. Prirodno pozadinsko ionizirajuće zračenje dolazi iz triju glavnih izvora: kozmičko zračenje, prirodno zračenje radioaktivnih materijala i radon. Kozmičko zračenje dolazi iz svemira te uključuje energetske protone, elektrone, gama-zrake i rendgenske zrake. Primarni su radioaktivni elementi u prirodi uranij, torij, kalij i njihovi radioaktivni derivati. Navedeni elementi emitiraju alfa i beta-čestice ili gama-zrake. Većina prirodnog zračenja dolazi od plina radona koji nastaje raspadom uranija i torija. Radon izlazi iz tla te se koncentrira u zgradama [23].

Kozmičko zračenje sadrži čestice različitih energija i ima neutronske komponente koja daje brzinu doze do 25 mSv/godinu te direktno ionizirajuću komponentu od 0,25 do 0,30 mSv/godinu. Intenzitet zračenja ovisi o geografskoj širini. Veći je prema polovima i raste s nadmorskom visinom. Od ukupnog prirodnog pozadinskog zračenja na kozmičko zračenje otpada otprilike 13 %. Kozmičko zračenje može biti primarno i sekundarno. Primarno kozmičko zračenje čine čestice vrlo visoke energije (do  $10^{18}$  eV). To su najviše protoni, alfa-čestice, teži ioni i elektroni. Veliki postotak primarnog kozmičkog zračenja dolazi izvan Sunčeva

sustava, a jedan dio dolazi od Sunca. Vrlo malo primarnog kozmičkog zračenja prodre do Zemljine površine, a većina reagira sa Zemljinom atmosferom proizvodeći sekundarno kozmičko zračenje. Sekundarno kozmičko zračenje sastoji se od fotona, elektrona, neutrona i gama-zraka te ono dolazi do površine.

Atmosfera i Zemljino magnetsko polje također su štit od kozmičkog zračenja jer smanjuju količinu zračenja koja dolazi do površine. Na kozmičko zračenje djeluje i Sunčeva aktivnost na način da pojačanje aktivnosti Sunca uzrokuje pojačanje Zemljinog magnetskog polja, a to dovodi do slabljenja učinka kozmičkog zračenja [23].

Godišnja doza apsorbiranog kozmičkog zračenja ovisi o nadmorskoj visini. U SAD-u će osoba u prosjeku primiti dozu od 27 mrem godišnje, a navedeni se iznos udvostručuje sa svakih 2000 metara nadmorske visine. Od pola do ekvatora na razini mora dolazi do smanjenja količine kozmičkog zračenja od samo 10 %, dok je na nadmorskoj visini od 18000 metara smanjenje 75 %, a to je posljedica djelovanja Zemljinog i Sunčevog magnetskog polja na primarno kozmičko zračenje. Tablica u nastavku prikazuje najčešće nuklide koji su rezultat kozmičkog zračenja.

**Tablica 4:** Najčešći nuklidi koji uzrokuju kozmičko zračenje [23]

<b>Nuklid</b>	<b>Vrijeme poluraspada</b>	<b>Aktivnost</b>
<sup>14</sup> C	5730 god.	0.22 Bq/g
<sup>3</sup> H	12.3 god.	$1.2 \times 10^{-3}$ Bq/kg
<sup>7</sup> Be	53.28 dana	0.01 Bq/kg

Vožnja zrakoplovom povećava godišnju dozu ozračenosti za nekoliko mrema, no sve ovisi o tome koliko često čovjek leti zrakoplovom, na kojoj visini leti te koliko let traje [24].

**Tablica 5: Doze zračenja tijekom leta avionom [24]**

Doze zračenja koje primi čovjek za vrijeme leta avionom, za brzine ispod i iznad brzine zvuka, u normalnim vremenskim uvjetima				
Putovanje	Sporije od brzine zvuka Visina: 36 000 stopa (11km)		Nadzvučna brzina Visina: 62 000 stopa (19km)	
	Trajanje leta (sati)	Doza po putovanju (μGy)	Trajanje leta (sati)	Doza po putovanju (μGy)
Los Angeles - Paris	11,1	48	3,8	37
Chicago - Paris	8,3	36	2,8	26
New York - Paris	7,4	31	2,6	24
New York - London	7,0	29	2,4	22
Los Angeles – New York	5,2	19	1,9	13
Sydney - Acapulco	17,4	44	6,2	21

Zračenje iz Zemlje potječe iz materijala u stijenama kao što su izotopi kalija i rubidija te dvije porodice radioaktivnih elemenata koje nastaju raspadom uranija i torija. Godišnja doza prirodnog zračenja na razini mora iznosi za granit 1,43 mSv, a za sedimentnu stijenu 0,76 mSv. Radioaktivni materijali prisutni su posvuda u prirodi: u tlu, stijenama, vodi, zraku i vegetaciji. Najvažniji su nuklidi koji se odnose na prirodno zračenje kalij, uran i torij. Oni su prisutni još iz vremena stvaranja Zemlje te imaju vrlo velika vremena poluraspada (često i oko 100 milijuna godina). Aktivnost ovih nuklida s vremenom se smanjivala pa je tako danas, primjerice, doza  $^{40}\text{K}$  otprilike upola manja nego u vrijeme stvaranja Zemlje [23].

**Tablica 6: Najvažniji nuklidi povezani s prirodnim zračenjem [23]**

Nuklid	Vrijeme poluraspada	Aktivnost
<sup>235</sup> U	7,04 × 10 <sup>8</sup> god.	0,72 % prirodnog urana
<sup>238</sup> U	4,47 × 10 <sup>9</sup> god.	99,2745 % prirodnog urana
<sup>232</sup> Th	1,41 × 10 <sup>10</sup> god.	1,6 do 20 ppm u običnim stijenama
<sup>226</sup> Ra	1,6 × 10 <sup>3</sup> god.	16 Bq/kg u vapnencu; 48 Bq/kg u vulkanskim stijenama
<sup>222</sup> Rn	3,82 dana	plemeniti plin; 0,6 Bq/m <sup>3</sup> do 28 Bq/m <sup>3</sup>
<sup>40</sup> K	1,28 × 10 <sup>9</sup> god.	tlo – 0,037 do 1,1 Bq/kg

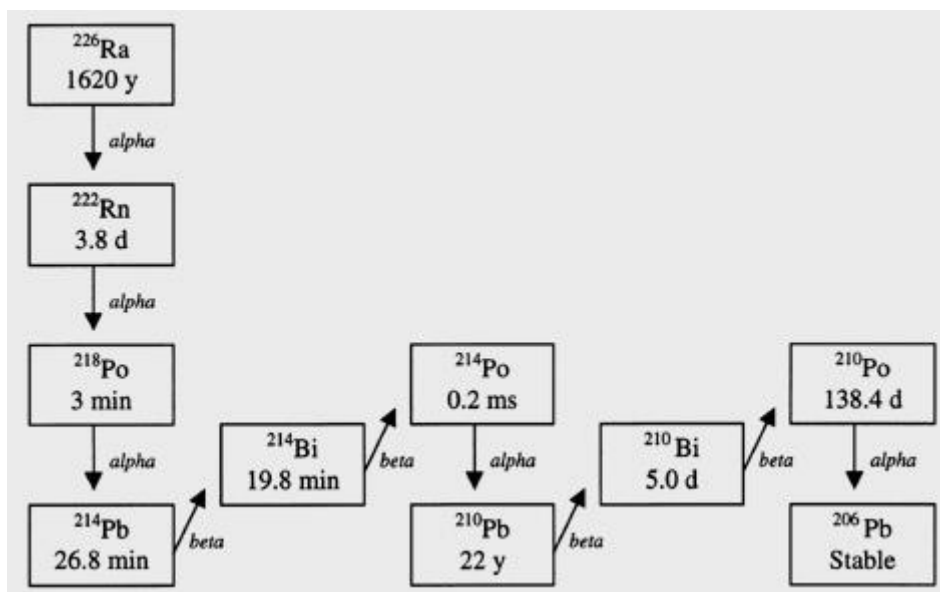
Zračenje prirodnog porijekla rezultat je kombinacije kozmičkog zračenja (fotoni, mioni i dr.) i zračenja elemenata koji se nalaze u i na Zemlji (<sup>40</sup>K, <sup>232</sup>Th i dr.). Također, sve vode na Zemlji sadrže radionuklide. Tablica u nastavku prikazuje neke od nuklida koji se mogu pronaći u morima te njihovu aktivnost [24].

**Tablica 7: Prirodna radioaktivnost oceana [24]**

Prirodna radioaktivnost oceana				
Nuklid	Aktivnost korištena za izračun	Ocean		
		Pacifik	Atlantik	Ukupno
<b>U</b>	33 mBq/L	22 EBq	11 EBq	41 EBq
<sup>40</sup> K	11 Bq/L	7400 EBq	3300 EBq	14000 EBq
<sup>3</sup> H	0,6 mBq/L	370 PBq	190 PBq	740 PBq
<sup>14</sup> C	5 mBq/L	3 EBq	1,5 EBq	6,7 EBq
<sup>87</sup> Rb	1,1 Bq/L	700 EBq	330 EBq	1300 EBq

Radon je prirodni radioaktivni plin, a glavni je izvor radona (<sup>222</sup>Rn) tlo koje sadrži radij te koje alfa-raspalom daje plinoviti radon. Radon se probija prema površini zemlje, izlazi i miješa se sa zrakom te nastavlja put prema atmosferi. Čovjek udisanjem zraka udiše i radioaktivni plin radon. Što je veća koncentracija radona u

zraku, to će ga čovjek više udisati. Prilikom raspada radona stvaraju se  $^{218}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Pb}$ ,  $^{214}\text{Bi}$  i  $^{214}\text{Po}$  i oslobađa se energija koja može oštetiti tkiva dišnih organa. Kratkoživi radonovi potomci predstavljaju veću opasnost za ljudsko zdravlje od samog radona jer su metalni atomi polonija uglavnom u (+) ionskoj formi te se vežu za aerosole koji potom zrakom dopijevaju u dišni trakt gdje se založe i ioniziraju radiosenzitivno plućno tkivo. Radonov dozni ekvivalent značajno ovisi o koncentraciji radonovih potomaka, ali i o veličini i koncentraciji aerosola [24].



**Slika 6:** Slijed raspadanja radija i pripadna zračenja [24]

Budući da radon uglavnom izlazi iz zemlje i penje se prema atmosferi, nerijetko završava u stambenim objektima. Ako postoji prolaz u unutrašnjost, taj će plin ući u stambeni prostor. Mogući putevi ulaska radona u stambeni prostor prikazani su na slici u nastavku.



**Slika 7: Načini ulaska radona u kuću [24]**

1. Pukotine na podu
2. Poprečna greda
3. Pukotine na zidu
4. Pukotine na podu zatvorenog balkona
5. Pukotine oko odvodnih cijevi
6. Udubljenje u zidu
7. Vodovod

Postoje dva temeljna načina zaštite zatvorenih prostora od nagomilavanja radona. Prvi je da se svede ulazak radona u unutrašnjost prostorije na što je moguće manju mjeru, a drugi je način omogućiti radonu da iz prostorije izađe, a to se postiže čestom izmjenom zraka unutrašnjosti s vanjskim zrakom [24].

## 2. 6. Umjetni izvori zračenja i njihova primjena

Umjetni izvori ionizirajućeg zračenja po svojoj su prirodi i učinku identični prirodnim izvorima. Ionizirajuće zračenje sve se više koristi u medicini, stomatologiji i industriji. Glavni su korisnici umjetnog ionizirajućeg zračenja medicinske ustanove (bolnice, farmaceutske ustanove i dr.), ustanove za istraživanje i učenje, nuklearni reaktori i njihove pomoćne ustanove. Brojne od navedenih ustanova proizvode radioaktivni otpad, a neke otpuštaju i kontrolirane količine zračenja u prirodu. Radioaktivni materijali također su se koristili i u različitim potrošačkim proizvodima, kao što su digitalni satovi, umjetni zubi i detektori dima [25].

Izloženost zračenju prosječne osobe iznosi otprilike 3,6 mSv godišnje, od čega 81 % dolazi iz prirodnih izvora. Preostalih 19 % dolazi iz umjetnih izvora zračenja. Neki umjetni izvori zračenja utječu na čovjeka kroz direktno zračenje, a drugi poprimaju oblik radijacijskog trovanja i ozračuju čovjeka iznutra. Najznačajniji izvori umjetnog zračenja kojima su ljudi izloženi dolaze iz medicinskih procedura, kao što su dijagnostičke rendgenske zrake, nuklearna medicina i terapija zračenjem. Glavni radionuklidi koji se koriste u medicini su  $^{131}\text{I}$ ,  $^{99}\text{Tc}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{192}\text{Ir}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ . Oni se rijetko ispuštaju u okolinu.

Ljudi su također izloženi zračenju iz potrošačkih proizvoda kao što su duhan ( $^{210}\text{Po}$ ), građevinski materijali, televizori, rendgenski sustavi na aerodromima, detektori dima, elektronske cijevi i dr. U manjoj su mjeri ljudi izloženi i zračenju koje potječe iz ciklusa nuklearnog goriva, a taj ciklus uključuje proces od iskopavanja i obrade urana, preko nuklearnih reaktora pa sve do odlaganja radioaktivnog otpada. Učinci takve izloženosti još uvijek nisu pouzdano izmjereni [25].

U slučaju nuklearnog rata, gama-zrake iz padalina proizvedenih nuklearnim oružjem najvjerojatnije bi prouzrokovale najveći broj žrtava. Neposredno niz vjetar od mete, doza zračenja premašivala bi 30 000 mSv na sat, a 450 mSv fatalno je za polovicu populacije [25].



**Tablica 8: Najvažniji umjetni radionuklidi [25]**

Nuklid	Vrijeme poluraspada	Izvor
$^3\text{H}$	12,3 god.	fisijski reaktori; proizvodnja nuklearnog oružja
$^{131}\text{I}$	8,04 dana	produkt fisije; koristi se u medicinske svrhe
$^{129}\text{I}$	$1,57 \times 10^7$ god.	fisijski reaktori; testiranje oružja
$^{137}\text{Cs}$	30,17 god.	fisijski reaktori; testiranje oružja
$^{90}\text{Sr}$	28,78 god.	fisijski reaktori; testiranje oružja
$^{99}\text{Tc}$	$2,11 \times 10^5$ god.	produkt raspada $^{99}\text{Mo}$
$^{239}\text{Pu}$	$2,41 \times 10^4$ god.	produkt bombardiranja $^{238}\text{U}$ neutronima

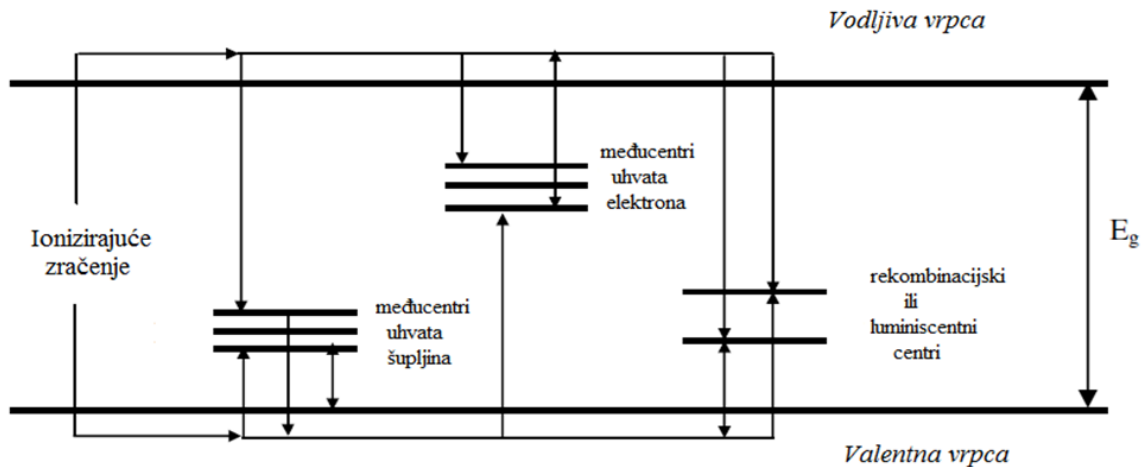
## 2. 7. Dozimetrija zračenja

Dozimetrija je mjerenje i računanje energije koju zračenje predaje tvari, proučavanje utjecaja različitih vrsta ionizirajućeg zračenja na tvari, tkiva i organe te mjerenje brzine raspadanja radioaktivne tvari. Veličine su koje opisuju izloženost tvari ionizirajućem zračenju i učinke (oštećenja) uzrokovane energijom zračenja npr. apsorbirana doza, efektivna doza i ekvivalentna doza, a brzinu raspadanja radioaktivne tvari opisuje aktivnost radioaktivnog izvora [26].

Termoluminiscencija je produkcija 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 postoji gotovo puna valentna i gotovo prazna vodljiva vrpca koje su odvojene zabranjenim pojasom, procjepom u kojem nema dopuštenih elektronskih energetskih nivoa. Ipak, elektroni mogu prelaziti iz valentne u vodljivu vrpce i stvarati slobodne elektrone te ostavljati slobodne šupljine. Nečistoće i defekti u materijalu u zabranjenom procjepu između valentne i vodljive vrpce mogu stvoriti nove, lokalizirane energetske razine.

Položaj navedenih razina određen je prirodom defekata i matične rešetke. Neke od tih razina mogu uhvatiti elektron ili šupljinu te se nazivaju međucentrirani

uhvati elektrona ili šupljine (engl. *traps*). 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. Navedena situacija prikazana je na slici u nastavku [27].



**Slika 8:** Shematski prikaz procesa termoluminiscencije [27]

Količina uhvaćenih elektrona proporcionalna je apsorbiranom zračenju te su iz navedenog razloga ovi materijali pogodni za dozimetriju. Vanjskom stimulacijom, u TL slučaju grijanjem, navedeni se elektroni oslobađaju i postaju mobilni te su privučeni u suprotno nabijene luminiscentne centre. Rekombinacijom elektrona i šupljine oslobađa se energija u obliku svjetlosti. Nakon navedenog procesa materijal sadrži manje nesparenih elektrona i šupljina u centrima te je time vraćen u prvobitno stanje u kakvom je bio prije apsorpcije ionizirajućeg zračenja [28].

## 2. 7. 1. Zaštitne dozimetrijske veličine

Zaštitne se dozimetrijske veličine temelje na veličini prosječne apsorbirane doze u volumenu i masi ciljanog organa ili tkiva od određenog tipa zračenja [29].

### 2. 7. 1. 1. Apsorbirana doza

Apsorbirana je doza nestohastična veličina koja je primjenjiva za direktno i indirektno ionizirajuće zračenje. Kod indirektnog ionizirajućeg zračenja energija se predaje materiji u dva koraka. U prvom koraku zračenje predaje energiju naelektriziranim sekundarnim česticama – elektronima, a u drugom koraku naelektrizirane čestice predaju dio svoje kinetičke energije zapremnini  $dV$  mase  $dm$  (što se opisuje apsorbiranom dozom). Ostatak se energije izgubi u obliku zakočnog zračenja i anihilacije. Apsorbirana je doza povezana sa stohastičkom veličinom primljenom energijom  $d\epsilon$ . Ona se definira kao srednja energija  $d\bar{\epsilon}$  koju je jedinica mase  $dm$  konačnog volumena primila od zračenja:

$$D = \frac{d\bar{\epsilon}}{dm} \quad (7)$$

Srednja primljena energija  $\bar{\epsilon}$  razlika je svih energija koje uđu u promatranu zapremninu i svih energija koje ju napuste (uzimajući u obzir sve konverzije mase u energiju u danoj zapremini). Proizvodnja para, primjerice, smanjuje energiju za 1,022 MeV, a anihilacija para elektron - pozitron povećava ju za istu vrijednost. Također, treba istaknuti da elektroni primljenu energiju ne predaju na istom mjestu gdje su ju i primili (energija opisana kermom), već ju deponiraju duž svoje putanje u mediju [18]. SI jedinica za apsorbiranu dozu jest džul po kilogramu, a naziva se grej (Gy)

$$[D] = 1 \text{ J kg}^{-1} = 1 \text{ Gy}. \quad (8)$$

## 2. 7. 1. 2. Ekvivalentna doza

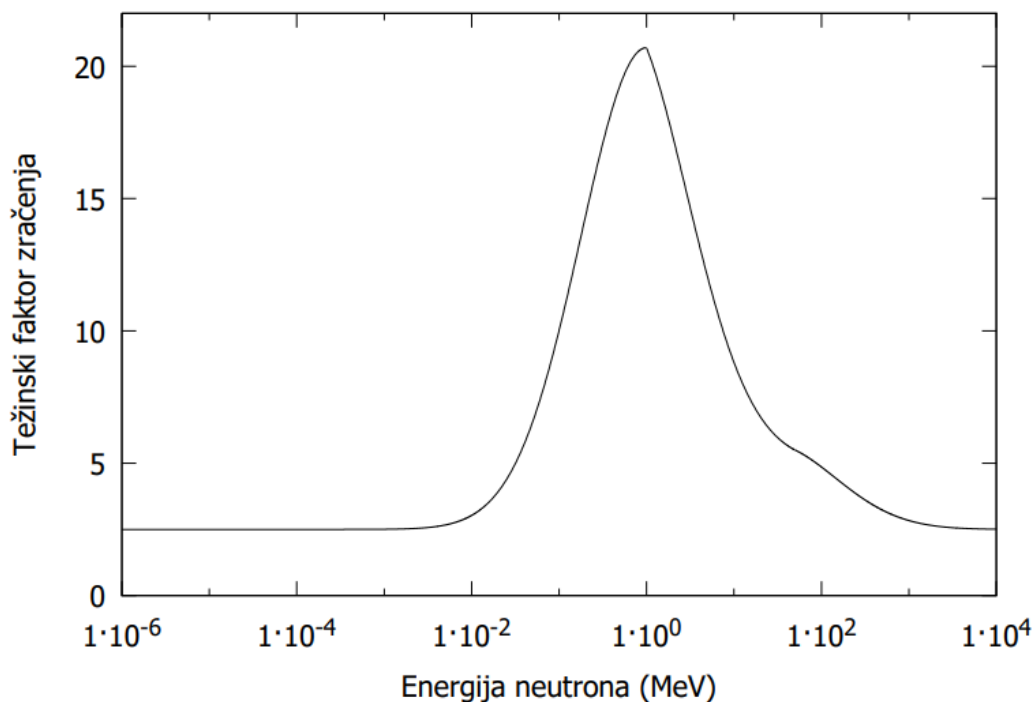
Ekvivalentna je doza u određenom tkivu ili organu definirana kao

$$H_T = \sum_R w_R D_{T,R}, \quad (9)$$

gdje je  $w_R$  težinski faktor za zračenje tipa R, a  $D_{T,R}$  srednja apsorbirana doza u tkivu T potekla od zračenja tipa R.

Težinski faktor zračenja  $w_R$  računa se na temelju relativne biološke efikasnosti (RBE) zračenja. Vrijednosti ovog faktora prikazane su u Tablici 1. Vrijednosti su cijeli brojevi, osim u slučaju neutronskog zračenja (Slika 6) gdje je  $w_R$  dan funkcijom

$$w_R = \begin{cases} 2,5 + 18,2e^{-\frac{1}{6}[\ln(E_n)]^2} & \text{ako je } E_n < 1 \text{ MeV} \\ 5,0 + 17,0e^{-\frac{1}{6}[\ln(2E_n)]^2} & \text{ako je } 1 \text{ MeV} \geq E_n \geq 50 \text{ MeV} \\ 2,5 + 3,25e^{-\frac{1}{6}[\ln(0,04E_n)]^2} & \text{ako je } E_n > 50 \text{ MeV} \end{cases}$$



**Slika 9:** Grafički prikaz funkcije (1.1) kojom se opisuje težinski faktor zračenja  $w_R$  za različite energije neutronskog zračenja [18]

SI jedinica ekvivalentne doze jest  $1 \text{ J kg}^{-1}$  koja se naziva i sivert

$$[H] = 1 \text{ J kg}^{-1} = 1 \text{ Sv.} \quad (10)$$

**Tablica 9: Težinski faktor zračenja,  $w_R$  [18]**

Tip zračenja	Težinski faktor $w_R$
Fotoni	1
Elektroni i mioni	1
Protoni i naelektrizirani pioni	2
$\alpha$ čestice, fisijski fragmenti, teške jezgre	20

gdje je  $w_T$  težinski faktor za tkivo T.

Ova se sumacija radi za sva tkiva i organe za koje se smatra da su osjetljivi na indukciju stohastičkih efekata zračenja. Vrijednosti  $w_T$  predstavljaju učešće individualnog organa ili tkiva u ukupnoj štetnosti stohastičkih efekata.

### 2. 7. 1. 3. Efektivna doza

Efektivna se doza definira kao

$$E = \sum_T w_T \sum_R w_R D_{T,R} = \sum_T w_T H_T, \quad (11)$$

SI jedinica za efektivnu dozu jest  $1 \text{ J kg}^{-1}$ , ali se češće koristi naziv sivert  $[E] = 1 \text{ J kg}^{-1} = 1 \text{ Sv}$ .

Vrijednosti težinskih faktora tkiva dane su u Tablici 10. To su prosječne vrijednosti za čovjeka, usrednjene za oba spola i za sve dobne skupine, ali ne uzimaju u obzir individualne karakteristike.

**Tablica 10:** Težinski faktori tkiva ( $w_T$ ) i njihova promjena u različitim izvještajima ICRP-a [19]

	ICRP 26	ICRP 60	ICRP 103
<b>Koštana srž ( crvena)</b>	0,12	0,12	0,12
<b>Debelo crijevo</b>		0,12	0,12
<b>Pluća</b>	0,12	0,12	0,12
<b>Želudac</b>		0,12	0,12
<b>Dojke</b>	0,15	0,05	0,12
<b>Gonade</b>		0,20	0,08
<b>Mokraćni mjehur</b>		0,05	0,04
<b>Jednjak</b>		0,05	0,04
<b>Jetra</b>		0,05	0,04
<b>Štitnjača</b>	0,03	0,05	0,04
<b>Površina kosti</b>	0,03	0,01	0,01
<b>Mozak</b>			0,01
<b>Pljuvačna žlijezda</b>			0,01
<b>Koža</b>			0,01
<b>Ostali organi (nadbubrežne žlijezde, bubrezi, mišići, gušterača, slezena, maternica, timus)</b>	0,30	0,05	0,12

Efektivna se doza računa iz ekvivalentnih doza za tkiva i organe T (uključujući i ukupnu ekvivalentnu dozu za ostale organe) muškarca,  $H_M/T$  i tkiva te organe žene  $H_F/T$  prema relaciji [18]

$$E = \sum_T w_T \left( \frac{H_T^M + H_T^F}{2} \right). \quad (12)$$

Efektivna se doza izražava jedinicom po imenu sievert (Sv). To su njezine najmanje jedinice - milisieverti i mikrosieverti. Za ulaznu površinsku izloženost (ESE) obično se rabi jedinica zvana gray (Gy), odnosno mGy ili  $\mu$ Gy. Prije su se koristile druge mjerne jedinice, najčešće milirentgeni (mR) ili miliradi (mrad). Jedan mR ili mrad odgovara 10  $\mu$ Gy odnosno 0,01 mGy [19].

Efektivna se doza u većini slučajeva izračunava na način da se mjeri zračenje koje je apsorbirano u različitim tkivima tijekom rendgenskih pretraga. *International Commission on Radiological Protection* (ICRP), odnosno Međunarodno povjerenstvo za radiološku zaštitu, savjetodavno je međunarodno tijelo koje je objavilo pojedine

faktore za pojedina tkiva u kojima su izračunane efektivne doze. Nalaže se da se kod RTG pretraga glave trebaju zaštititi sljedeća tkiva:

- površina kostiju,
- koštana srž,
- mozak,
- štitna žlijezda,
- žlijezde slinovnice i
- koža.

### **2. 7. 2. TLD, OSL i filmski dozimetri**

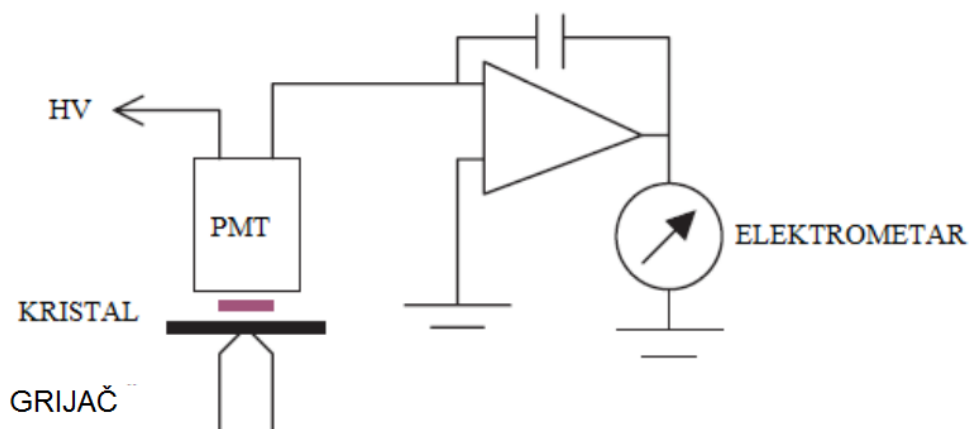
Osobne dozimetre moraju nositi sve osobe koje su tijekom obavljanja posla izložene zračenju da bi u svakom trenutku mogle pratiti razinu zračenja kojoj su izložene. Postoje dozimetri za tijelo i ekstremitete. Dozimetri za tijelo stavljaju se u predjelu vrata, grudi ili struka, a dozimetri za ekstremitete koriste se u situacijama kada su ekstremiteti i koža izloženi velikim dozama zračenja, tj. kada postoji vjerojatnost za prekoračenje granice izlaganja za određene ekstremitete. Najčešće se koriste pasivni, termoluminiscentni (TLD) i filmski dozimetri [31].

Termoluminiscentni dozimeter (TLD) koristi fosfor kao što je litij fluorida kao detektor. Kad je izložen zračenju, slobodni su elektroni zarobljeni u kristalnoj strukturi fosfora. Kada se fosfor zagrijava, elektroni su oslobođeni i odaju energiju u obliku svjetlosti. Količina je svjetla mjera izloženosti zračenju. TLD su samo malo precizniji od filmskih dozimetara na niskim razinama zračenja. TLD su otporni na toplinu i vlagu.

TLD su malih dimenzija te ih to čini praktičnim za mjerenje doza u području očiju, zglobova ili prstiju. Pokazuju visoku osjetljivost, čak i kod vrlo malih dimenzija te mogu mjeriti niske (0,1 mGy) i visoke (10 Gy) doze. Kristal je uglavnom smješten u držač. Zagrijavanjem se brišu sve informacije s dozimetra te je time omogućeno njegovo ponovno korištenje. Prilikom pobuđivanja atom može zadržati dio apsorbirane energije zračenja metastabilnim stanjima. Poslije kratkog vremenskog intervala atom se vraća u osnovno stanje emitirajući ostatak apsorbirane energije.

Kod ovakvih materijala dolazi do luminiscencije. Postoje dvije vrste luminiscencije koje se razlikuju po vremenu koje je potrebno da se emitira zračenje: fluorescencija ( $\tau < 10^{-4}$ ) i fosforescencija ( $\tau > 10^{-4}$ ). Fosforescencija može biti pobuđena optički (zračenjem) ili toplinom (termoluminiscencija). Većina kristala nema savršenu strukturu. U energetskim procjepima javljaju se metastabilna stanja. Ispod provodne zone nalaze se stanja koja se ponašaju kao zamke za slobodne elektrone, a iznad valentne su stanja s rekombiniranim centrima za šupljine koje sadrže elektrone [31].

Dozimetar sa svojim čitačem čini dozimetrijski sustav. Prikupljeni signali na dozimetru očitavaju se TLD čitačima koji se sastoje od udubljenja za postavljanje i grijanje kristala, PMT (fotomultiplikativne cijevi), HV (*high voltage*) visokonaponskog sustava za održavanje stabilnosti i elektrometra za snimanje PMT signala kao struje [31].



**Slika 10: Shema TLD čitača [31]**

Optički stimulirani luminiscentni dozimetri (OSL) već su duže vrijeme prisutni u različitim područjima dozimetrije, a sve je veći interes i za njihovom primjenom u medicini. OSL dozimetri dolaze u dva osnovna oblika: kao pasivni detektori s odgođenim očitavanjem doze ili kao detektori temeljeni na tehnologiji optičkih vlakana kojima je moguće očitavanje doze u stvarnom vremenu. Pasivni OSL dozimetri vrlo su slični termoluminiscentnim dozimetrima. Razlikuju se u načinu očitavanja jer se stimulacija luminiscencije izaziva pomoću svjetlosti umjesto pomoću topline. Zanimljivo je svojstvo ovih dozimetara mogućnost ponovljenog očitavanja istog dozimetra, a razlog je tome što se prilikom stimulacije oslobađa samo manji dio naboja, dok ostatak ostaje i dalje zarobljen u kristalnoj rešetki materijala [32].



Budući da se očitavanje radi na sobnoj temperaturi, metoda je manje destruktivna i potencijalno ima bolju osjetljivost od TLD. Za očitavanje se koristi samo dio pohranjenog naboja pa je moguća ponovna analiza primljene doze. Efekt gubitka signala gotovo da je zanemariv. OSL dozimetri i sustavi za osobnu dozimetriju zbog svoje visoke cijene još nisu u širokoj primjeni u dozimetrijskim laboratorijima.

Filmski su dozimetri vrsta kemijskih dozimetara, a danas se sve manje koriste s obzirom na to da imaju brojne nedostatke. Među njima je najvažniji velika energetska ovisnost (slab odaziv na visokim energijama zračenja) i visok prag minimalne doze. Prednosti su ovih dozimetara niska cijena, jednostavno očitavanje i mogućnost arhiviranja.

Filmski detektor koristi se u kombinaciji s različitim filtrima. Na taj se način može procijeniti kojoj je vrsti osoba bila izložena [33]. Filmski dozimetar sastoji se od jednog ili dva fotografska filma koji su smješteni u držač – kasetu s prikladnim filtrima. Fotografski se film sastoji od emulzije osjetljive na zračenje nanese na prozirnu poliestersku bazu. Ono što daje osjetljivost na zračenje jesu nesavršenosti kristala koje tvore područja osjetljivosti, odnosno uhvata elektrona ili latentnih centara. To mogu biti distorzije kristalne strukture zbog utjecaja stranih molekula ili zbog dodavanja kemijske supstance.

Filmska dozimetrija temelji se na očitavanju optičke gustoće, OD, koja je definirana kao [34]:

$$OD = \log \frac{1}{T}$$

gdje je T relativna transmisija

$$T = \frac{I}{I_0}$$

Pri čemu je:

$I$  – intenzitet s filmom

$I_0$  – intenzitet bez filma.

Optička gustoća mjeri se denzitometrom i ovisi o tipu filma te o vrsti i energiji zračenja koje se mjeri. Denzitometar je uređaj koji se sastoji od izvora svjetlosti i fotoćelije za mjerenje intenziteta svjetlosti nakon prolaska kroz film. Još je jedan nedostatak filmske dozimetrije taj što se optička gustoća ne mijenja uvijek linearno s

dozom pa je potrebno dobro poznavati odaziv korištenog filma (kalibracija). Također, s vremenom zacrnenje blijedi, tj. dolazi do gubitka signala, a do toga najviše dolazi kada je film izložen visokoj temperaturi i utjecaju vlage. Zato se treba čuvati u suhom i hladnom prostoru bez kisika. Prednost je što film ostaje kao trajan zapis u arhivu i dokaz o primljenom zračenju. Također, iz različite oštine slike rubova filtra izravnog zacrnenja može se odrediti je li doza bila primljena jednokratno ili se pomalo nakupljala u manjim količinama tijekom dužeg razdoblja [34].

### 2. 7. 3. Operativne dozimetrijske veličine

Operativne veličine, prema ICRU<sup>7</sup>, koriste se za procjenu gornjih granica vrijednosti zaštitnih veličina koje su povezane s izlaganjem ionizirajućem zračenju. Za doze u blizini ili iznad doznih granica potrebno je imati dodatne informacije o karakteristikama zračenja na radnom mjestu i karakteristikama odaziva dozimetra s ciljem potvrđivanja prikladnosti korištenja operativnih veličina za određivanje efektivne doze, ekvivalentne doze za lokalnu kožu ili ekvivalentne doze za leću ili ekstremitete [34].

Razlikuju se dvije vrste operativnih veličina: za nadzor prostora i osobni nadzor. Za nadzor prostora mjerne veličine jesu:

- $H^*(10)$  – ambijentalni dozni ekvivalent
- $H'(0,07)$  – *usmjereni* dozni ekvivalent.

Navedeni dozni ekvivalenti definirani su kao dozni ekvivalenti na dubinama 10 mm i 0,07 mm sfere radijusa 30 cm sačinjene od ICRU četveroelementnog tkiva. Ambijentalni je dozni ekvivalent  $H^*(10)$  veličina koja je povezana sa zaštitnom veličinom efektivnom dozom i općenito se koristi za buduće procjene, kategorizaciju radnih prostora, provjeru učinkovitosti debljine zaštite i dr. To je izotropna veličina čija vrijednost ne ovisi o smjeru distribucije polja zračenja u promatranoj točki.

$H'(0,07)$  koristi se za nadzor prostora pri određivanju doze na koži i ostalim površinskim tkivima. Mjerne su veličine koje se koriste za osobni nadzor osobni dozni ekvivalenti [34]:

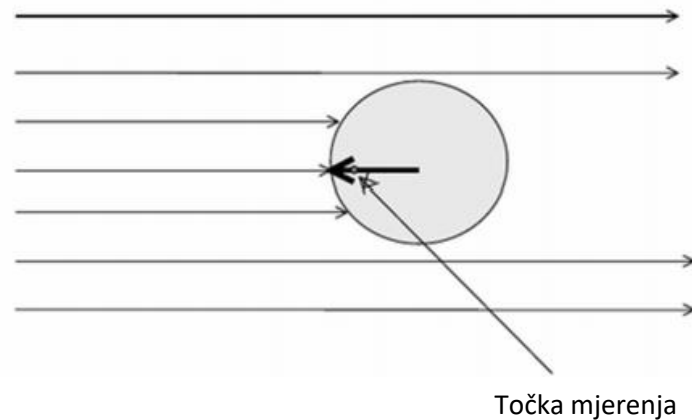
---

<sup>7</sup> *International Commission on Radiological Protection, The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Ann. ICRP (2007)*

- $H_p(10)$  za određivanje efektivne doze
- $H_p(3)$  za određivanje ekvivalentne doze za očnu leću
- $H_p(0,07)$  za određivanje lokalne doze za kožu od fotona ili elektrona (maksimalna vrijednost ekvivalentne doze za kožu, uprosječna preko  $1 \text{ cm}^2$ ).

### 2. 7. 3. 1. Ambijentalni dozni ekvivalent

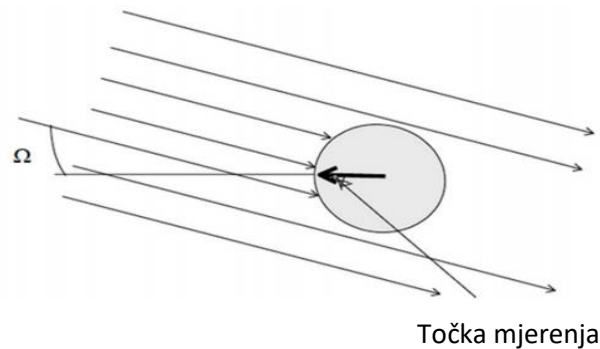
Ambijentalni dozni ekvivalent unutar točke radijacijskog polja  $H^*(d)$  određuje se kao dozni ekvivalent koji proizvodi usmjereno i prošireno polje u ICRU području na dubini  $d$ , a ona je definirana na radij vektoru koji ima suprotnu orijentaciju od vektora usmjerenog polja. ICRU područje ima promjer 30 cm, a napravljeno je od tkivno ekvivalentnog materijala gustoće  $1 \text{ g cm}^{-3}$ . U njegovom je sastavu 76,2 % kisika, 11,1 % ugljika, 10,1 % vodika i 2,6 % dušika. Upotrebljava se kao referentni fantom kod definiranja operativnih veličina. Jedinica za ambijentalni dozni ekvivalent jest sievert (Sv) [35].



**Slika 11:** Ambijentalni dozni ekvivalent [36]

### 2. 7. 3. 2. Dozni ekvivalent smjera

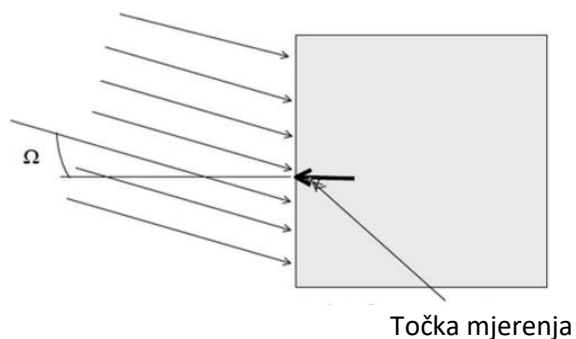
Dozni ekvivalent smjera u točki radijacijskog polja definira se kao dozni ekvivalent koji proizvodi usmjereno i prošireno polje u ICRU sferi na dubini  $d$ , a ona je definirana na radij vektoru u određenom smjeru. Jedinica je za dozni ekvivalent smjera sievert (Sv) [36].



**Slika 12:** Dozni ekvivalent smjera [36]

### 2. 7. 3. 3. Osobni dozni ekvivalent

Osobni je dozni ekvivalent dozni ekvivalent za meko tkivo (ICRU 4 – elementno tkivo), ispod određene točke na tijelu na odgovarajućoj dubini  $d$ . Za duboke organe uzima se dubina  $d = 10$  mm, a za površinske organe uzima se dubina  $d = 0,07$  mm za kožu i  $d = 3$  mm za očnu leću [35].



**Slika 13:** Osobni dozni ekvivalent [36]

## 2. 8. Propisane granične vrijednosti primljene doze zračenja

Zakon o radiološkoj i nuklearnoj sigurnosti [37] navodi da je ionizirajuće zračenje elektromagnetsko i čestino zračenje čijim prolazom u tvari izravno ili neizravno nastaju putevi pozitivno i negativno električki nabijenih čestica (iona). Isti zakon navodi da izloženost pojedinca ovom zračenju mora biti ograničena. To znači da primljena doza zračenja ne smije prijeći granice koje su propisane Pravilnikom o granicama ozračenja [38]. Pravilnik navodi preporučene granice ozračenja za pojedinog stanovnika i za radnike koji su izloženi zračenju (osobe koje tijekom rada dolaze u izravni ili neizravni dodir s izvorima ionizirajućeg zračenja). Ovaj pravilnik određuje i granice ozračenja pojedinih ljudskih tkiva i organa.

**Tablica 11: Dozvoljene granice izlaganja u jednoj godini [38]**

Dozimetrijska veličina / Skupina	Efektivna doza	Ekvivalentna doza	
		Za očne leće	Za podlaktice, šake, stopala ili kožu
<b>Izloženi radnici</b>	$\leq 100$ mSv (u razdoblju od pet uzastopnih godina, i uz uvjet max. 50 mSv/godini)	$\leq 150$ mSv	$\leq 500$ mSv
<b>Osobe između 16 i 18 godina koje se obučavaju ili obrazuju za rad s izvorima ionizirajućeg zračenja</b>	$\leq 6$ mSv	$\leq 50$ mSv	$\leq 150$ mSv
<b>Ostalo stanovništvo</b>	$\leq 1$ mSv (u posebnim okolnostima do 5 mSv, uz uvjet da je u pet uzastopnih godina prosječna efektivna doza max. 1 mSv/godini)	$\leq 15$ mSv	$\leq 50$ mSv

## 2. 9. Mjere zaštite od zračenja

Zakon o radiološkoj i nuklearnoj sigurnosti [37] navodi ciljeve sigurnosnih mjera koje se odnose na zaštitu od zračenja. Glavni je cilj izbjegavanje nepotrebne izloženosti zračenju, tj. izbjegavanje dodatne kontaminacije radioaktivnim tvarima. U tom kontekstu treba provoditi mjere zaštite kako bi se smanjilo izlaganje radnika i drugih osoba ionizirajućem zračenju u svim djelatnostima s izvorima ionizirajućeg zračenja. Ionizirajuće zračenje treba biti usklađeno s propisanim granicama te u skladu s tehničkim, organizacijskim, gospodarskim, zdravstvenim i socijalnim čimbenicima. To je u skladu s tzv. ALARA<sup>8</sup> principom.

Primljena doza zračenja pod utjecajem je brojnih čimbenika, a među njima su najvažniji [39]:

- udaljenost osobe od izvora zračenja – doza zračenja smanjuje se s povećanjem udaljenosti od izvora zračenja,
- vrijeme izloženosti osobe zračenju – što je manje vrijeme izloženosti zračenju, manja je i doza primljenog zračenja,
- štitovi – preporučuju se štitovi od olova, betona ili vode jer oni pružaju zaštitu od prodornog gama i rendgenskog zračenja.

Udaljenost i vrijeme imaju najbolji učinak na kontrolu razine izloženosti ionizirajućem zračenju. U slučaju izvanrednog događaja, bitno je da se odmah napusti kontaminirano područje [40].

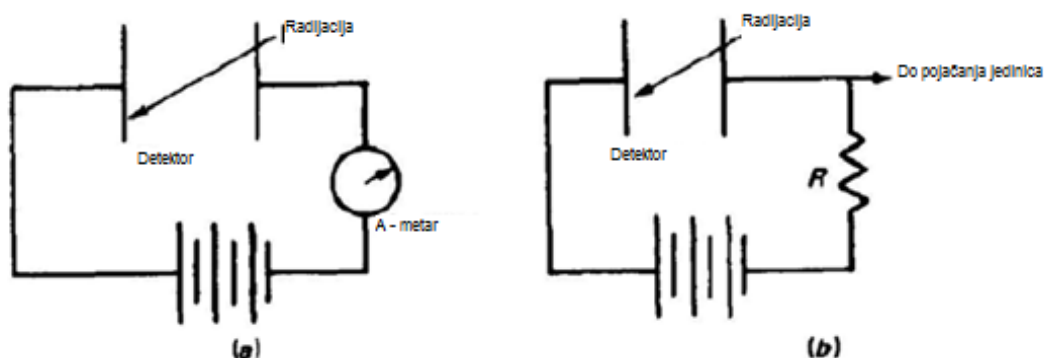
---

<sup>8</sup> *As Low As Reasonably Achievable*

## 2. 10. Uređaji za mjerenje zračenja

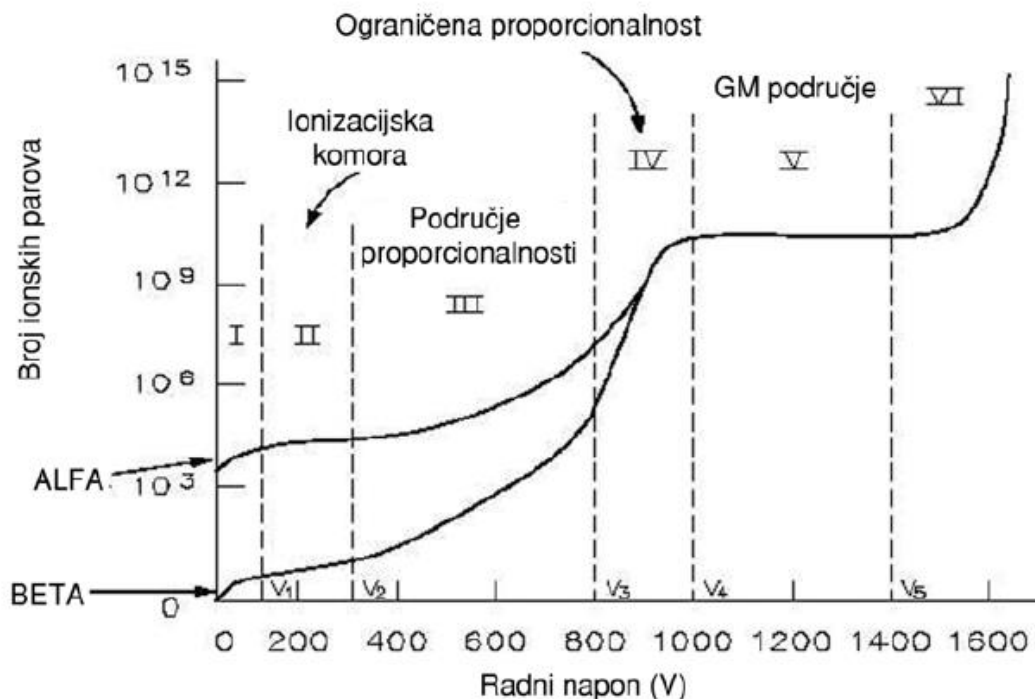
### 2. 10. 1. Plinski brojači

Plinski brojači koriste ionizaciju koju uzrokuje zračenje prilikom prolaska kroz plin. Navedeni se brojač sastoji od dvije elektrode uronjene u plin, a na njih je nametnut električni potencijal koji stvara električno polje između elektroda. Ionizirajuće zračenje, prolazeći između spomenutih elektroda, troši dio ili cijelu svoju energiju generirajući elektron - ion parove. Oba člana para nositelji su naboja i gibaju se pod utjecajem električnog polja te tako uzrokuju električnu struju, a njezinom registracijom može se odrediti energija koju je zračenje predalo plinu. Alternativno, primjenom nuklearne elektronike može se ionizacija koju proizvode pojedine čestice (ili gama-foton) pretvoriti u električni puls te se na taj način može brojiti svaka pojedina čestica. Prvi tip (Slika 14 a) naziva se strujnom komorom, a drugi tip (Slika 14 b) naziva se pulsnom komorom [41].



**Slika 14:** Shema plinskih brojača [41]

Plinski brojači imaju tri područja rada, a ona ovise o jakosti električnog polja u njima. Slika 15 prikazuje karakterističnu ovisnost broja električnih pulseva prilikom detekcije alfa i beta-čestice o jakosti polja. Tipovi su plinskih brojača ionizacijske komore, proporcionalni brojači i GM brojači (Geiger-Müllerov) [42].



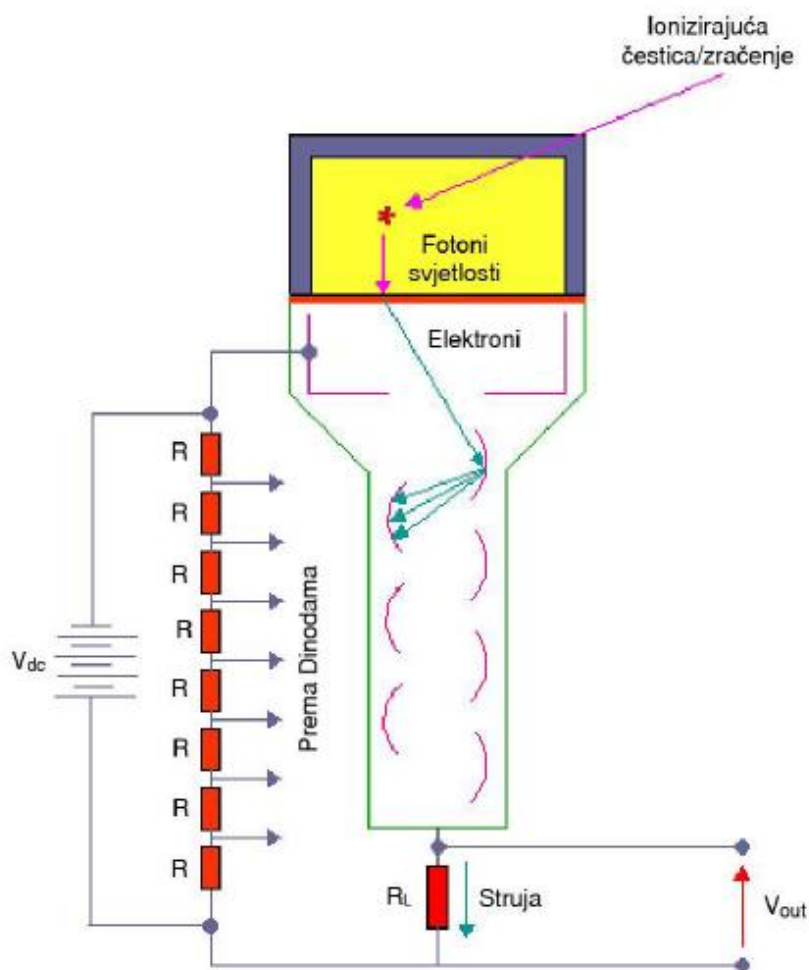
**Slika 15:** Područje rada plinskih brojača [41]

## 2. 10. 2. Scintilacijski

Scintilacije su povijesno bile prvi indikator postojanja nevidljivog ionizacijskog zračenja, a to je bilo paralelno s otkrićem rendgenskih zračenja (fluorescencija zastora obasjanog rendgenskim zrakama). Suvremeni su scintilacijski detektori standardni detektori za gama-zrake. Najveći dio prodornih gama-zraka kroz plinske bi brojače prošao bez ikakve interakcije, dakle, ne bi bio registriran. Zbog toga je za detekciju gama-zraka potreban gusti medij.

Scintilacijski detektor sastoji se od tijela scintilatora, tvari u kojima postoje centri scintilacija koji se pune interakcijom s ionizirajućim zračenjem i relaksiraju nakon, u kratkom vremenu emitiranjem bljeska karakterističnog za materijal scintilatora [42].



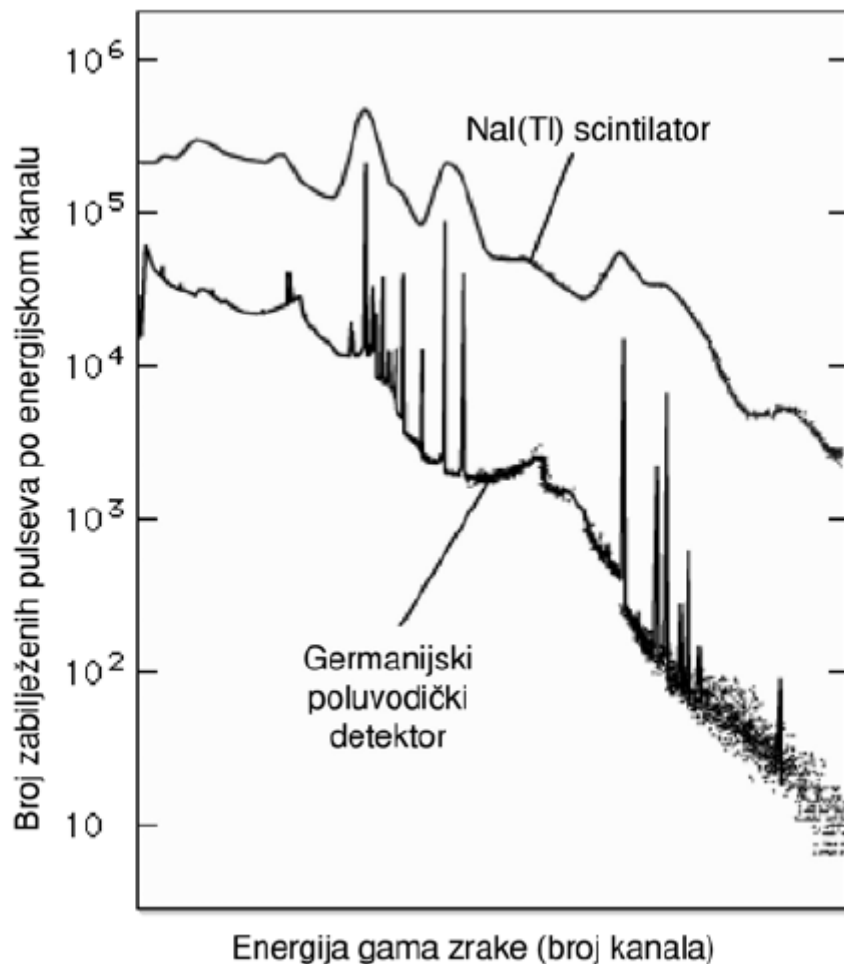


**Slika 16:** Shematski prikaz scintilacijskog detektora s fotomultiplikatorom [42]

### 2. 10. 3. Poluvodički

Poluvodički detektori najbolji su detektori gama-zraka zbog efikasnosti i zbog razlučivanja bliskih energija. Germanij je formiran u veliku PN diodu dopiranjem s atomima donora i akceptora. Između N-tipa i P-tipa germanija formira se osiromašeni sloj u kojem nema slobodnih nositelja naboja elektrona i šupljina. Dodatno jako vanjsko električno polje proširuje spomenuti sloj i još ga čisti od slobodnih nositelja naboja koji nastaju termičkim gibanjem atoma germanija. Da bi se optimiziralo mjerenje i smanjio šum izazvan termičkim gibanjem, tijekom mjerenja potrebno je držati germanij na niskoj temperaturi tekućeg dušika (oko  $-200^{\circ}\text{C}$ ). Apsorpcija gama-zrake unutar osiromašenog područja s nekim od tri glavne interakcije rezultira

formiranjem parova elektron - šupljina koji se priključuju N i P područjima formirajući na taj način na karti električni puls kojeg pojačava, analizira i registrira nuklearna instrumentacija. Rezultat mjerenja scintilacijskim i germanijskim detektorom prikazan je na Slici 17. Može se uočiti znatno veća razlučivost poluvodičkog germanijskog detektora [42].



**Slika 17:** Rezultat mjerenja scintilacijskim i germanijskim detektorom [41]

## 2. 10. 4. Neutronske detektore

Neutroni se detektiraju preko nabijenih čestica koje u interakcijama proizvode. Za svaku energetska skupinu neutrona razvijene su prikladne metode detekcije i određivanja energije. Za termalne neutrone ( $E = 0,025 \text{ eV}$ ) koriste se vrlo veliki udarni presjeci za njihov uхват u neke jezgre, a to rezultira nuklearnom reakcijom čiji je rezultat emisija nabijene čestice koja se lako detektira.

Primjeri su uхват u boru ( $^{10}\text{B}$ ), litiju ( $^6\text{Li}$ ) i izotopu helija ( $^3\text{He}$ ). U prva dva slučaja emitira se alfa-čestica, a u trećem proton i triton ( $^3\text{H}$ ) [41].



**Slika 18:** Prijenosni detektor za neutrone [41]

### **3. Mjerenje brzine ambijentalnog doznog ekvivalenta u Donjem Miholjcu**

Prema Godišnjem izvješću o praćenju kvalitete zraka na području Republike Hrvatske za 2016. godinu [43], Donji Miholjac na području Osječko-baranjske županije pripada zoni HR 1 – kontinentalna Hrvatska. Najbliža je mjerna postaja Zoljan kod Našica koja se nalazi jugozapadno na oko 33 km udaljenosti od lokacije mjerenja. Budući da mjerna postaja Zoljan nije imala sve potrebne podatke koji su trebali za izradu diplomskog rada, DHMZ je poslao podatke mjerne postaje Čepin koja je udaljena oko 60 km istočno od grada Donjeg Miholjca.

Istraživački dio ovog rada obuhvatio je mjerenje brzine ambijentalnog doznog ekvivalenta na području Donjeg Miholjca, a cilj mjerenja bio je procjena mogućeg ozračenja stanovništva te identificiranje potencijalnih izvora ionizirajućeg zračenja. Na kraju su dobivenim podacima pridruženi odgovarajući položajni i atributni podatci te je napravljen grafički prikaz u ArcGis 10 aplikaciji.

#### **3. 1. Korišteni instrumenti i aplikacije**

Prilikom prikupljanja mjernih podataka te u obradi i analizi rezultata mjerenja koristili su se sljedeći instrumenti i aplikacije:

1. mjerni instrument RDS-31 S/R *Multi-Purpose Survey Meter*,
2. konfiguracijski softver CSW-31 za uređaj RDS-31,
3. ArcGIS 10,
4. *GPS Coordinates*.

Sve aplikacije za prikupljanje i obradu podataka besplatne su i izvorni programski kod za njih javno je dostupan.

### **3. 1. 1. RDS-31 S/R *Multi-Purpose Survey Meter***

RDS-31 S/R višenamjenski je instrument za mjerenje te je nastavak linije RADOS mjernih instrumenata. Ovaj mjerni instrument omogućava pristup brojnim aplikacijama za praćenje zračenja. RDS-31 mali je ručni mjerni instrument koji koristi GM cijev kao primarni detektor. Ima širok raspon primjene u civilnoj obrani, vatrogastvu, sustavu za spašavanje, industriji, u laboratorijima i dr. [44].

Uz prateći konfiguracijski softver jednostavno se može optimizirati ponašanje ovog mjernog instrumenta da bi se zadovoljili različiti uvjeti primjene. Ovaj mjerni instrument maksimalno se prilagođava korisniku gdje on želi mjeriti ionizirajuće zračenje u nekom prirodnom ili radnom okruženju. RDS-31 ima dobru ergonomiju, a ona se očituje u tome da je riječ o laganom i jednostavnom za rukovanje mjernom instrumentu.

Veliki LCD s pozadinskim osvjetljenjem može se jednostavno čitati i u potpunom mraku, ali i u doticaju s izravnom sunčevom svjetlošću. Da bi se povećala jednostavnost korištenja instrumenta, moguće je napraviti prečac te se na taj način omogućava jednostavno izvođenje određenih operacija, primjerice, prikaz vrijednosti doza, dijagnostika itd. Prečac funkcije daju i druge mogućnosti kojima se olakšava primjena mjernog instrumenta u praksi [17].

RDS-31 kompaktni je detektor gama-zračenja na bazi GM-a. Nadopunjava ga čitav niz vanjskih sondi za otkrivanje alfa i beta-zračenja. Njegove svestrane funkcije čine ga pogodnim za različite primjene. Jednostavnim kabelskim priključkom mogu se proširiti mogućnosti RDS-31, a to se odnosi i na otkrivanje i mjerenje drugih vrsta zračenja sa sonde GMP-25/11-3/15-3/12 i ABP-150 [45].



**Slika 19: RDS-31 [45]**

Vanjski su detektori koji se mogu priključiti na vanjski instrument GMP-12, GMP-11, GMP-11/GMP-15 alfa/beta/gama sonde. Također, gama kontaminacija, alfa rama i alfa 125 mogu biti sonde spojene na RDS-31. Navedeni se detektori osnovnom instrumentu mogu dodati pomoću adapterskog kabla. Upotreba adapterskog kabla pruža korisnicima jednostavan način ažuriranja instrumenata uz zadržavanje postojećih vanjskih detektora [44].

Osvjetljenje uređaja može se prilagoditi stanju svjetlosti u prostoru. Također, moguće je prilagođavati područje zaslona, odnosno može se provjeriti je li LCD modul operativan. Priključak je za vanjski detektor i vanjski punjač na dnu instrumenta. Na tom mjestu nalazi se i utor za učvršćivanje remena za ručni zglob. Okrugli konektor koristi se za vanjske sonde, kableske spojeve i za vanjske alarmne uređaje.



**Slika 20: Priključak RDS-31 [44]**

Iznad zaslona instrumenta nalaze se dvije tipke. One osiguravaju da korisnik uvijek ima najbolji mogući zahvat na instrumentu, čak i kada koristi tipke. Tipke se razlikuju po simbolima koji se na njima nalaze. Jedna tipka služi za uključivanje/isključivanje uređaja, dok je druga tipka namijenjena pretraživanju, odnosno korištenje izbornika [44].

### 3. 1. 2. CSW-31

CSW-31 konfiguracijski je softver za RDS-31, a temeljna mu je zadaća povezivanje mjernog instrumenta i računala. Softver daje mogućnost izmjene postavki i funkcija, ali se isto tako mogu postavljati drugi parametri koji olakšavaju provedbu pojedinih mjerenja. Računalo se s mjernim instrumentom povezuje pomoću RF-a ili USB-a [46].



**Slika 21:** CSW-31 [19]

RDS-31 ima prečace za olakšavanje aktivnosti, a te se funkcije mogu konfigurirati pomoću CSW-31 softvera. Besplatnom inačicom (LITE) CSW-31 softver funkcije izbornika mogu biti konfigurirane na RDS-31 instrument. S XSW-31 PRO postoje dodatne značajke koje se mogu konfigurirati u prečac na instrumentu. S

CSW-31 LITE može se doći do jednog prečaca izbornika. Pomoću CSW-31 PRO korisnik može konfigurirati dva prečaca na obje tipke ([?] i [≡]).

**Tablica 12: CSW-31 LITE [44]**

ShortCut	Function	Time
ShortCut-1	Not In Use	
ShortCut-2	Not In Use	
ShortCut-3	Not In Use	
ShortCut-4	Long press of [≡]	Pressing more than 2s

GMP-12SD/12UW novi je model vanjskih sonde. Kućište s promjerom od 35 mm omogućava ponovnu kalibraciju sonde i to najčešće kalibracijskim jedinicama. Ova vanjska sonda poboljšava sposobnosti prepoznavanja RDS-31. Dizajnirana je tako da može zadovoljiti najzahtjevnije primjene u nuklearnoj industriji, HLS-u i civilnoj obrani te u industrijskoj upotrebi. Sonde GMP-12SD/12 UW namijenjene su gama i rendgenskom zračenju. Izmjerena je količina ambijentalni dozni ekvivalent ( $H^*(10)$ ). RDS-31 prepoznaje vezu sonde te korisnik može odabrati odgovarajuću vrstu s popisa prijedloga za postavljanje očitavanja brojila na željenu mjernu jedinicu. Koeficijent umjeravanja za GMP-12SD/12UW korisnik može preuzeti na RDS-31 instrument pomoću CSW-31 konfiguracijskog softvera [47].

### 3. 1. 3. ArcGis

ArcGis softver pokriva širok spektar sofisticiranih GIS (engl. *Geographic Information System*) alata. Može se koristiti u stolnim, poslužiteljskim i mobilnim okruženjima. Također, dobar je za istraživanje i poučavanje. ArcGis 10 omogućava usmjeravanje i geokodiranje [48].



### 3. 1. 4. GPS Coordinates

GPS *Coordinates* besplatna je i jednostavna za korištenje GPS aplikacija za *Android* mobitele. Koristi se za *online* i *offline* navigaciju, snimanje tragova, bilježenje interesnih točaka s dodatnim informacijama i dr. Ova aplikacija ima mogućnost unosa i pohrane gotovih karata i ruta. Aplikacija je javno dostupna i otvorenog je koda, a to znači da je besplatna i da si korisnik može prilagoditi pojedine parametre u aplikaciji [49].

### 3. 1. 5. Priprema mjernog uređaja RDS-31

Prvo je na računalo instaliran konfiguracijski softver CSW-31 te je potom pomoću USB konektora spojen uređaj RDS-31 na računalo. Pokrenut je CSW-31, uključen uređaj te se pričekalo da program prepozna i ispiše osnovne informacije o uređaju na kartici *Main*. Nakon što je uspostavljena veza između uređaja i konfiguracijskog softvera, u tablici *Link type-Status* pisalo je *Connected: 1*.

Na kartici *Clock* postavljen je sistemski sat uređaja. Podatak o trenutnom datumu/vremenu preuzet je od računala klikom na gumb *Set PC time*. Sistemski sat uređaja može izgubiti podatak o trenutnom datumu/vremenu ako se izvade baterije iz uređaja na više od jedne minute. Iz navedenog je bila važna provjera je li sistemski sat uređaja usklađen s trenutnim datumom/vremenom, a to je provjereno klikom na tipku *Get*.

Na kartici *Configuration* odabrane su opcije za koje se željelo da budu vidljive i dostupne u izborniku uređaja. Uključena je opcija *Manual store* za histogram, a ta je opcija potrebna za ručno pohranjivanje podataka o mjerenju u proizvoljnom trenutku. Kartica *Histogram* bila je bitna u ovom istraživanju jer ona omogućava dobivanje uvida u prikupljene podatke mjerenja s uređaja, a do tih podataka dolazi se klikom na gumb *Read Data*. U ovoj se kartici može odrediti koji se podatci žele uključiti u mjerenja te se odabrani podaci prikazuju u histogramu. Također, postoji mogućnost selekcije dobivenih podataka iz histograma. Ovdje se može postaviti i vrijeme

uzorkovanja. Nadalje, uređaj ima mogućnost bilježenja lokacije na kojoj se izvodilo mjerenje.

### 3. 2. Prikupljanje podataka

Prikupljanje podataka postupak je koji uključuje praćenje vrijednosti za brzinu ambijentalnog doznog ekvivalenta ( $H^*(10)$ ) i bilježenje dobivenih podataka korištenjem mjernog uređaja RDS-31 na otvorenom prostoru u Donjem Miholjcu, na jednoj lokaciji. Podatci su se prikupljali na jednoj lokaciji (u dvorištu autorice ovog rada), na visini od 1 m od tla i pod nadstrešnicom (kako mjerni instrument ne bi bio izravno na suncu ili da po njemu ne bi padala kiša).

Da bi se prikupljanje mjernih podataka ograničilo samo na područje Donjeg Miholjca, u GPS Coordinates dodan je sloj s istaknutim granicama Donjeg Miholjca.

Nakon toga su na mjernim točkama izvršene potrebne korekcije, a prilikom izvođenja mjerenja u obzir su se uzeli sljedeći faktori:

- geografski podatci o lokacijama mjerenja,
- datum i vrijeme izvođenja mjerenja,
- vremenski interval uzorkovanja,
- metode provođenja mjerenja,
- meteorološki podatci za razdoblje izvođenja mjerenja.

Uređaj je postavljen na jednu lokaciju na vrijeme od 15 minuta, na visinu od 1 m iznad neobrađene travnate površine. Uređajem su praćene i bilježene vrijednosti ( $H^*(10)$ ) izražene u nSv/h tijekom lipnja i srpnja 2017. godine. Pomoću aplikacije *GPS Coordinates* bilježene su mjerne točke, a njima su nakon toga redom pridružene brojčane oznake i pripadne GPS koordinate. Meteorološki podatci za razdoblje izvođenja mjerenja dobiveni su od Državnog hidrometeorološkog zavoda. Mjerenja su se provodila tijekom dana s podjednakim meteorološkim uvjetima da bi anomalije u rezultatima zbog utjecaja vremenskih prilika bile svedene na minimum.

Dakle, sva mjerenja obavljena su na području grada Donjeg Miholjca, u naseljenim i nenaseljenim područjima te u industrijskoj zoni.

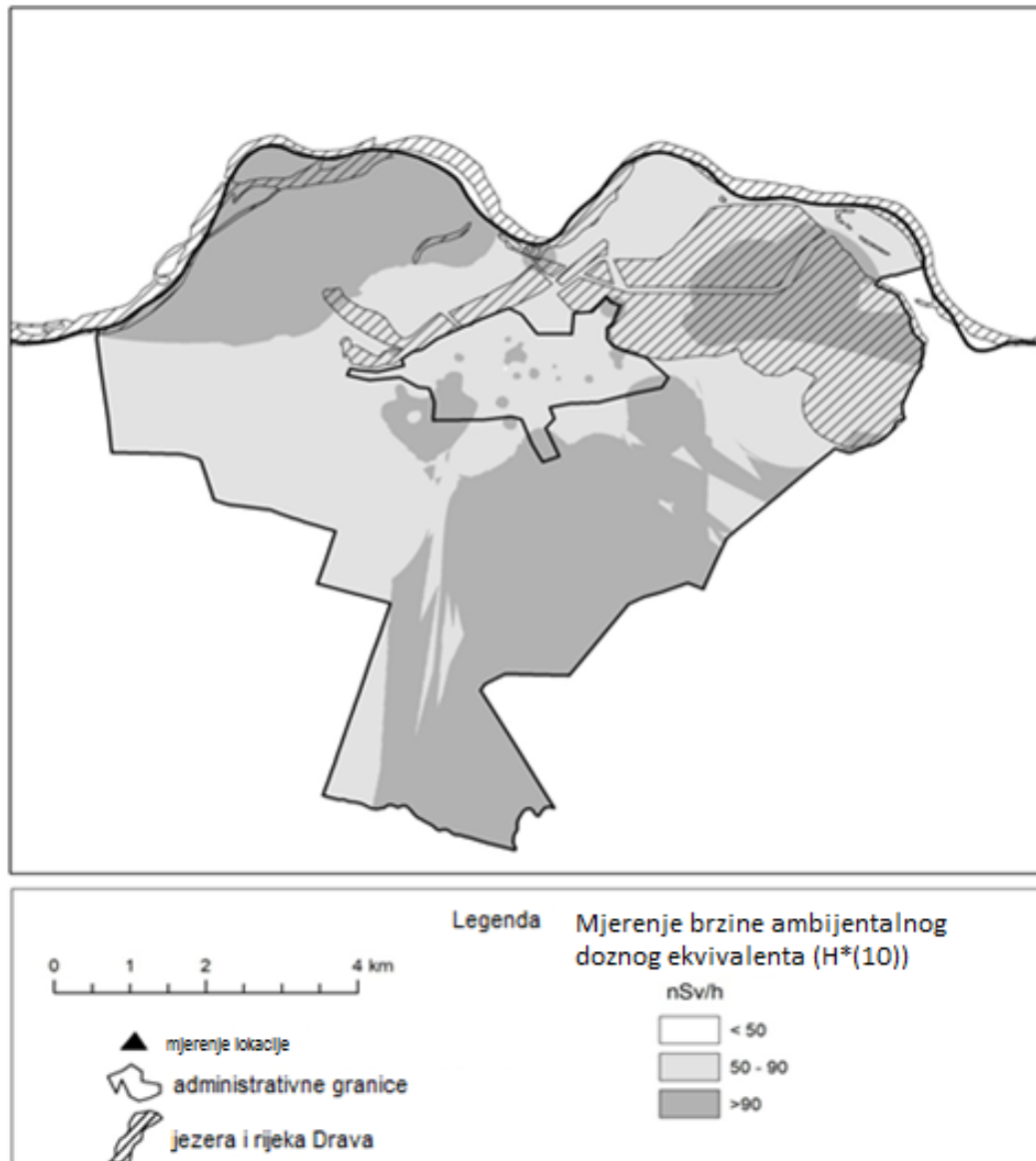
### 3. 3. Obrada podataka

Nakon što su napravljena mjerenja, dobiveni su se podatci unijeli u program ArcGIS 10 da bi se mogli dalje obrađivati. ArcGIS nudi jedinstven skup mogućnosti za primjenu analize na temelju lokacije - poboljšani uvid u kontekstualne alate za analizu i vizualizaciju podataka [50]. U ovom su programu mjerenja pridružena lokacijama te su prikazana grafički u projekcijskom referentnom sustavu (Slika 22).

Pridruživanjem mjernih podataka georeferenciranim točkama napravljena je geoprostorna baza podataka, a u njoj su obuhvaćeni geometrijski podatci o svakoj pojedinoj lokaciji mjerenja. Vežanjem na točku lokaliteta, svi podatci koji su pridruženi mjernoj točki pretvoreni su u geoprostorne podatke. Koristili smo IDW (*Inverse distance weighting*) koja je vrsta metode interpoliranja za izradu predviđanja karte i vizualizaciju naših mjerenja u dijelu s poznatim raspršenim mjernim točkama. Dodijeljene vrijednosti nepoznatim točkama izračunavaju se računalom, algoritmom, IDW od vrijednosti dostupnih na poznatim točkama [51].

Nakon unosa svih relevantnih podataka u ArcGIS 10 dobivena je mogućnost rada s unesenim podacima. To podrazumijeva mogućnost kreiranja različitih upita i izvođenje analiza za različite potrebe.

## MJERENJE BRZINE AMBIJENTALNOG DOZNOG EKVIVALENTA ( $H^*(10)$ )



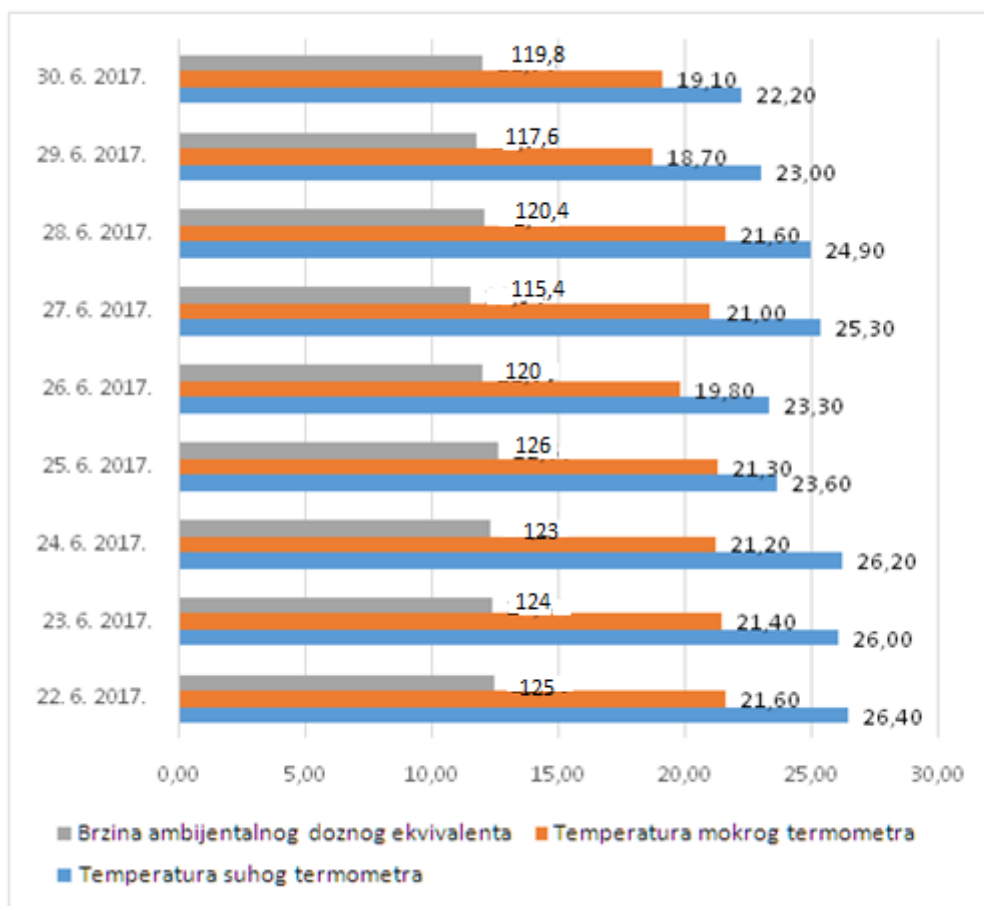
**Slika 22:** Prikaz atributnih podataka za određenu točku unutar programa ArcGIS 10

### 3. 4. Analiza rezultata, rasprava i zaključak

Izravnim mjerenjima dobivena je prosječna vrijednost za brzinu ambijentalnog doznog ekvivalenta na području Donjeg Miholjca:

$$H^*(10) = 120 \text{ nSv/h.}$$

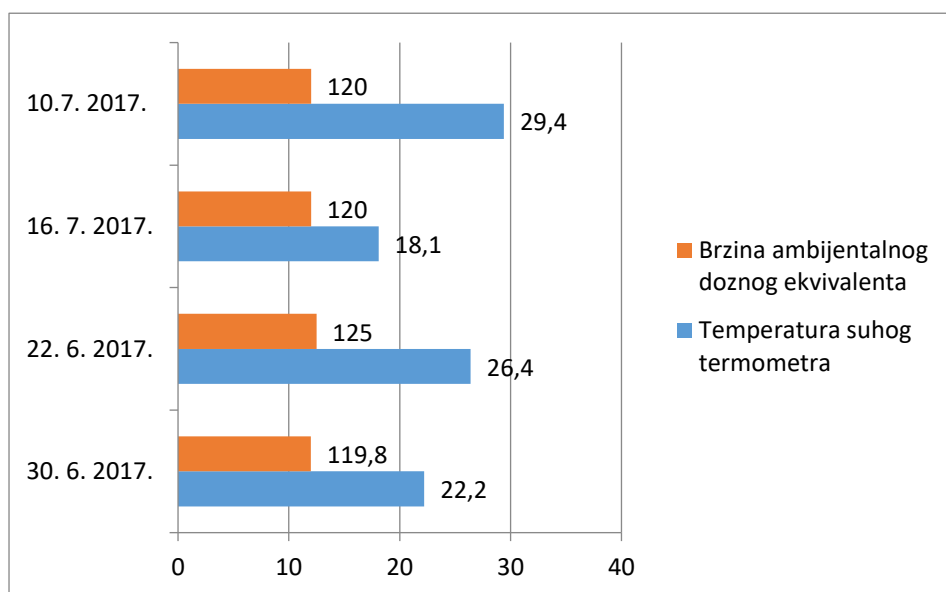
Da bi se ispitaio potencijalni utjecaj temperature na ozračenje stanovništva Donjeg Miholjca, moralo se odrediti koliki je doprinos brzini ambijentalnog doznog ekvivalenta od temperature zraka, stoga su izračunane prosječne dnevne brzine ambijentalnog doznog ekvivalenta te su grafički prikazane zajedno s prosječnim dnevnim temperaturama suhog i mokrog termometra (Grafikon 1). Izračun je rađen za mjerenja provedena u lipnju 2017. godine.



**Grafikon 1:** Prosječne dnevne temperature i brzine ambijentalnog doznog ekvivalenta u lipnju 2017. na području Donjeg Miholjca

Kao što se može vidjeti u Grafikonu 1, promjene u temperaturi, bez obzira na to radi li se o mokrom ili suhom termometru, u prosjeku su neznatno utjecale na promjenu brzine ambijentalnog doznog ekvivalenta na području Donjeg Miholjca.

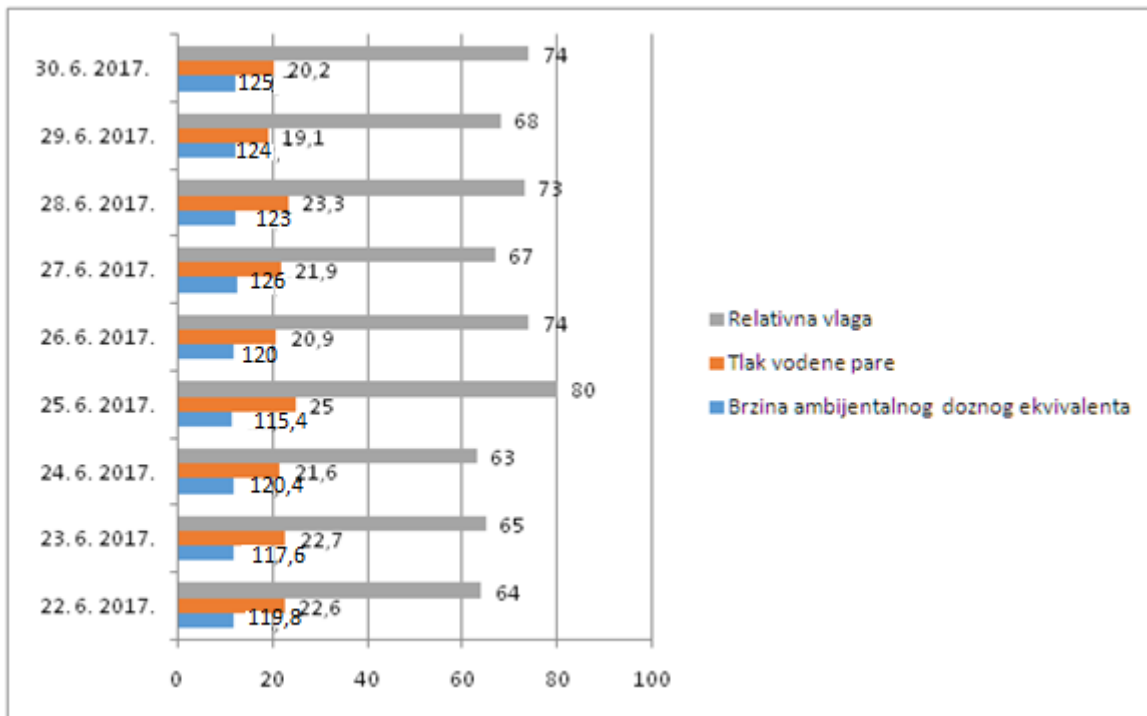
Nakon navedene analize, izračunane su prosječne brzine ambijentalnog doznog ekvivalenta u danima s najnižom i najvišom temperaturom kako bi se vidjelo postoje li ipak razlike utjecaja kada se radi o temperaturama koje su manje ili više za nekoliko stupnjeva (Grafikon 2).



**Grafikon 2:** *Prosječna brzina ambijentalnog doznog ekvivalenta pri najnižim i najvišim izmjerenim temperaturama*

Kao što se može vidjeti u Grafikonu 2, prosječne brzine ambijentalnog doznog ekvivalenta nemaju nikakav utjecaj na temperaturu suhog termometra.

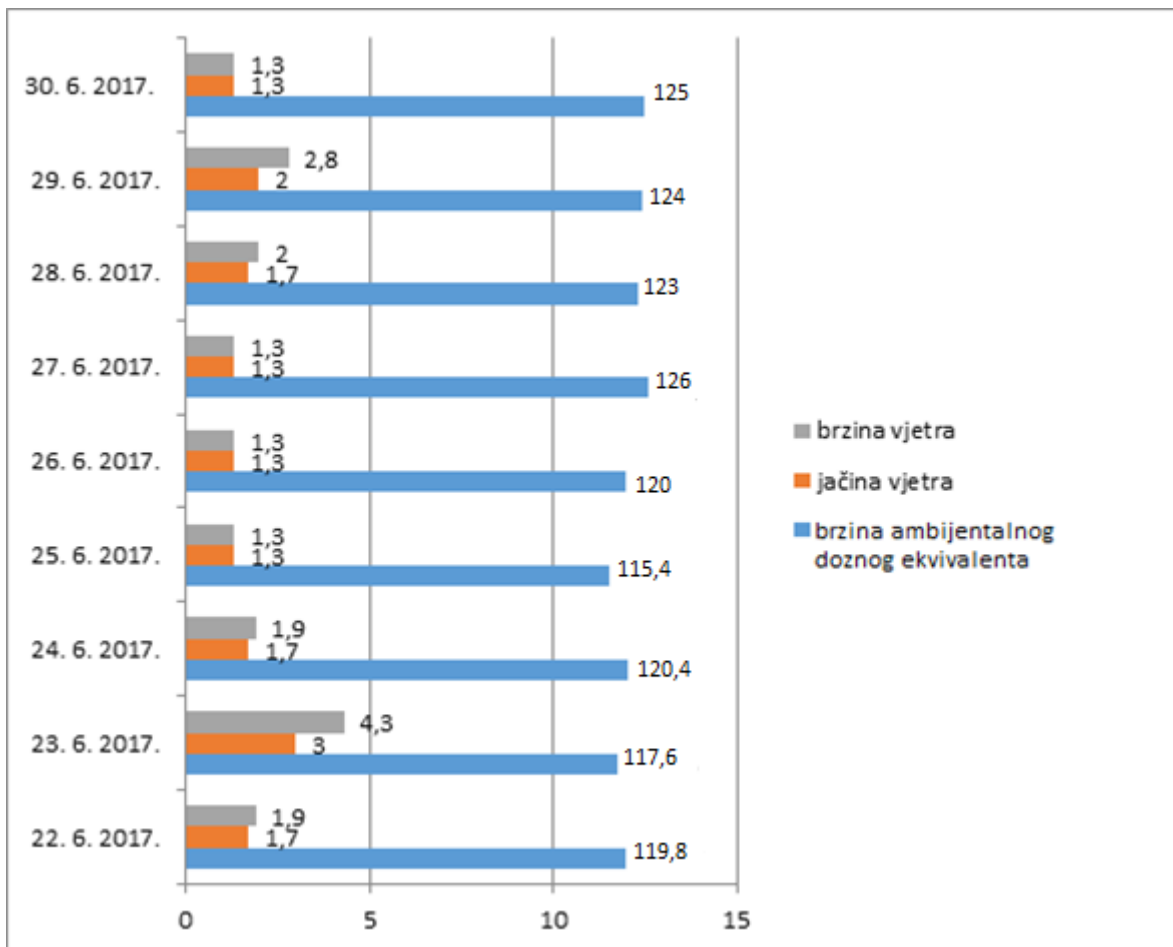
Grafikon 3 prikazuje utjecaj tlaka vodene pare i relativne vlage na brzinu ambijentalnog doznog ekvivalenta.



**Grafikon 3:** Utjecaj tlaka vodene pare i relativne vlage na brzinu ambijentalnog doznog ekvivalenta

Podatci govore da tlak vodene pare i relativna vlaga nemaju značajan utjecaj na brzinu ambijentalnog doznog ekvivalenta, odnosno da povećanje ili smanjenje tlaka vodene pare i relativne vlage ne doprinose promjeni brzine ambijentalnog doznog ekvivalenta.

Grafikon 4 prikazuje utjecaj jačine i brzine vjetra na brzinu ambijentalnog doznog ekvivalenta.



**Grafikon 4:** Utjecaj jačine i brzine vjetra na brzinu ambijentalnog doznog ekvivalenta

Grafikon 4 pokazuje da jačina i brzina vjetra nisu imale značajniji utjecaj na brzinu ambijentalnog doznog ekvivalenta. Na temelju izračuna aritmetičkih sredina te njihovih promjena, može se zaključiti da meteorološki parametri nisu imali značajniji utjecaj na brzinu ambijentalnog doznog ekvivalenta u Donjem Miholjcu.

Da bi se navedeno potvrdilo, napravljena je i statistička analiza na način da su izračunane korelacije. Za izračun stupnjeva korelacija koristila se primijenjena statistika. Stupnjevi korelacija mogu biti pozitivni ili negativni te se kreću između -1 i 1. Ako je rezultat 0, nema korelacije. Od -1 do nula su negativni, dok su od 0 do 1 pozitivni. Stupnjevi korelacije izračunani su u Excelu.



**Tablica 13:** Korelacija među brzinom ambijentalnog doznog ekvivalenta, temperaturom suhog zraka, relativnom vlagom i jačinom vjetra

lipanj				
datum	Brzina ambijentalnog doznog ekvivalenta, nSV/h	Temperatura suhog barometra, °C	Relativna vlaga, %	Jačina vjetra, bof
22	125	26,4	64	1,7
23	124	26	65	3
24	123	26,2	63	1,7
25	126	23,6	80	1,3
26	120	23,2	74	1,3
27	115,4	25,3	67	1,3
28	120,4	24,9	73	1,7
29	117,6	23	68	2
30	119,8	22,2	74	1,3
	<b><u>STUPANJ KORELACIJE</u></b>	0,349	0,065	0,258

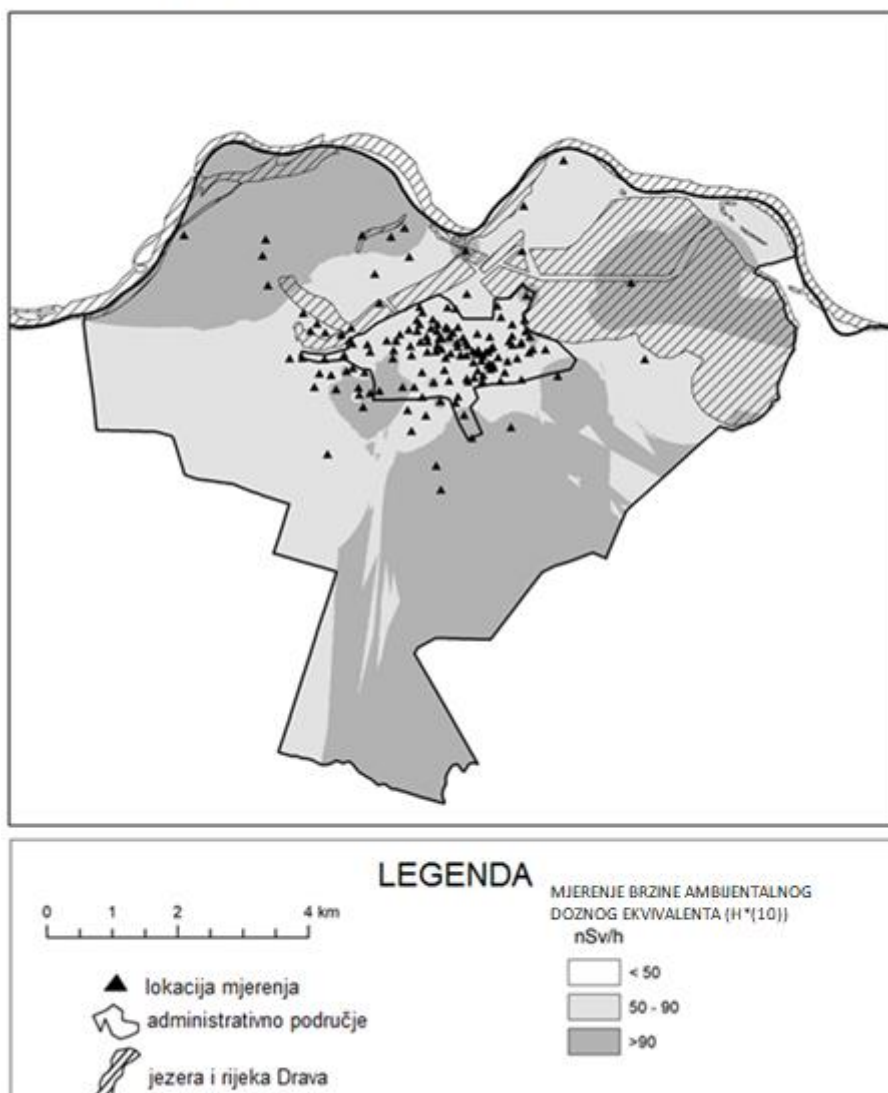
Izračun korelacija aritmetičkih sredina ambijentalnog doznog ekvivalenta izmjerenog u Donjem Miholjcu te temperature suhog barometra pokazuju da je stupanj korelacije pozitivan, ali relativno slab. Korelacijski podatci između aritmetičkih sredina ambijentalnog doznog ekvivalenta i relativne vlage u Donjem Miholjcu pokazuju da je korelacija niska. Izračun korelacije aritmetičke sredine jačine vjetra i ambijentalnog doznog ekvivalenta pokazuje da je korelacija pozitivna iako je relativno slaba.

Na temelju dva načina usporedbe podataka može se reći da u Donjem Miholjcu meteorološki čimbenici neznatno utječu na brzinu ambijentalnog doznog ekvivalenta te da oni nisu ključni za rast ili pad njegove brzine.

Na temelju provedene analize može se zaključiti da promjene temperature, vodene pare, relativne vlage te jačine i brzine vjeta nemaju značajan utjecaj na brzinu ambijentalnog doznog ekvivalenta u Donjem Miholjcu. Također, može se zaključiti da razina ambijentalnog doznog ekvivalenta u Donjem Miholjcu nije iznad hrvatskog prosjeka.

Mjerenja su rađena još na 150 različitih lokacija tijekom sedmog i osmog mjeseca, a prikaz je tih lokacija je na slici u nastavku.

### MJERENJE BRZINE AMBIJENTALNOG DOZNOG EKVIVALENTA ( $H^*(10)$ )



Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Department of Physics, November 2017.

## **4. Zaključak**

Čovjek je svakodnevno izložen prirodnim i umjetnim zračenjima, a količina izloženosti ovisi o samom prostoru gdje živi, gdje radi i kuda se kreće. Prirodna pozadinska zračenja pod utjecajem su geološke građe nekog prostora, dok su količine umjetnih izvora zračenja pod utjecajem ljudskih aktivnosti.

Danas se puno zna o učincima kontaminacije na žive organizme, pa tako i na čovjeka. Iz navedenog razloga sve se više prati kontaminacija industrijskih i nuklearnih postrojenja u urbanim sredinama, a cilj je sprečavanje štetnog utjecaja zračenja na okoliš i ljudski organizam. Iako su danas umjetni izvori ionizirajućeg zračenja bitan čimbenik koji utječe na kvalitetu života, u ovom je radu bio naglasak na ispitivanju prirodnih čimbenika koji mogu utjecati na ionizirajuće zračenje u prostoru.

Rezultati mjerenja ( $H^*(10)$ ) pokazali su da promjena temperature zraka, vodene pare, relativne vlage te brzine i jačine vjetra nemaju bitan utjecaj na povećanje brzine ambijentalnog doznog ekvivalenta na području Donjeg Miholjca. Također, istraživanja su pokazala da su dobivene vrijednosti brzine ambijentalnog doznog ekvivalenta u Donjem Miholjcu u okviru prosječnih vrijednosti za Republiku Hrvatsku.

Mjerenja su rađena na još 150 različitih lokacija tijekom 7. i 8. mjeseca 2017. godine te nema razlike među mjerenjima koja su se radila na jednoj lokaciji i onih koja su se radila na 150 različitih lokacija.

## Literatura

- [1] <https://repositorij.fkit.unizg.hr/islandora/object/fkit%3A13/datastream/PDF/view> (14. 4. 2018.)
- [2] <https://www.fsb.unizg.hr/termovel/Zracenje.html> (12. 1. 2018.)
- [3] <http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=51501> (13. 1. 2018.)
- [4] <http://radioaktivniotpad.org/radioaktivnost/> (13. 1. 2018.)
- [5] <http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=51474> (14. 4. 2018.)
- [6] <http://www.holo.hr/Formule/Pregled/tabid/62/cid/F6/fid/Fiz14-04/Default.aspx> (13. 1. 2018.)
- [7] [http://www.ss-prva-tehnicka-tesla-zg.skole.hr/uploads/media/vecernja/upload09032016/Nuklearna\\_fizika.pdf](http://www.ss-prva-tehnicka-tesla-zg.skole.hr/uploads/media/vecernja/upload09032016/Nuklearna_fizika.pdf) (15. 2. 2018.)
- [8] *International Atomic Energy Agency (IAEA). 2014. Nuclear Medicine Physics: A Handbook for Teachers and Students.*
- [9] <https://cancer-code-europe.iarc.fr/index.php/hr/12-nacina/zracenje/2713-sto-je-bdquo-zracenje-rdquo-kakve-vrste-zracenja-postoje> (12. 2. 2018.)
- [10] *Canadian Nuclear Safety Commission (CNSC). 2012. Introduction to Radiation.*
- [11] <http://www.enciklopedija.hr> (11. 2. 2018.)
- [12] Tubiana, M. 1996. *Wilhelm Conrad Röntgen and the discovery of X-rays.* 180(1):97-108. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/8696882>
- [13] [http://www.fzsri.uniri.hr/files/FAKULTET/KATEDRE/Katedra\\_temeljne/Microsoft%20Word%20-%20Radioaktivnost\\_Primjena%20u%20medicini\\_povjerenstvo\\_Z.pdf](http://www.fzsri.uniri.hr/files/FAKULTET/KATEDRE/Katedra_temeljne/Microsoft%20Word%20-%20Radioaktivnost_Primjena%20u%20medicini_povjerenstvo_Z.pdf) (17. 2. 2018.)
- [14] Eterović, D.; Janković, S. 2002. *Fizikalne osnove i klinički aspekti medicinske dijagnostike.* Medicinska naklada. Zagreb.

- [15] Kukuljan, M. *Kompjutorska Tomografija*. <http://www.zzjzpgz.hr/nzl/31/aparati.htm> (1. 3. 2018.)
- [16] Petranović, D. *Magnetska rezonancija*. <http://www.zzjzpgz.hr/nzl/31/aparati.html> (1. 3. 2018.)
- [17] <http://ozs.unist.hr/~fmihanov/nastava/KBF/PiZ/Radiolo%C5%A1ki%20ure%C4%91aji.pdf> (20. 2. 2018.)
- [18] Hebrang A.; Klarić-Čustović, R. 2007. *Radiologija*. Medicinska naklada. Zagreb.
- [19] Jakobović, Z. 1991. *Ionizirajuće zračenje i čovjek*, Školska knjiga. Zagreb.
- [20] Brooks, L. S. 2008. *Doze zračenja kod uobičajnih stomatoloških radioloških pretraga: pregled*. Stomatološki fakultet Michiganskog sveučilišta.
- [21] Brumen, V. et. al. 2002. *Ionizirajuće zračenje*. Medicinska naklada. Zagreb.
- [22] Turner, J. 2007. *Atoms, Radiation, and Radiation Protection*. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KgaA. Weinheim.
- [23] <http://web.zpr.fer.hr/ergonomija/2004/librenjak/izvori.html> (22. 2. 2018.)
- [24] Kovač, E. 2002. *Ionizirajuće zračenje: izvori, mjerenje, prevencija*. <http://web.zpr.fer.hr/ergonomija/2001/kovac/ionzra.pdf> (17. 2. 2018.)
- [25] <http://web.zpr.fer.hr/ergonomija/2004/librenjak/umjetni.htm> (1. 3. 2018.)
- [26] <http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=16088> (2. 3. 3018.)
- [27] Surić Mihić, M. et. al. 2013. *Koncept osobne dozimetrije i osnovne fizikalne veličine u osobnoj dozimetriji*, HDKBR INFO Magazin, Vol.3 No.4. 13 - 23.
- [28] Alihodžić, M. 2016. *Proračun očekivane efektivne doze i organ doze kod dijagnostičkih procedura u nuklearnoj medicini sa  $^{99m}\text{Tc}$  i  $^{131}\text{I}$* . Završni - magistarski rad. <file:///C:/Users/Goga/Downloads/mag.rad.fiz.2016.04.pdf> (1. 3. 2018.)
- [29] <https://dr.nsk.hr/islandora/object/pmf%3A1761/datastream/PDF/view> (10. 3. 2018.)
- [30] <http://hr.winesino.com/public-health-safety/environmental-health/1016070387.html> (12. 3. 2018.)

- [31] Marić, D. 2016. *Procena radijacionog rizika za profesionalno izloženo osoblje pri radu sa  $^{99m}\text{Tc}$  i  $^{131}\text{I}$* . 2016. Diplomski rad [http://www.df.uns.ac.rs/files/200/dragana\\_maric\\_-\\_diplomski\\_rad\\_\(d-702\).pdf](http://www.df.uns.ac.rs/files/200/dragana_maric_-_diplomski_rad_(d-702).pdf) (12. 3. 2018.)
- [32] Mrčela, I. et. al. *Kalibracija optički stimuliranih luminiscentnih dozimetra (OSI) za in vivo dozimetriju u radioterapiji*. Klinička bolnica "Sestre milosrdnice", Klinika za onkologiju i nuklearnu medicinu. Zagreb. <http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/Public/42/109/42109511.pdf> (15. 3. 2018.)
- [33] [www.pmf.unsa.ba/fizika/images/nastavni.../Uvod.../12-2%20Licni\\_dozimetri.ppt](http://www.pmf.unsa.ba/fizika/images/nastavni.../Uvod.../12-2%20Licni_dozimetri.ppt) (15. 3. 2018.)
- [34] <https://dr.nsk.hr/islandora/object/pmf:1761/preview> (18. 4. 2018.)
- [35] *International Atomic Energy Agency (IAEA). 2005. Radiation Oncology Physics: A Handbook for Teachers and Students.*
- [36] Alvarez, J. L. 2001. *Measurement of External Effective Dose*. Jacksonville.
- [37] Zakon o radiološkoj i nuklearnoj sigurnosti, NN 141/2013
- [38] Pravilnik o granicama ozračenja, NN 59/2013
- [39] <https://www.epa.gov/radiation/protecting-yourself-radiation> (12. 3. 2018.)
- [40] *International Atomic Energy Agency (IAEA). 2007. Identification of Radioactive Sources and Devices.*
- [41] <http://www.nemis.hr/index.php/radioaktivnost/detekcija-i-zastita-od-zracenja.html> (18. 4. 2018.)
- [42] [file:///C:/Users/PC/Desktop/sudar\\_maja\\_fizos\\_2016\\_diplo\\_sveuc.pdf](file:///C:/Users/PC/Desktop/sudar_maja_fizos_2016_diplo_sveuc.pdf) (18. 4. 2018)
- [43] Godišnje izvješće o praćenju kvalitete zraka na području Republike Hrvatske za 2016. godinu. 2017. <http://www.haop.hr/hr/godisnja-izvjesca-o-pracenju-kvalitete-zraka-na-podrucju-republike-hrvatske/godisnja-izvjesca-o> (17. 3. 2018.)
- [44] RDS-31 S/R *Multi-purpose Survey Meter User's Manual*. 2011. [http://www.laurussystems.com/Service/RDS\\_31\\_MANUAL.pdf](http://www.laurussystems.com/Service/RDS_31_MANUAL.pdf) (20. 1. 2018.)

- [45] RDS31 *Multi-Purpose Survey Meter*,  
[http://www.laurussystems.com/products/products\\_pdf/LS\\_RDS31.pdf](http://www.laurussystems.com/products/products_pdf/LS_RDS31.pdf) (20. 2. 2018.)
- [46] <http://www.gammadata.se/products/radiation-detection/accessories-radiation-detection/csw-31-configuration-software/> (20. 1. 2018.)
- [47] <https://mirion.app.box.com/s/18choqibn5f3xmdw6dfe> (1. 2. 2018.)
- [48] <https://research.csc.fi/web/research/-/arcgis> (18. 3. 2018.)
- [49] <https://www.gps-coordinates.net/> (19. 3. 2018.)
- [50] <https://www.esri.com/arcgis/about-arcgis> (18. 4. 2018.)
- [51] <http://pro.arcgis.com/en/pro-app/help/analysis/geostatistical-analyst/how-inverse-distance-weighted-interpolation-works.htm> (18. 4. 2018.)

## **Životopis**

Martina Juranek rođena je 23. 7. 1993. godine u Našicama. Pohađala je Osnovnu školu „August Harambašić“ u Donjem Miholjcu te nakon toga upisuje Opću gimnaziju u Srednjoj školi Donji Miholjac. Nakon završene gimnazije upisuje Preddiplomski studij fizike na Odjelu za fiziku kao redovan student Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku. Preddiplomski studij završava 2015. godine te iste godine upisuje Sveučilišni diplomski studij fizike i informatike. U slobodno vrijeme aktivno se bavi plesom.