

# Štitovi u funkciji zaštite od zračenja

---

Vukoja, Andrea

Master's thesis / Diplomski rad

2021

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:160:047645>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-06-28**



Repository / Repozitorij:

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



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



**ANDREA VUKOJA**

**ŠTITIVI U FUNKCIJI ZAŠTITE OD ZRAČENJA**

**Diplomski rad**

**Osijek, 2021.**

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



**ANDREA VUKOJA**

# **ŠTITIVI U FUNKCIJI ZAŠTITE OD ZRAČENJA**

**Diplomski rad**

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

Osijek, 2021.

**„Ovaj diplomski rad izrađen je u Osijeku i na Institutu za medicinska istraživanja i medicinu rada u Zagrebu pod vodstvom izv. prof. dr. sc Branka Petrinca u sklopu Sveučilišnog diplomskog studija fizike i informatike na Odjelu za fiziku Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku.“**

## *Zahvale*

*Ponajprije zahvaljujem mentoru  
izv. prof. dr. sc. Branku Petrincu na pruženoj prilici, vodstvu i  
prenesenom znanju.*

*Zahvaljujem Institutu za medicinska istraživanja i medicinu rada,  
Jedinici za zaštitu od zračenja za dobrodošlicu, ukazano povjerenje, strpljenje te  
nesebičnu pomoć prilikom izrade ovog diplomskog rada.*

## Sadržaj

<b>1. Uvod</b> .....	1
<b>2. Ionizirajuće zračenje</b> .....	2
2.1 Elektromagnetsko zračenje.....	2
2.2 Spektar elektromagnetskog zračenja .....	3
2.3 Neionizirajuće zračenje .....	4
2.4 Ionizirajuće zračenje.....	4
2.4.1 Alfa-zračenje.....	5
2.4.2 Beta-zračenje.....	6
2.4.3 Gama-zračenje .....	7
2.4.4 Rendgensko zračenje .....	8
2.4.5 Neutronska zračenje.....	8
<b>3. Izvori ionizirajućeg zračenja</b> .....	9
3.1 Prirodni izvori zračenja .....	10
3.2 Umjetni izvori zračenja .....	12
<b>4. Međudjelovanje zračenja i materije</b> .....	16
4.1 Međudjelovanje čestičnog zračenja i materije.....	16
4.2 Međudjelovanje elektromagnetskog zračenja i materije .....	18
4.2.1 Fotoelektrični učinak .....	19
4.2.2 Comptonovo raspršenje .....	20
4.2.3 Tvorba parova .....	21
4.2.4 Atenuacija elektromagnetskog zračenja u materiji .....	22
<b>5. Djelovanje ionizirajućeg zračenja na čovjeka</b> .....	25
<b>6. Zaštita od ionizirajućeg zračenja</b> .....	26
6.1 Projektiranje štitova.....	28
6.2 Vrste štitova.....	30
6.2.1 Štitovi u funkciji zaštite ljudskog tijela .....	30
6.2.2 Štitovi u funkciji zaštite uređaja .....	31
<b>7. Materijali i metode</b> .....	33
7.1 Korišteni mjerni instrumenti.....	33
7.1.1 RDS-31 S/R Multi-Purpose Survey Meter .....	33
7.1.2 FH 40 G-L10 Multi-Purpose Digital Survey Meter.....	34

7.2 Korišteni izvori zračenja.....	36
7.2.1 <sup>137</sup> Cs .....	36
7.2.2 <sup>152</sup> Eu .....	39
7.3 Korišteni štitovi .....	41
7.3.1 Olovni štit 5 cm/10 cm.....	41
7.3.2 Bakreni štit 0,5 mm/1,0 mm/1,5 mm .....	41
7.3.3 Akrilni štit 1 cm/5 cm/10 cm .....	42
7.4 Proces mjerenja.....	43
<b>8. Rezultati i rasprava .....</b>	<b>44</b>
<b>9. Zaključak .....</b>	<b>56</b>
<b>Literatura .....</b>	<b>57</b>
<b>Prilozi.....</b>	<b>IX</b>

## ŠTITTOVI U FUNKCIJI ZAŠTITE OD ZRAČENJA

ANDREA VUKOJA

### Sažetak

U prvim poglavljima diplomskog rada opisani su osnovni pojmovi iz područja ionizirajućeg zračenja. Navedena je, opisana i objašnjena podjela, izvori ionizirajućeg zračenja te međudjelovanje zračenja s materijom. Zatim je opisano djelovanje ionizirajućeg zračenja na čovjeka te načini zaštite od zračenja s naglaskom na zaštitu uz uporabu štitova. U eksperimentalnom dijelu rada provedena su mjerenja koja prikazuju učinkovitost materijala olova, bakra i polimetilmetakrilata (tzv. akril ili pleksiglas) u funkciji zaštite od gama-zračenja. Objašnjene su metode mjerenja te su opisani mjerni instrumenti, izvori zračenja i korišteni štitovi. Nadalje, dani su rezultati mjerenja koji prikazuju ovisnost brzine ambijentalnog doznog ekvivalenta odnosno brzine doze o kvadratu udaljenosti te o debljini zaštitnog materijala. Mjerenja su provedena tijekom rujna 2020. godine na Institutu za medicinska istraživanja i medicinu rada u Zagrebu u Jedinici za zaštitu od zračenja. U diplomskom se radu opisuje isključivo ionizirajuće zračenje te se u daljnjem tekstu zbog jednostavnosti često upotrebljava samo naziv zračenje.

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

**Ključne riječi:** ionizirajuće zračenje/ zaštita od zračenja/ zaštitni materijali/ brzina ambijentalnog doznog ekvivalenta.

**Mentor:** izv. prof. dr. sc. Branko Petrincec

**Ocjenjivači:**

**Rad prihvaćen:**



## SHIELDS IN THE FUNCTION OF RADIATION PROTECTION

ANDREA VUKOJA

### Abstract:

The first couple of chapters of this graduate thesis describe the basic terms that one must familiarize with when working in the field of ionising radiation. The thesis names, describes and explains the types of ionising radiation, its sources as well as radiation's interactions with the matter. What comes next is a detailed description of the effect the ionising radiation has on humans, but also the means of protection, focusing mainly on the use of shields. For the experimental portion of the thesis, the measurements that prove the efficiency of lead, copper and polymethyl methacrylate (more commonly known as acrylic glass or plexiglass) materials as protectors against the gamma radiation are conducted. Therefore, the methods of the measurements are explained and measuring instruments, the sources of radiation, as well as used shields are described. Moreover, the results of the measurements that detail the dependency of the ambient dose rate equivalent of the distance square and the thickness of the protective shield are all specified. The measurements were all done during September of 2020 in the Radiation Protection Unit with the Institute for Medical Research and Occupational Health in Zagreb. This graduate thesis focuses entirely and only on ionising radiation, which is why solely the term "radiation" was used in the continuation of the paper because of simplification.

### Thesis deposited in Department of Physics library

**Keywords:** ionizing radiation/ radiation protection/ shielding material/ ambient dose rate equivalent

**Supervisor:** Associate Professor Branko Petrinc, Ph.D.

**Reviewers:**

**Thesis accepted:**

## 1. Uvod

Ionizirajuće je zračenje sastavni dio prirode i sva su bića od svog postanka izložena zračenju iz prirodnih izvora. Ljudskom aktivnošću stvoreni su i umjetni izvori koji dodatno povećavaju dozu zračenja kojoj je svakodnevno izloženo stanovništvo. Čovjek opaža brojne pojave kojima je okružen što ionizirajuće zračenje čini iznimkom jer, kao i ostala bića, nema razvijene receptore za detekciju ionizirajućeg zračenja. Zbog štetnih učinaka koje izaziva razvila se i potreba za zaštitom. Pri radu s raznim izvorima ionizirajućeg zračenja primarni je cilj zaštita ljudi i ostalih živih bića, ali i svega što nas okružuje, na čemu ionizirajuće zračenje može prouzročiti neželjene posljedice. Upravo je proučavanje materijala koji će nas najbolje zaštititi od štetnih posljedica motivacija izrade ovog diplomskog rada.

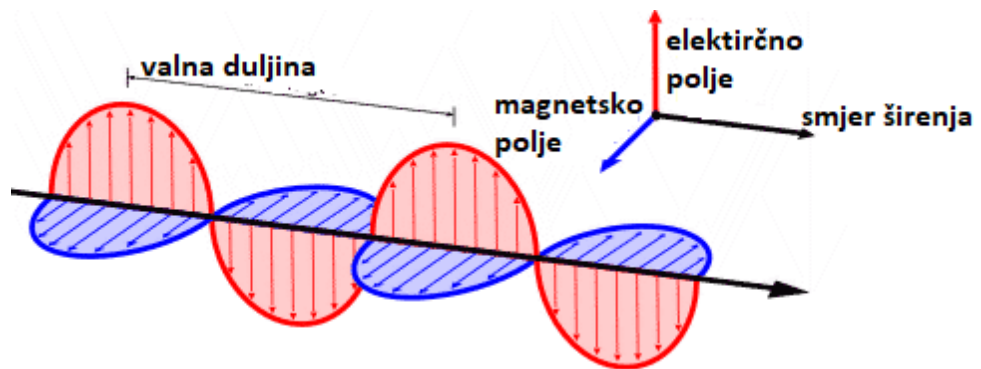
Razvojem i primjenom nuklearne tehnologije u različitim granama industrije, medicine te u znanstvenim istraživanjima zaštita od zračenja postala je jedna od važnijih znanstvenih disciplina u tom području. Stalan razvoj znanosti o zračenju doprinosi unaprjeđenju zaštite što dovodi do minimiziranja izlaganja zračenju. Jedan je od načina zaštite postavljanje štita na put zračenju u cilju smanjivanja njegova intenziteta. S obzirom na različitu prirodu kao i energiju zračenja, razlikuju se i štitovi koji se upotrebljavaju. Kako su mnogo manje potrebni za zaštitu od alfa i beta-zračenja, koji se gotovo potpuno apsorbiraju u štitu, u diplomskom se radu opisuju štitovi koji se koriste kao zaštita od gama-zračenja.

U prvom, teorijskom dijelu rada opisani su osnovni pojmovi iz područja fizike ionizirajućeg zračenja te načini zaštite od ionizirajućeg zračenja s naglaskom na zaštitu uz uporabu štitova. U eksperimentalnom dijelu rada opisani su svi materijali i metode koji su korišteni tijekom mjerenja, a zatim su prikazani rezultati mjerenja. U diplomskom radu opisuje se isključivo ionizirajuće zračenje te se nadalje u tekstu zbog jednostavnosti često upotrebljava samo kraći naziv zračenje.

## 2. Ionizirajuće zračenje

### 2.1 Elektromagnetsko zračenje

Zračenje je prirodna pojava koja predstavlja prijenos energije prostorom, prema tome elektromagnetsko zračenje možemo definirati kao širenje elektromagnetske energije prostorom. Elektromagnetska energija širi se kroz prostor u obliku elektromagnetskog vala. Elektromagnetski val nastaje međudjelovanjem električnog i magnetskog polja. Električno i magnetsko polje titraju okomito na smjer širenja elektromagnetskog vala iz čega proizlazi da su elektromagnetski valovi transverzalni valovi. Vektori oba polja mijenjaju se u vremenu te se širenje elektromagnetskog vala prikazuje slikom:

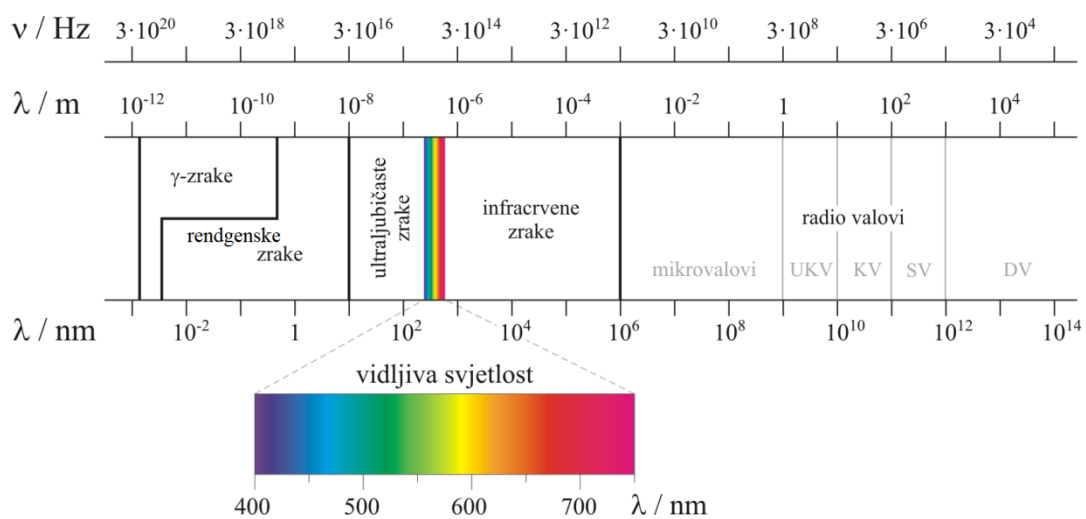


Slika 1: Širenje EM vala u prostoru [1]

Elektromagnetskim valovima nije potrebno sredstvo za širenje prostorom (šire se u vakuumu) jer je prijenos energije omogućen titranjem električnog i magnetskog polja. U vakuumu se šire brzinom od  $3 \cdot 10^8$  m/s, najvećom brzinom u prirodi, dok širenje u različitim sredstvima ovisi o električnim i magnetskim svojstvima tog sredstva. Izvor elektromagnetskih valova može biti titranje atoma i molekula u tvarima ili električni titrajni krug.

## 2.2 Spektar elektromagnetskog zračenja

Raspon mogućih valnih duljina elektromagnetskog vala naziva se spektar elektromagnetskog zračenja. Valovi različitih valnih duljina dolaze iz različitih izvora i imaju različito djelovanje na materiju. Elektromagnetske valove klasificiramo prema tipu izvora iz kojeg dolaze, ali te granice nisu uvijek oštre. [2] Spektar elektromagnetskih valova dijeli se na područja: radiovalovi, mikrovalovi, infracrveno zračenje, vidljiva svjetlost, ultraljubičasto zračenje, rendgensko ( $\gamma$ ) zračenje, gama ( $\gamma$ ) zračenje te kozmičko zračenje kako je prikazano na slici.



Slika 2: Elektromagnetski spektar [3]

Valnu duljinu i frekvenciju elektromagnetskog vala povezuje izraz:

$$c = \lambda \cdot f$$

pri čemu je  $c$  brzina svjetlosti,  $c = 3 \cdot 10^8$  m/s.

Što je valna duljina manja, tj. frekvencija veća elektromagnetskim valom prenosi se više energije. Sva zračenja elektromagnetskog spektra u međudjelovanju s biološkim medijem ostvaruju biološki učinak. Ovisno o utjecaju na biološki medij, spektar elektromagnetskog zračenja može se podijeliti na ionizirajuće i neionizirajuće zračenje. [4]

## 2.3 Neionizirajuće zračenje

Neionizirajuće zračenje jest zračenje koje u međudjelovanju s tvarima ne stvara ione, odnosno nema dovoljnu energiju da izbací elektrone iz orbite te na taj način stvori ione. Neionizirajuće zračenje ima znatno nižu energiju od ionizirajućeg zračenja s obzirom na to da sadržava fotone čija je energija manja od 10 eV. U područje neionizirajućeg zračenja pripada: optičko zračenje, čiji se spektar dijeli na ultraljubičasto zračenje, infracrveno zračenje i vidljivi spektar, zatim radiovalovi i mikrovalno zračenje te zračenje ekstremno niskih frekvencija. Neionizirajuće zračenje izazivaju prirodni izvori ili izvor takvog zračenja može biti bilo koji uređaj koji proizvodi jednu ili više vrsta neionizirajućeg zračenja.

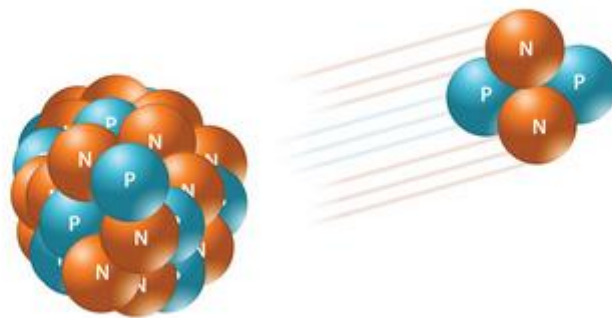
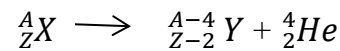
## 2.4 Ionizirajuće zračenje

Ionizirajuće zračenje jest zračenje koje ima dovoljno veliku energiju da tijekom interakcije s atomom izbije elektrone iz atoma te na taj način proizvede ione. Ioni su električno nabijene molekule i atomi. Ionizirajuće zračenje nastaje kao posljedica promjene materije u mikrosvijetu. To mogu biti promjene energijskog stanja atoma ili sastava atomske jezgre pri čemu se emitiraju elementarne čestice ili fotoni. Ionizirajuće zračenje, koje se može javiti u obliku čestica (korpuskula) ili elektromagnetskih valova (fotona), mora imati dovoljno energije da izazove ionizaciju u ciljanoj molekuli. Izvore ionizirajućeg zračenja možemo podijeliti u dvije skupine: prirodne izvore te umjetne radioaktivne izvore nastale ljudskom djelatnošću. Zračenje predaje dio ili svu energiju tvarima, a energija koja je predana može promijeniti svojstva i stanje ozračene tvari. Ionizirajuće zračenje karakteristično je po učincima koje izaziva i koje može dovesti do oštećenja i odumiranja tkiva, a zatim i do smrti živih bića. Zbog svoje razornosti predmet je mnogih istraživanja te podliježe međunarodnoj zakonodavnoj kontroli. Međutim, posljedice međudjelovanja zračenja i tvari ponekad mogu biti korisne za čovjeka ili okoliš. [5]

Ionizirajuće zračenje dijeli se u dvije osnovne skupine: čestično (korpuskularno) i elektromagnetsko zračenje. Čestično zračenje čini alfa ( $\alpha$ ), beta ( $\beta$ ) i neutronska zračenje dok u elektromagnetsko pripada gama ( $\gamma$ ) i rendgensko zračenje. Kozmičko zračenje dolazi iz svemira i uključuje sve navedene vrste zračenja.

### 2.4.1 Alfa-zračenje

Alfa-zračenje je čestično (korpuskularno) ionizirajuće zračenje. U alfa-raspadu jezgra emitira alfa-česticu ( $\alpha$ ), odnosno jezgru helija koja se sastoji od dva protona i dva neutrona. Preostala jezgra ima dva protona i dva neutrona manje, odnosno predstavlja jezgru elementa kojem je atomski broj manji za dva, a nukleonski broj za četiri. [2] Proces se može napisati kao:



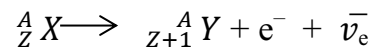
Slika 3:  $\alpha$ -čestica [6]

Teške radioaktivne jezgre s nukleonskim brojem većim od 200 većinom se raspadaju alfa-raspadom. [2] Alfa-čestice sastavljene od dva protona i dva neutrona imaju pozitivan elementarni naboj te veliku masu. Zbog svoje prirode međudjeluju s tvari kroz koju prolaze te je domet alfa-čestice u zraku malen i iznosi samo nekoliko centimetara, dok je domet kroz tkivo tisuću puta manji i iznosi nekoliko stotinki milimetara. Zbog malog dometa čestice alfa-zračenje nije opasno ako se nađe izvan organizma jer ga može zaustaviti već i list papira ili sloj kože te izvana ne može doprijeti do unutrašnjih organa. Suprotno tome, ako uđe u organizam ingestijom ili inhalacijom, izrazito je opasno. Kako reagira s tvari kroz koju prolazi, alfa-zračenje stvara ionske parove te veliku energiju koju sadrži (nekoliko MeV) može pohraniti u stanicama te izazvati lokalna oštećenja stanica i tkiva zbog velike lokalne ionizacije. [7]

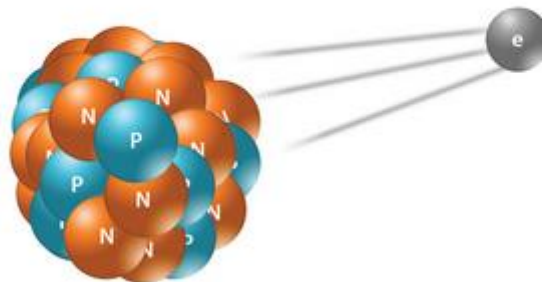
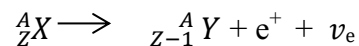
## 2.4.2 Beta-zračenje

Beta-zračenje također je čestično ionizirajuće zračenje. U prirodi i laboratoriju opaženi su procesi u kojima se atomski broj jezgre promijeni, a nukleonski broj ostane isti. To se događa u beta-minus raspadu kada jezgra emitira elektron ili u beta-plus raspadu kada emitira pozitron. [2]

Beta-minus raspad jest proces u kojem neutron prelazi u proton i pritom emitira  $\beta^-$  česticu, odnosno elektron. Osim elektrona u beta-minus raspadu emitirana je i čestica antineutrino  $\bar{\nu}_e$ . [2]



U beta-plus raspadu atomski broj jezgre umanjuje se za jedan. Proton prelazi u neutron i pritom emitira  $\beta^+$  česticu, tj. pozitron. Pozitron je čestica pozitivnog naboja i mase jednake mase elektrona. Osim pozitrona emitirana je i čestica neutino  $\nu_e$ . [2]

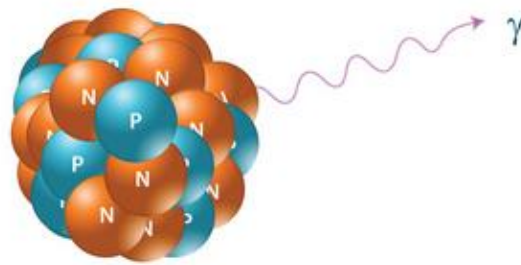
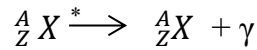


Slika 4:  $\beta^-$ -čestica [6]

Beta-čestice jesu čestice male mase koje se gibanjem kroz materiju sudaraju s atomskim jezgrama, gube energiju i skreću s pravocrtne putanje. Za razliku od alfa-čestica, domet beta-čestice iznosi i do nekoliko metara u zraku, ali zbog manje količine energije koju posjeduju beta-čestice su manje razorne od alfa-čestica. Mogu se zaustaviti tankim slojem aluminija, plastike ili stakla. Ako se izvor zračenja nalazi izvan organizma, beta-čestice mogu prodrijeti u kožu do nekoliko centimetara i izazvati oštećenja na koži. Mnogo veću opasnost predstavljaju ako se u organizam unesu udisanjem ili gutanjem.

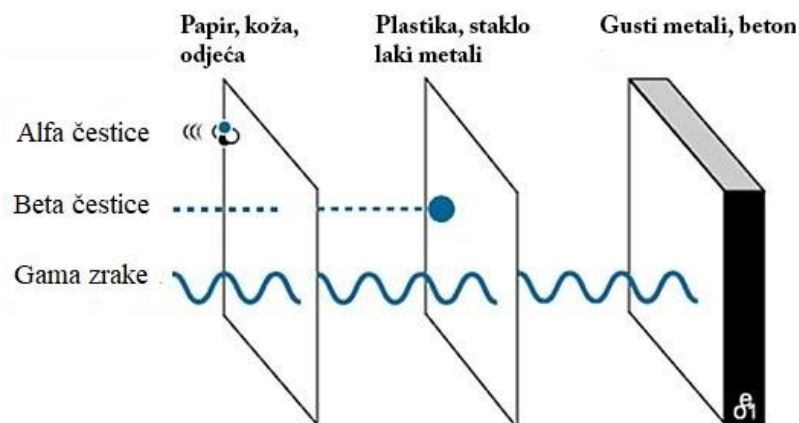
### 2.4.3 Gama-zračenje

Gama-zračenje za razliku od alfa i beta-zračenja jest, zračenje valne prirode. Nastaje kada jezgra nakon alfa ili beta-raspada ostaje u pobuđenom stanju. Kada se jezgra nalazi u pobuđenom stanju, prelazi u stanje niže energije i pritom emitira foton. U procesu emisije fotona smanjuje se energija jezgre, a njezina građa pritom se ne mijenja.



Slika 5:  $\gamma$ -zračenje [6]

Gama-zrake su fotoni elektromagnetnog zračenja čije su energije više od nekoliko desetaka MeV. Kako nemaju masu ni naboj, gama-zrake imaju veliki domet i mogu prijeći mnogo veće udaljenosti od alfa i beta-zračenja. Gama-zrake predstavljaju veliku opasnost za organizme. Mogu prodrijeti kroz gotovo sve vrste materijala, a prilikom prolaska kroz ljudsko tijelo uzrokuju ionizaciju molekule DNK, što dovodi do oštećenja stanica. Za zaustavljanje gama-zračenja potrebno je upotrebljavati debele slojeve gustog materijala kao što je olovo ili pak debeli sloj betona. [8]



Slika 6: Prodornost alfa, beta i gama-zračenja u raznim materijalima [9]



#### 2.4.4 Rendgensko zračenje

Rendgenske zrake otkrio je 1895. njemački fizičar Wilhelm Conrad Rontgen proučavajući katodne zrake koje nastaju u katodnoj cijevi. Proučavajući katodno zračenje, opazio je svjetlucaje na fluorescentnom zastoru te zaključio da je uzrok tome nevidljivo zračenje. Zaključio je da to zračenje uzrokuje niz pojava, ponajprije ionizaciju tvari. Ustanovio je da novootkrivene zrake ne može otkloniti magnetom, pa je pretpostavio njihovu sličnost sa zrakama svjetlosti. Nepoznate zrake nazvao je X-zrakama, a poslije su njemu u čast nazvane rendgenske zrake. Rendgenske zrake također su fotoni elektromagnetskog zračenja kao i gama-zrake, no razlika je u tome što gama-zrake nastaju procesom u jezgri, dok rendgenske zrake nastaju izvan jezgre. Rendgenske zrake čine fotoni vrlo visokih energija, a male valne duljine koji lako prodiru kroz prostor i tvari. Dubina prodiranja ovisi o energiji zraka, specifičnoj težini tvari te o debljini njezina sloja. Rendgenske zrake niže su energije od gama-zraka te su zbog toga i manje prodorne. Biološki učinak čine sve promjene što ih rendgensko zračenje uzrokuje u živom tkivu. Takve promjene mogu izazvati smanjenje funkcije stanice te poremećaje u njezinu rastu ili razmnožavanju. Koristan biološki učinak onaj je kojim se namjerno razaraju tkiva zloćudnih tumora te se rabi u radioterapiji i medicinskoj dijagnostici. [5] Kao zaštita od rendgenskih zraka upotrebljavaju se olovne ploče debljine nekoliko milimetara.

#### 2.4.5 Neutronske zračenje

Neutronske zračenje čestično je zračenje i čini ga roj slobodnih neutrona koji nastaju u nuklearnim procesima. Sastavni je dio svemirskog zračenja te zračenja iz teških nestabilnih jezgra, dok u nuklearnim reaktorima tijekom lančanog cijepanja jezgra nastaje snažno neutronske zračenje. Neutroni su čestice bez naboja, mase približno jednake masi protona. Slobodni neutron (onaj koji se nalazi izvan atomske jezgre) nestabilna je čestica koja se s vremenom poluraspada od približno 12 minuta raspada na proton, elektron i antineutrino. Kako su električki neutralne čestice, na neutrone ne djeluju električna i magnetska polja te ne dolazi do interakcije s elektronima. Međutim, neutron lako prodire do atomske jezgre i izaziva nuklearne reakcije. Kako je atomska jezgra malena s obzirom na atom u cijelosti, mala je i vjerojatnost interakcije neutrona s jezgrom te su neutroni veoma prodorni. Neutronske zračenje opisano je energijom neutrona koja iznosi približno 10 MeV. Ono ima veću prodornost od alfa i beta-zračenja te su zbog toga potrebni i deblji apsorberi. Neutroni gube energiju tijekom sudara s česticama jednake mase, stoga se izrađuju štitovi od materijala koji su bogati vodikom kao

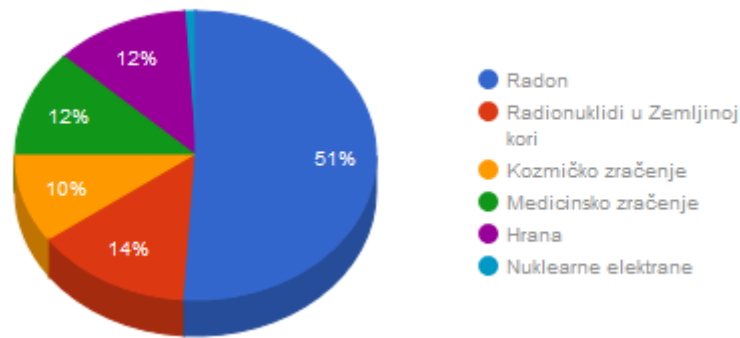
parafin ili voda. Neutronske zračenje najčešće se zaustavlja pomoću debelog sloja betona s dodatkom željeza (teški beton). [10] [11]

### 3. Izvori ionizirajućeg zračenja

Od samih početaka života na Zemlji ljudi su izloženi radioaktivnom zračenju iz okoliša. Postoji oko šezdeset prirodnih radionuklida na Zemlji. Neki od njih prisutni su još od postanka svemira te se nazivaju praradionuklidima, dok su ostali njihovi radioaktivni potomci. Prirodni izvori ionizirajućeg zračenja dijele se na kozmičko i terestrijalno zračenje. Na prirodne izvore zračenja koji potječu iz svemira ili Zemljine kore ne može se utjecati. Osim zračenja iz prirodnih izvora ljudi su izloženi i umjetnom zračenju koje je prouzročeno ljudskom aktivnošću. Naglim razvojem znanosti i tehnologije u razne grane ljudske djelatnosti uvodi se sve veći broj izvora zračenja. Umjetni izvori ionizirajućeg zračenja imaju primjenu u industriji te raznim znanstvenim istraživanjima, no najveći doprinos daje medicinska dijagnostika i terapija. Doze koje stanovništvo primi iz prirodnih izvora ovise o sastavu tla i nadmorskoj visini, dok one iz umjetnih izvora ovise o nizu okolnosti i životnih navika pojedinca (materijali od kojih su izrađene stambene zgrade, ventilacija prostora, medicinske pretrage i liječenje, duža putovanje zrakoplovom itd.). [10] [12]

Tablica 1: Prosječne brzine ekvivalentne doze zračenja za stanovništvo iz svih izvora prema podacima Međunarodne agencije za atomsku energiju (IAEA) [12]

PRIRODNI IZVORI ZRAČENJA	mSv/god.
radon ( $^{222}\text{Rn}$ i $^{220}\text{Rn}$ )	1,37
kalij ( $^{40}\text{K}$ )	0,30
kozmičke zrake	0,30
ostali prirodni izvori	0,02
UMJETNI IZVORI ZRAČENJA	mSv/god.
medicinske pretrage	0,40
stanovanje u okolini nuklearne elektrane	0,002
<b>UKUPNO</b>	<b>2,392</b>



Slika 7: Udio pojedinih komponenti zračenja u ukupnoj godišnjoj efektivnoj dozi kojoj je pojedinac izložen (UNSCEAR, 2000.) [13]

### 3.1 Prirodni izvori zračenja

Kozmičko zračenje ionizirajuće je zračenje koje se rasprostire kroz cijeli svemir te na Zemlju dopire iz svih smjerova. Kozmičke zrake čine čestice vrlo visoke energije koje ulaze u vanjski sloj Zemljine atmosfere te se gibaju brzinom približno jednakoj brzini svjetlosti. Kozmičke zrake dolaze sa zvijezda, od supernova, odnosno eksplozija zvijezda i izvora koji su nam trenutačno nepoznati. Primarno kozmičko zračenje sastoji se od protona (~85%), zatim  $\alpha$ -čestica (~14%) te elektrona, neutrona i teških jezgri (~1%). Zemljino magnetsko polje zakreće visokoenergijske čestice kozmičkog zračenja, što je i dovelo do otkrića da kozmičke zrake nisu elektromagnetsko zračenje već nabijene čestice. U Zemljinu atmosferu dopiru fotoni, neutroni i nabijene čestice koje nije zarobilo magnetsko polje Zemlje. Zemljina atmosfera ima malu gustoću, ali je ipak dovoljne gustoće da čestice zraka međudjeluju s kozmičkim zrakama i na taj način stvaraju sekundarne čestice kozmičkog zračenja. U sekundarnom kozmičkom zračenju javlja se i gama-zračenje koje nastaje anihilacijom pozitrona koji nastaju tvorbom parova elektron - pozitron. U Zemljinoj atmosferi javlja se oko dvadeset kozmogena nuklida koji su nastali pod utjecajem kozmičkog zračenja. Tricij  $^3\text{H}$ , natrij  $^{22}\text{Na}$ , berilij  $^7\text{Be}$ , ugljik  $^{14}\text{C}$  radionuklidi su koji najviše doprinose ozračivanju tvari na površini našeg planeta, pa tako i čovjeka. [10] [14]

Terestrijalno zračenje dolazi od prirodnih radionuklida koji nas okružuju, a nalaze se u Zemljinoj unutrašnjosti ili na njezinoj površini. Glavni su izvori zračenja radionuklidi koji se mogu pronaći u tlu i potječu još od nastanka Zemlje ( $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ) te njihovi radioaktivni

potomci. Niske koncentracije kalija, uranija, torija te produkata njihovih raspada nalaze se posvuda. Neki radionuklidi se u organizam unose hranom ili pićem (ingestija), dok se drugi, poput radona, udišu (inhalacija). Ukupna doza koju čovjek primi iz terestrijalnih izvora razlikuje se u različitim dijelovima svijeta. Na nekim lokacijama (Iran, Brazil, Indija) gdje su koncentracije uranija i torija u tlu veće, veće su i granične doze zračenja kojem je izloženo stanovništvo.

Opasnost od zračenja predstavlja udisanje radioaktivnih plinova čiji se izvori nalaze u tlu ili stijenama. Radon je radioaktivni plin bez boje, mirisa i okusa te predstavlja najveći prirodni izvor zračenja kojem je izloženo stanovništvo. Kako ga ljudska osjetila ne mogu opaziti, za njegovu detekciju potrebni su mjerni uređaji. Nastaje raspadom uranija te se nalazi u tlu, vodi i građevinskim materijalima. Tri su radioaktivna izotopa koja se pojavljuju u prirodi, radon  $^{222}\text{Rn}$ , toron  $^{220}\text{Rn}$  i aktinon  $^{219}\text{Rn}$ . Radon i njegove produkte raspada neprestano unosimo udisanjem. Koncentracija radona na otvorenom je malena i iznosi  $\sim 15 \text{ Bq/m}^3$  te ne predstavlja opasnost za zdravlje. U zatvorenom prostoru koncentracija radona može biti u rasponu između  $10 \text{ Bq/m}^3$  do  $10\,000 \text{ Bq/m}^3$  i više, što može dovesti do ozbiljnih zdravstvenih problema. Radioaktivni elementi ulaze kroz dišni sustav te prilikom radioaktivnog raspada oštećuju DNK i tkivo plućnog epitela te na taj način može doći do razvoja karcinoma pluća. [13]

## 3.2 Umjetni izvori zračenja

Osim zračenja kojem je čovjek svakodnevno izložen iz prirodnih izvora, umjetno smo ozračeni raznim izvorima ionizirajućeg zračenja uzrokovanim ljudskim aktivnostima. Kako se razvijala znanost i tehnologija, tako se proširila i primjena ionizirajućeg zračenja u medicini, industriji te raznim znanstvenim istraživanjima. Umjetni izvori zračenja uključuju električne uređaje koji proizvode ionizirajuće zračenje (rendgenski uređaji, CT, ubrzivači čestica) zatim radionuklide koji se u okolišu pojavljuju kao posljedica nuklearnih istraživanja, testiranja nuklearnog oružja te nuklearnih reaktora koji se upotrebljavaju u nuklearnim elektranama. Radioaktivni otpad koji nastaje u industrijskim pogonima, nuklearnim reaktorima, radionuklidima koji se upotrebljavaju u medicini te nakon nuklearnih eksplozija raznosi se zrakom i vodom čime se dovodi do izlaganja stanovništva ionizirajućem zračenju.

### *Zračenje u medicini*

Primjena u medicini najraširenija je te najpoznatija primjena ionizirajućeg zračenja. Medicinski izvori zračenja čine oko 94% svih zračenja kojima je izložen pojedinac od umjetnih izvora ionizirajućeg zračenja. U medicini ionizirajuće zračenje upotrebljava se u radiološkoj dijagnostici, nuklearnoj medicini i radioterapiji. Godišnje veći dio stanovništva izložen je zračenju u dijagnostičke svrhe, dok je znatno manji dio stanovništva izložen zračenju u terapijske svrhe. U radiološkoj dijagnostici najpoznatija je primjena rendgenskog uređaja koji se koristi zračenjem za dobivanje slikovnog prikaza struktura u tijelu. Taj postupak temelji se na nejednolikoj apsorpciji ionizirajućeg zračenja različitih organa ili sustava u tijelu te se na osnovi toga može konstruirati njihov prikaz u realnom vremenu. Prikaz struktura u tijelu snima se fotografskom kamerom te se u elektroničkom obliku mogu promatrati, povećavati ili izdvajati pojedinih. Izlaganje ionizirajućem zračenju rendgenskom dijagnostikom smanjuje se uporabom ostalih dijagnostičkih metoda koje ne rabe ionizirajuće zračenje poput ultrazvuka ili magnetske rezonancije. U nuklearnoj medicini upotrebljavaju se otvoreni izvori ionizirajućeg zračenja (radionuklidi) koji se unose u organizam pacijenta. Najčešće je to radioaktivna tekućina koja se u organizam unosi intravenozno te se nakuplja i zadržava u organima. Kako bi se ispitalo ponašanje tog radionuklida u organizmu, upotrebljava se detektor zračenja, odnosno gama-kamera. Gama-kamera je uređaj koji detektira male količine radioaktivnog materijala u tijelu pacijenta, koji emitira radioaktivna tekućina nakupljena u pojedinim organima te na taj način stvara sliku organa. Korišteni radionuklidi raspadaju se i postaju neradioaktivni tijekom nekoliko

sati. Zračenje je prilično malo te brzo prestaje. Najčešći su radionuklidi koji se primjenjuju u dijagnostici i nuklearnoj medicini  $^{99m}\text{Tc}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{131}\text{I}$ ,  $^{192}\text{Ir}$ .

Radioterapija je metoda liječenja karcinoma primjenom ionizirajućeg zračenja. Cilj je radioterapije uništiti tumorske tvorbe te kontrolirati širenje tumora, odnosno smanjiti širenje na zdravo tkivo koje ga okružuje. Zračenje zaustavlja diobu stanica tako što oštećuje DNK zloćudnih stanica i uzrokuje njihovu smrt, a kako se tumorske stanice dijele brže od zdravih stanica, tako su i znatno osjetljivije. Zdrave stanice lakše se i brže mogu oporaviti od izloženosti ionizirajućem zračenju. S obzirom na položaj izvora u odnosu na pacijenta, postoje dva načina primjene radioterapije: teleterapija i brahiterapija. Teleterapija se provodi na način da se na određenu udaljenost od izvora zračenja smješta pacijent te izlaže gama-zračenju visoke energije. Teleterapijski uređaji koji se najčešće upotrebljavaju su kobaltna bomba i uređaj za stereotaktičku radiokirurgiju. U brahiterapiji se pak izvor ionizirajućeg zračenja postavlja izravno ili u blizinu tumorskog tkiva. U ciljanom području mogu se primijeniti veće doze zračenja te pri tome poštediti okolno zdravo tkivo. Izvori su zračenja koji se najčešće koriste izotopi cezija, iridija i joda. [15]



Slika 8: Rendgenski uređaj [16]



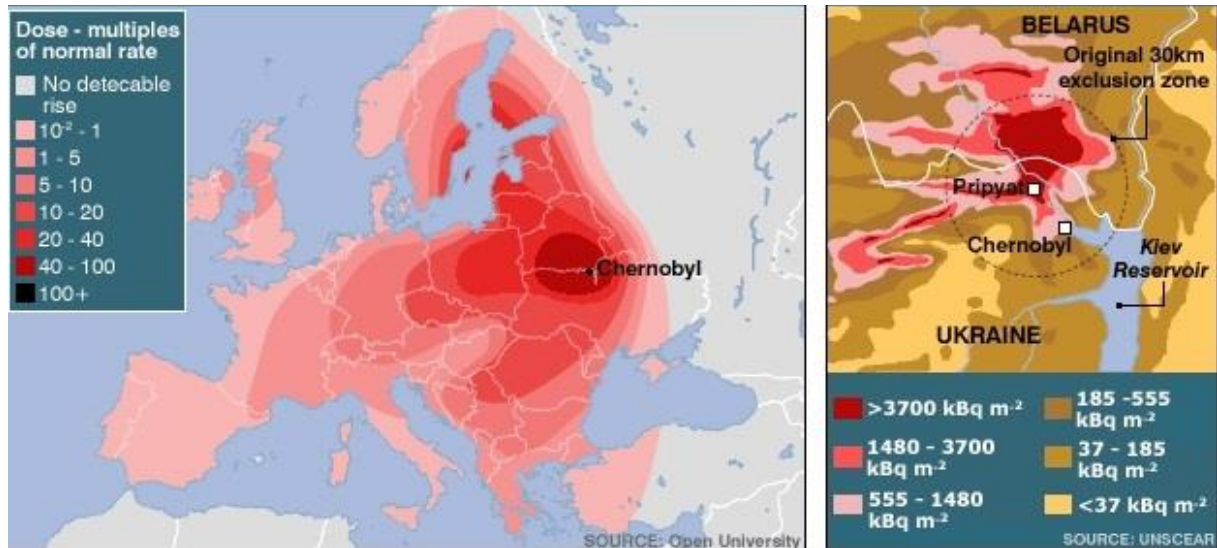
Slika 9: Gama kamera [17]

## *Zračenje iz nuklearnih elektrana -kvarovi na nuklearnim reaktorima*

Nuklearna elektrana energetska je postrojenje u kojem se odvija pretvorba nuklearne energije u električnu energiju. Nuklearna energija pretvara se u toplinsku, zatim u toplinskom stroju toplina prelazi u mehaničku energiju te se ona uz pomoć indukcijskog generatora pretvara u električnu energiju. Nuklearni reaktor uređaj je u kojem se odvijaju nuklearne reakcije fisije izotopa uranija, plutonija ili torija. U reaktorskoj jezgri smješteno je nuklearno gorivo. Gorivo koje se upotrebljava radioaktivno je jer se za reakciju nuklearne fisije upotrebljavaju fisibilni nuklidi koji su radioaktivni. Osim velike količine energije koja nastaje tijekom nuklearne fisije, nastaje i jako ionizirajuće zračenje. Zbog toga su nuklearni reaktori dobro zatvoreni u masivnim zgradama. Ionizirajuće zračenje izvan zgrade smanjeno je na vrlo male vrijednosti zbog opsežnih postupaka zaštite koji se provode. Do izlaganja stanovništva zračenju dolazi zbog manjih količina radioaktivnih plinova i tekućina koje zrakom ili rashladnom vodom ipak dopijevaju u okoliš. Ekvivalentne doze zračenja koje pojedinac primi u blizini nuklearnih elektrana znatno su manje od propisanih graničnih doza. Kao proizvod nuklearne fisije nastaje istrošeno gorivo, odnosno nuklearni otpad. Odlaganje takvog otpada složen je postupak te se mora pravilno provoditi. Nisko i srednje radioaktivni otpad najčešće se odlaže u iskopane jame koje imaju podlogu od nepropusnog materijala na koji se postavlja betonska ploča, a na ploču se polažu betonski bazeni. Radioaktivni materijal polaže se u spremnike te se oni zalijevaju betonom. Kada se bazen napuni spremnicima zatvara se pločom od betona te se prekriva zemljom. Odlaganje visoko radioaktivnog otpada provodi se u dubokim geološki stabilnim formacijama tzv. geološkim repozitorijima. [10] [18]

Nuklearni reaktori proizvode se uz veliku pozornost, rade pod stalnim nadzorom te postoje detaljno razrađeni postupci u slučaju kvara reaktora. Bez obzira na sve mjere zaštite koje se poduzimaju, kroz godine se dogodio niz predviđenih i nepredviđenih kvarova na proizvedenim reaktorima. Predviđeni, odnosno mali kvarovi koji su se dogodili nisu prouzročili kritično ozračivanje osoblja ni okoline. U nuklearnoj elektrani *Windscale* u Velikoj Britaniji te u elektrani *Otok tri milje* u Sjedinjenim Američkim Državama došlo je do većih kvarova reaktora. Do kvara je došlo pregrijavanjem reaktora, no radioaktivne tvari ostale su zatvorene u reaktorskoj zgradi. Zbog toga su doze zračenja u blizini elektrane bile vrlo male, manje od zračenja koje pojedinac primi tijekom rendgenskog snimanja. Nuklearna katastrofa dogodila se 1986. godine u Černobilu u Ukrajini. Zbog niza ljudskih pogrešaka i uporabe nesigurnog tipa reaktora došlo je do njegova pregrijavanja i eksplozije te su u atmosferu ispuštene velike količine radioaktivnih tvari.

Niz eksplozija i izloženost golemom zračenju dovela je do smrti velikog broja ljudi. Radioaktivni oblak koji se stvorio nakon eksplozije, vjetrom se proširio na područja širom Europe, a dugoživi radionuklidi ( $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{131}\text{I}$ ) postupno su padali na tlo te ih i danas u tijelo unosimo udisanjem ili hranom i vodom. Nakon černobilske katastrofe povećao se broj ljudi koji su oboljeli od teških bolesti.



Slika 10: Povećane doze zračenja u Europi 3. svibnja 1986. godine i taloženje cezija u tlu u Ukrajini i Bjelorusiji nakon černobilske katastrofe [19]

### Zračenje nuklearnog oružja

Nuklearno oružje upotrebljava nuklearnu eksploziju u ratne svrhe. Za oružje se rabi energija koja se fisijom ili fuzijom oslobađa iz atomskih jezgara nuklearnog eksploziva. Nuklearno oružje predstavlja jedan od opasnijih izvora onečišćenja u prirodi. To dokazuju posljedice nuklearnih testiranja, eksplozije atomskih bombi bačenih na japanske gradove Hiroshimu i Nagasaki te nuklearne nesreće. Testiranja nuklearnog oružja provodila su se u atmosferi i pod zemljom ili pod vodom. Atmosfersko testiranje rezultira ispuštanjem radioaktivnog materijala te njegovom disperzijom u atmosferi. Tada dolazi do onečišćenja okoliša radionuklidima, posebice  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^3\text{H}$ . Za razliku od atmosferskog, kod podzemnog testiranja radioaktivni materijal ispušta se u zemlju te ponekad izbija na površinu. U slučaju testiranja nuklearnog oružja pod vodom dolazi do raspršenja radioaktivnog materijala u vodi, što predstavlja veliku opasnost za morski ekosustav. Lokacije na kojima se testiralo nuklearno



oružje nisu povoljne za naseljavanje stanovništva. Nakon mjerenja radioaktivnosti zraka, tla, hrane i vode zaključeno je da bi zbog kontaminacije stanovništvo na tim lokacijama primilo preveliku dozu zračenja kao što je slučaj i na području Černobila. [20]

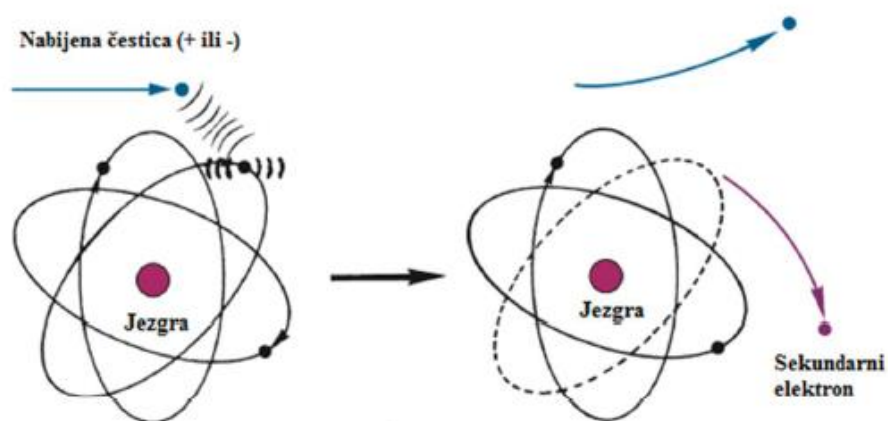
## **4. Međudjelovanje zračenja i materije**

Prolaskom zračenja kroz materiju dolazi do njihova međudjelovanja. Pri tome se mijenjaju svojstva zračenja i tvari. Međudjelovanje zračenja i materije ovisi o energiji nabijenih čestica ili fotona.

### **4.1 Međudjelovanje čestičnog zračenja i materije**

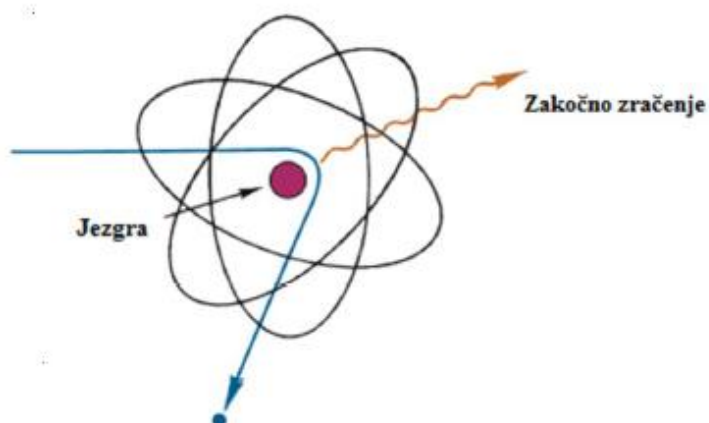
Nabijene čestice visoke energije ( $\alpha$ -čestice,  $\beta$ -čestice) prolazeći kroz materiju međudjeluju s atomima i molekulama te postupno gube energiju i usporavaju. Kao rezultat takvih interakcija nastaju visokoenergetski elektroni. [21]

Interakcija elektrona s atomima i molekulama uključuje sile privlačenja i odbijanja. Kada prolazi pokraj atoma, nabijena čestica uzrokuje stvaranje električne sile na elektron u atomskom omotaču. Ako su čestice vrlo blizu te je sila dovoljno jaka, elektron se odvaja od atoma, odnosno dolazi do ionizacije. Dio energije nabijena čestica troši za svladavanje energije vezanja, dok ostatak predaje slobodnom elektronu. Ako nabijena čestica nije dovoljno blizu atoma da bi uzrokovala ionizaciju, može doći do pobuđenja (ekscitacije) atoma ili molekule. Tada dolazi do manjeg gubitka energije nego prilikom procesa ionizacije. Takav proces odražava se u molekularnim vibracijama te atomskim emisijama infracrvenog, vidljivog, ultraljubičastog zračenja. [21]



Slika 11: Međudjelovanje nabijene čestice i atoma [21]

Do još jednog tipa međudjelovanja čestičnog zračenja i materije dolazi kada nabijena čestica prodirući kroz atomski omotač dolazi u interakciju s jezgrom atoma. Za  $\alpha$ -čestice ili protone taj tip interakcije upotrebljava se u nuklearnim reakcijama za proizvodnju radionuklida. Naime, veća je vjerojatnost da će se nabijena čestica otkloniti od početne putanje pod utjecajem snažne električne sile. Pritom će čestica naglo usporiti te postupno gubiti energiju. Takav proces naziva se zakočno zračenje (*Bremmsstrahlung*) pri kojem se energija očituje u obliku fotona elektromagnetnog zračenja. Doseg energije koju odnose fotoni zakočnog zračenja kreće se od nule pa sve do maksimalne vrijednosti ukupne energije čestice. [21]



Slika 12: Zakočno zračenje [21]

## 4.2 Međudjelovanje elektromagnetskog zračenja i materije

Interakcije između elektromagnetskog zračenja i atoma materije znatno su složenije od interakcija čestičnog zračenja. Elektromagnetsko zračenje čini snop fotona koji se gibaju brzinom svjetlosti te tijekom interakcije ne usporavaju. Za razliku od alfa i beta-čestica fotoni ne uzrokuju izravnu ionizaciju tvari. Oni tijekom interakcije predaju dio ili svu svoju energiju atomima materije što može rezultirati izbacivanjem elektrona iz atomskog omotača ili pak tvorbom elektronskog para. Ako ti elektroni imaju dovoljno energije, mogu uzrokovati i do nekoliko stotina ionizacija te kažemo da dolazi do posredne ionizacije tvari. [21] [22]

Osnovne vrste interakcije fotona s materijom najčešće se odvijaju trima nuklearnim reakcijama:

- fotoelektričnim efektom
- Comptonovim raspršenjem
- tvorbom parova.

Te nuklearne reakcije najviše doprinose smanjenju intenziteta zračenja pri prolasku kroz neki materijal. Vjerojatnost pojave ostalih reakcija koje mogu nastati u interakciji fotona s atomima materije (Thompsonovo raspršenje, Rayleighovo raspršenje) daleko su manje od spomenutih, pa se često zanemaruju. [22]

### 4.2.1 Fotoelektrični učinak

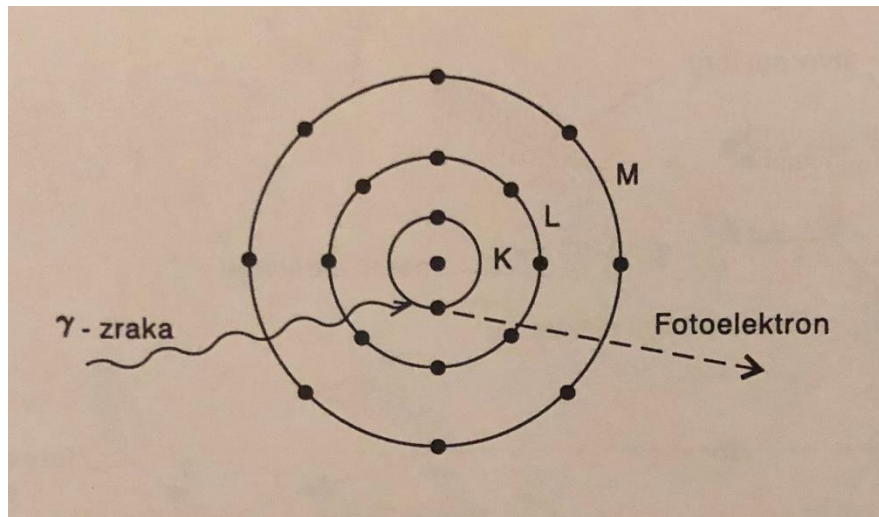
Fotoelektrični učinak apsorpcijski je proces tijekom kojeg upadni foton reagira s atomom. Foton nestaje dok atom apsorbira svu energiju fotona izbacujući pri tome elektron. Elektron izbačen iz ljuske atoma naziva se fotoelektron. Kinetička energija fotoelektrona jednaka je razlici energije fotona i energije vezanja elektrona.

$$E_f = E_0 - K_B$$

gdje je  $K_B$  energija vezanja prve, K-te ljuske. [21]

Za elektron koji je vezan u atomu energija fotona mora biti veća od energije vezanja valentne ljuske kako bi napustio taj atom. Fotoelektričnim učinkom zračenje se u potpunosti apsorbira te u materiji nastaju slobodni elektroni. Elektron koji je napustio atom može, ako ima dovoljnu energiju, ionizirati tvar.

Veća je vjerojatnost fotoelektričnog učinka u jakom električnom polju u blizini jezgre nego u području slabije vezanih vanjskih elektrona. Također je fotoelektrični učinak vjerojatniji kod težih atoma, odnosno onih s većim atomskim brojem Z. [21]

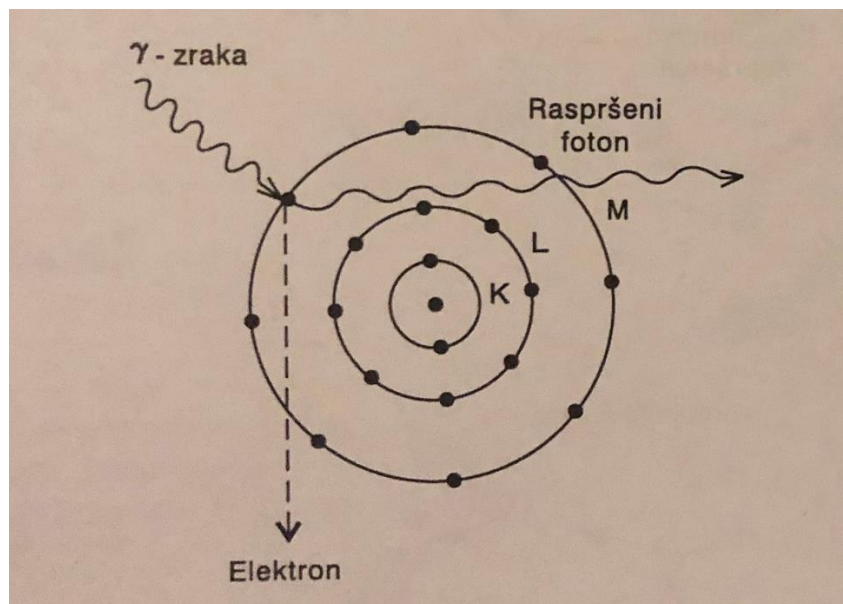


Slika 13: Shematski prikaz fotoelektričnog učinka [23]

## 4.2.2 Comptonovo raspršenje

Comptonovo raspršenje proces je u kojem dolazi do interakcije između fotona i slobodnih ili slabo vezanih elektrona u atomu. Taj efekt može se smatrati sudarom fotona i elektrona. Pri tome ne dolazi do potpune apsorpcije fotona, već foton predaje dio svoje energije elektronu dok ostatak odnosi tzv. sekundarni foton sa smanjenom energijom, dakle većom valnom duljinom. Sekundarni foton giba se u različitom smjeru od onog upadnog, odnosno skrene s putanje pod kutom raspršenja  $\phi$ . Njegova energija ovisi o kutu  $\phi$  prema smjeru upadnog fotona. [10]

Kako se zračenje jednim dijelom apsorbira dok se ostatak zračenja raspršuje, u materiji nastaju ioni i elektroni zbog kojih dolazi do posredne ionizacije. Raspršeno zračenje manje je energije te se širi u svim smjerovima u okolini. Comptonovo raspršenje ne ovisi o atomskom broju ili svojstvu materijala, već samo o interakciji između fotona i elektrona. [21]



Slika 14: Shematski prikaz Comptonova raspršenja [23]

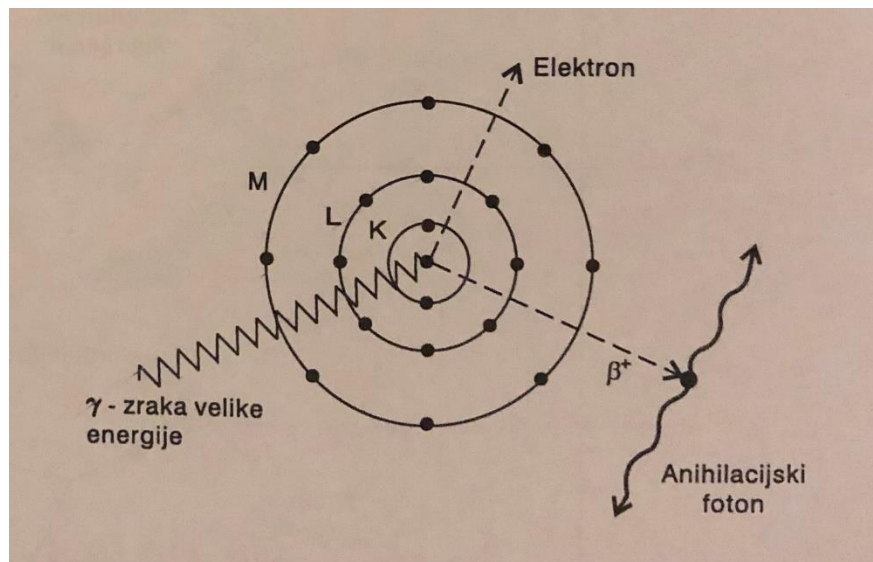
### 4.2.3 Tvorba parova

Reakcija tvorbe parova proces je u kojem je foton u interakciji s električnim poljem atomske jezgre. Pri tome je foton anihiliran te se njegova energija troši na tvorbu para pozitron - elektron. Energijski ekvivalent masi mirovanja para materijalnih čestica elektron - pozitron iznosi 1,02 MeV. Kako bi došlo do tvorbe para, energija fotona mora biti jednaka ili veća od zbroja energija mirovanja dviju čestica. Kinetička energija para pozitron - elektron niža je od energije upadnog fotona te vrijedi relacija:

$$E_{pp} = E_0 - 1,02 \text{ MeV}$$

Pozitron koji nastaje u reakciji nakon kratkog vremena izgubi energiju te se spoji sa susjednim elektronom. Obje čestice anihiliraju pri čemu se emitira par anihilacijskih fotona čija energija iznosi 0,51 MeV. Novonastali fotoni odlaze na suprotne strane. Fotoni mogu prijeći određenu udaljenost prije nego što ponovno interagiraju. [12] [21]

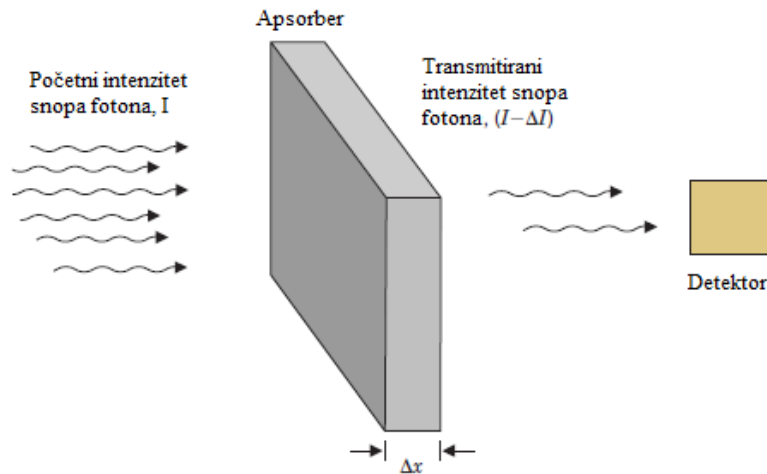
Vjerojatnost da će doći do jedne od tih reakcija ovisi o energijama upadnih fotona. Fotoelektrični učinak događa se uglavnom pri nižim energijama, dok pri srednjim energijama nastaje Comptonovo raspršenje. Za energije više od 5 MeV prevladava tvorba parova. [10]



Slika 15: Shematski prikaz tvorbe parova [23]

#### 4.2.4 Atenuacija elektromagnetskog zračenja u materiji

Atenuacija ili prigušenje visokoenergetskih fotona koji prolaze kroz materiju vrlo je važna za bolje razumijevanje svojstava interakcije, kao i za zaštitu od zračenja. Pri prolazu fotona kroz materiju (apsorber) dolazi do interakcije, a njezina vjerojatnost ovisi o svojstvima i debljini apsorbera kao i o energiji fotona. [21]



Slika 16: Slabljenje fotonskog snopa pri prolasku kroz apsorber [21]

Snop fotona prolazi kroz apsorber debljine  $\Delta x$  i ima početni intenzitet  $I$ . Broj fotona smanjuje se povećanjem debljine apsorbera s obzirom da u snopu ostaju samo oni fotoni koji su kroz materijal prošli bez interakcije s atomima. Smanjenje početnog intenziteta snopa fotona koji prolazi kroz tanak apsorber povezano je s debljinom apsorbera relacijom:

$$\frac{dI}{I} = -\mu \cdot dx$$

pri čemu nakon integracije relacija ima oblik:

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

Predznak minus prikazuje da se intenzitet fotonskog snopa prolazeći kroz materijal smanjuje. Parametar  $\mu$  linearni je atenuacijski koeficijent za smanjenje snopa fotona, dimenzije  $m^{-1}$ . On predstavlja karakteristiku materijala od kojeg se izrađuju štitovi za zračenje te su njime opisana atenuacijska svojstva tog materijala. Linearni atenuacijski koeficijent može se raspisati kao zbroj koeficijenata atenuacije svih pojedinih procesa, dakle:

$$\mu = \tau + \sigma + \kappa$$

gdje  $\tau$  predstavlja koeficijent koji se odnosi na fotoelektrični učinak,  $\sigma$  na Comptonovo raspršenje te  $\kappa$  na tvorbu para.

Linearni atenuacijski koeficijent ovisi o energiji fotona, atomskom broju elementa te o gustoći materijala.

U praksi se češće upotrebljava maseni atenuacijski koeficijent  $\mu_m$  koji ne ovisi o gustoći materijala, a definira se kao omjer linearnog atenuacijskog faktora i gustoće tvari i izražava u  $\text{m}^2/\text{kg}$  :

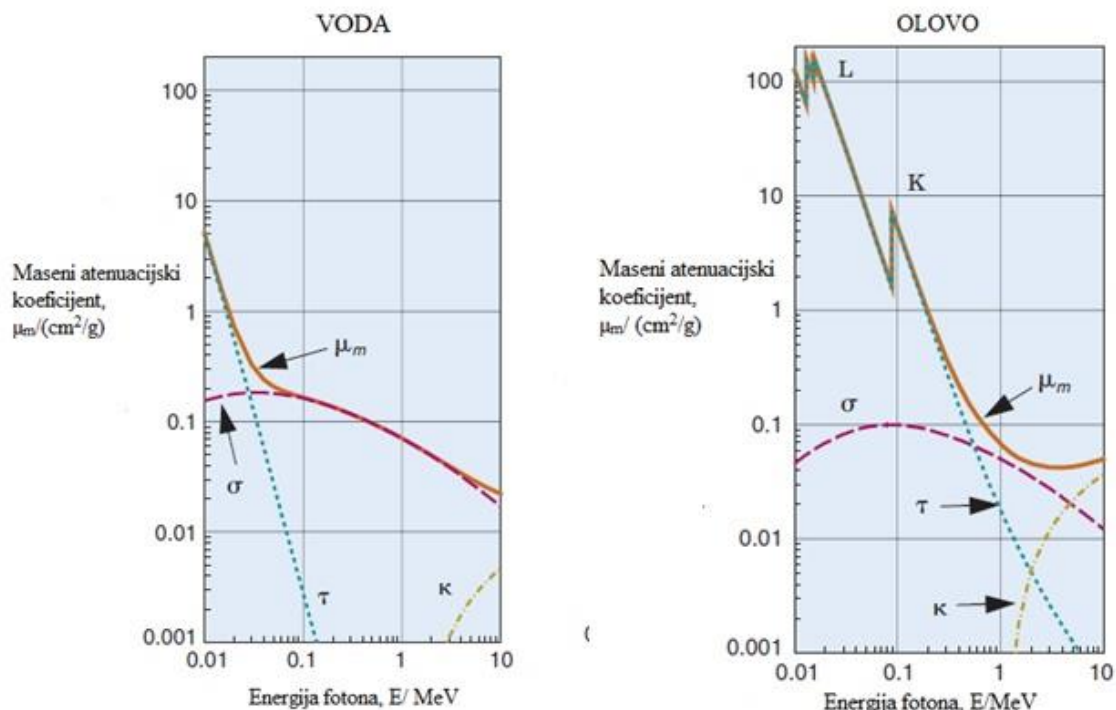
$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho}$$

Kako gustoća nekog materijala ne mora biti jednaka u svim agregacijskim stanjima, tako se za taj materijal ne može uvesti jedan linearni atenuacijski koeficijent. Upravo da bi se to izbjeglo, uvodi se maseni atenuacijski koeficijent koji je neovisan o gustoći sredstva. On je za vodu, primjerice, jednak bez obzira je li riječ o vodi u tekućem stanju, ledu ili pak o vodenoj pari. [23]

Grafovi na slici prikazuju kako se fotoelektrični koeficijent  $\tau$ , Comptonov koeficijent  $\sigma$ , koeficijent tvorbe para  $\kappa$  te ukupni maseni atenuacijski koeficijent mijenjaju s energijom.

- Fotoelektrični učinak prevladava na nižim energijama kod elemenata s visokim atomskim brojem. Komponenta fotoelektričnog učinka smanjuje se rastom energije fotona te se povećava rastom atomskog broja apsorbera. [21]
- Comptonovo raspršenje prevladava za srednje vrijednosti energije fotona i atomskog broja apsorbera. Komponenta Comptonova raspršenja opada rastom energije fotona kao i rastom atomskog broja. [21]
- Tvorba para prevladava pri visokim energijama kod elemenata s visokim atomskim brojem. Komponenta tvorbe para javlja se za energije fotona veće od 1,02 MeV. Povećanjem energije fotona i atomskog broja apsorbera komponenta tvorbe para raste logaritamski. [21]





Slika 17: Fotoelektrični koeficijent, Comptonov koeficijent, koeficijent tvorbe para i maseni atenuacijski koeficijent za vodu i olovo [21]

Tablica 2: Maseni atenuacijski koeficijent ( $\mu_m$ ) za razne materijale u ovisnosti o energiji fotona (MeV) [12]

MeV	Olovo	Beton	Voda	Tkivo	Zrak
0,1	0,529	0,0169	0,0167	0,0163	0,0151
0,2	0,0896	0,0124	0,0136	0,0132	0,0123
0,5	0,0145	0,00870	0,00966	0,00936	0,00868
1	0,00684	0,00635	0,00706	0,00683	0,00655
2	0,00457	0,00445	0,00493	0,00478	0,00445
5	0,00426	0,00287	0,00301	0,00292	0,00274
10	0,00489	0,00229	0,00219	0,00212	0,00202

## 5. Djelovanje ionizirajućeg zračenja na čovjeka

Čovjek nema razvijene receptore kojima bi detektirao ionizirajuće zračenje. Iz tog razloga ne prepoznaje kada je izložen i kojoj količini zračenja, a posljedice osjeća naknadno. Tijelo može biti izloženo velikim dozama ionizirajućeg zračenja, a da u tom trenutku ništa ne osjeti. Posljedice zračenja zapažaju se nakon nekog vremena, od nekoliko sati, dana, pa do nekoliko godina, ovisno o vrsti i svojstvima zračenja te primljenoj dozi. [24]

Prolazak ionizirajućeg zračenja kroz tvari dovodi do ionizacije te pobuđenih stanja atoma. Ulaskom zračenja u stanicu unose se velike količine energije koje mogu značajno modificirati biokemijske reakcije te ih usmjeriti u neželjenom smjeru. Najveći dio energije apsorbiraju molekule vode koje velikim dijelom izgrađuju tkiva, dok ostatak energije djeluje na organske molekule. Djelovanjem energije ionizirajućeg zračenja dolazi do razgradnje molekula vode i izbijanja elektrona čija je posljedica stvaranje iznimno kemijski reaktivnih slobodnih radikala. Slobodni radikali vežu se za molekule koje ih okružuju te uzrokuju razne poremećaje metaboličkih reakcija. Energija ionizirajućeg zračenja može izravno oštetiti organske molekule DNK ili RNK. Posljedice takvih oštećenja mogu biti poremećaji funkcije stanice, poremećaji u diobi stanice, promjene gena kao i smrt stanice. Osjetljivost pojedinih vrsta stanica na zračenje različita je. Najosjetljivija su ona tkiva čije se stanice brže dijele, primjerice, spolne stanice, stanice krvotvornih organa, dječjih kostiju itd., dok su starija tkiva već dijeljenih stanica manje osjetljiva. Zbog toga postoje razlike u posljedicama koje zračenje izaziva kod različitih tkiva i organa. Mjeru osjetljivosti različitih stanica, tkiva i organa daje ekvivalentna doza koja se definira kao veličina koja opisuje biološki učinak ionizirajućeg zračenja u određenom tkivu. [25] Zračenje može izazvati somatske i genetske posljedice. Somatski učinak uzrokuje niz raznih posljedica u ozračenog pojedinca koje neposredno nakon ozračivanja mogu uzrokovati oštećenja na koži, povraćanje s trovanjem organizma, smanjenje broja krvnih stanica i stanica koštane srži. Naknadne posljedice mogu biti leukemija, razni karcinomi, smanjenje plodnosti te skraćen životni vijek pojedinca. Genetski učinak utječe na potomstvo ozračenog pojedinca te je uzrokovan oštećenjem reproduktivnih stanica koje se prenose na potomstvo ili plod koji je iznimno osjetljiv na zračenje jer se u toj fazi njegove stanice intenzivno umnažaju. Učinci zračenja na živa bića mogu se podijeliti u dvije skupine: stohastički i deterministički učinci. Za posljedice koje se javljaju kod stohastičkih učinaka pretpostavlja se da su proporcionalne primljenoj dozi, no nije moguće utvrditi donju granicu ispod koje se posljedice ne zapažaju. Primjeri su stohastičkih učinaka genetske promjene te pojava raznih vrsta karcinoma, a takvi su učinci uvijek odgođeni. Deterministički učinci nastaju zbog gubitka ili trajnog oštećenja stanica

prilikom ozračivanja visokim dozama. Ovisni su o dozi te postoji najmanja doza ispod koje se posljedice više ne pojavljuju, odnosno nastaju iznad određenog praga apsorbirane doze te im ozbiljnost raste s njezinom veličinom. Za njih se može propisati određena sigurnosna granica. Svi su deterministički učinci somatski. Primjeri su determinističkih učinaka akutna oštećenja kože, zamućenja očne leće ili oštećenja spolnih stanica. [5] [10] [12]

## **6. Zaštita od ionizirajućeg zračenja**

Tijekom rada s izvorima zračenja zbog štetnih učinaka ionizirajućeg zračenja glavni je cilj zaštititi profesionalno izložene djelatnike, ali i ostalo stanovništvo. Zaštita od zračenja od velike je važnosti zbog očuvanja pojedinca od nepotrebnog i prekomjernog izlaganja zračenju. Postoji niz mjera i postupaka zaštite kojima je cilj broj izloženih pojedinaca i veličinu njihove primljene doze zadržati toliko nisko koliko je razumno moguće, princip ALARA (As Low As Reasonably Achievable). Zaštita od zračenja dijeli se na zakonodavnu, fizikalno-tehničku, kemijsku te biološku. Vrlo su važna i znanstvena istraživanja koja doprinose razumijevanju sveukupne koncepcije zračenja te njegova djelovanja na organizme čime se unaprjeđuje zaštita od neželjenih posljedica.

Načini zaštite od ionizirajućeg zračenja:

### **1) Udaljenost od izvora zračenja**

Poželjno je ako smo u mogućnosti biti što dalje od izvora zračenja. Intenzitet ionizirajućeg zračenja opada s kvadratom udaljenosti. Ako se udaljenost od izvora zračenja poveća dva puta, intenzitet zračenja smanjiti će se četiri puta.

### **2) Vrijeme trajanja ozračivanja**

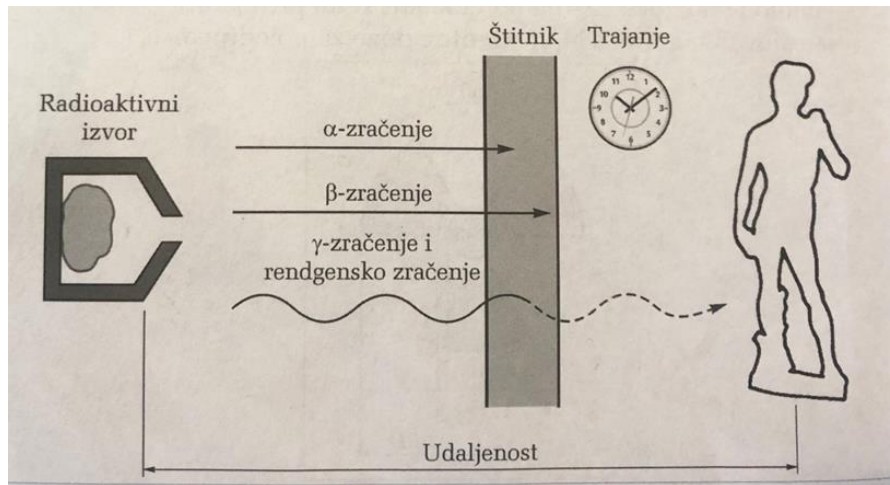
Ozračenost pojedinca razmjerna je vremenu izlaganja zračenju. Koliko se puta smanji trajanje izlaganja zračenju, toliko se puta smanji i njegovo ozračivanje. Potrebno je nastojati biti što je moguće kraće izložen zračenju.

### 3) Štitovi

Za zaštitu od ionizirajućeg zračenja upotrebljavaju se odgovarajući štitovi. Štit je tijelo koje se postavlja na put zračenju kako bi se ono djelomično ili potpuno apsorbiralo u materijalu štita ili pak raspršilo iz osnovnog snopa. Čestično zračenje drugačije se apsorbira od elektromagnetskog i neutronskeg zračenja. Svrha je štita da nuklearnim reakcijama koje se odvijaju između izvora zračenja i odgovarajućeg materijala od kojeg je napravljen štit smanji intenzitet zračenja na njegovu izlasku. Uporabom prikladnih štitova značajno se smanjuje doza koju pojedinac primi od nekog izvora zračenja. Za zaštitu od gama i neutronskeg zračenja neophodno je koristiti štitove, dok su mnogo manje potrebni za zaštitu od alfa i beta-zračenja. [12]

Alfa-zračenje ne predstavlja problem s gledišta zaštite te najčešće ne zahtijeva uporabu štita. Beta-čestice prolazeći kroz materiju gube energiju zbog interakcije s atomskim jezgrama i orbitalnim elektronima te skreću s pravocrtne putanje. Smanjenje broja beta-čestica pri prolasku kroz materijal približno je eksponencijalno. Za zaštitu od beta-zračenja treba uzeti u obzir i zakočno zračenje koje kod teških materijala nije zanemarivo. Zbog toga su najpogodniji laki materijali kao aluminij, staklo ili pleksiglas u kojima ne dolazi do zakočnog zračenja te se beta-čestica zaustavlja u sloju materijala od nekoliko milimetara. Za izradu štita od gama i rendgenskog zračenja najčešće se upotrebljavaju materijali velike gustoće, od elemenata visokog atomskog broja kao što je olovo. Često se upotrebljavaju i deblji štitovi od jeftinijih i dostupnijih materijala kao na primjer beton i željezo. Uz klasične zaštitne materijale kompozitni materijali postaju sve dostupniji za zaštitu od gama-zračenja. Kompozitni materijali mogu biti od onih jednostavnijih kao što su prekrivači od olovne vune sa zaštitnim plastičnim navlakama do složenijih kao što su zaštite izgrađene od metala velike gustoće raspršenog u organskim polimerima. Zaštita od neutronskeg zračenja nešto je kompliciranija te se teže provodi. Neutroni se ne mogu dobro apsorbirati jer su udarni presjeci za apsorpciju jako maleni. Zbog toga je potrebno prvo usporiti neutrone, čime raste udarni presjek za apsorpciju. Najveću sposobnost usporavanja neutrona imaju materijali s velikim postotkom vodika. Tako se može upotrijebiti voda kao štit, a kako je nepogodna u tekućem obliku, često se upotrebljava parafin. Kada prolazi kroz materijal, neutron gubi energiju ili je izbačen iz materijala sudarom s jezgrama u atomu. Ako je kinetička energija neutrona pri sudaru očuvana, dolazi do elastičnog raspršenja. Međutim, ako neutron ostavi jezgru u pobuđenom stanju, javlja se neelastično raspršenje pri kojem može doći do nuklearne reakcije koja rezultira novim produktima. Ako je produkt takve reakcije gama-zraka, pri izradi štitova potrebno je uzeti u obzir zaštitu od sekundarno nastalih gama-zraka.

Zbog toga je neutronska izvor potrebno zaštititi kombinacijom štita od gama i neutronskega zračenja. Najčešće se upotrebljava beton jer sadrži približno 10% vode koja usporava neutrone, a ujedno štiti i od gama-zraka. [12] [26]



Slika 18: Slikovit prikaz postupaka zaštite od zračenja [10]

## 6.1 Projektiranje štitova

Elektromagnetsko zračenje jednim se dijelom apsorbira, dok ostatak zračenja prolazi kroz štit. Zbog toga je vrlo važno odabrati štit određene debljine tako da se tok zračenja smanji na vrijednost koja uzrokuje doze zračenja koje su manje od graničnih dopustivih doza. Pri pravilnom planiranju izrade štitova potrebno je znati kolika je energija gama-zračenja, zatim kolika je aktivnost izvora kao i udaljenost štita od izvora zračenja. Također je važno znati koliko se vremena koristi neki izvor zračenja kao i svojstva materijala od kojeg se izrađuje štit. [22]

Interakcija gama-zračenja sa zaštitnim materijalima posljednjih je nekoliko desetljeća predmet proučavanja u području zaštite od zračenja. Tok gama-zrake pri prolasku kroz materijal ovisi o jakosti izvora, debljini materijala, atenuacijskom koeficijentu te faktoru nakupljanja. Nakon prolaska zračenja kroz sloj materijala uvijek ostaje neki dio toka zračenja. Kako se ne može izraziti debljina sloja materijala nakon koje bi se zaustavilo sve gama-zračenje uvodi se veličina koja se naziva sloj poludebljine materijala (HVL - Half value layer). Taj sloj predstavlja onu debljinu materijala za koju intenzitet upadnog zračenja opadne na pola vrijednosti početnog iznosa. Sloj poludebljine materijala ovisi o energiji upadnog zračenja kao i o materijalu od kojega je izrađen štit.

Atenuacija gama-zračenja nastaje interakcijom zračenja s materijom. Stupanj atenuacije gama-zračenja ovisi o energiji fotona, atomskom broju elementa, gustoći te o debljini štita. Atenuacijski koeficijent važan je parametar pri proučavanju interakcije gama-zračenja s materijalima od kojih se izrađuju štitovi. Vrijednosti atenuacijskih koeficijenta određuju se eksperimentalno za različite materijale pri određenim vrijednostima energije fotona te su dostupni iz različitih izvora kao što je npr. baza podataka Nacionalne ustanove za norme i tehniku (NIST - National Institute of Standards and Technology). Pri izračunavanju debljine štita upotrebljava se eksperimentalno utvrđena vrijednost atenuacijskog koeficijenta, ovisno o vrsti materijala od kojeg se izrađuje štit i energiji fotona koja se upotrebljava. No upravo je najveća poteškoća pri proračunu djelotvornosti štita odrediti faktor nakupljanja (tzv. *build-up factor*). Faktor nakupljanja ovisi o geometriji i sekundarnim nuklearnim reakcijama u nekom materijalu koje su prouzrokovane gama-zračenjem. Proračun debljine štita složen je proces ne samo zbog sekundarnog zračenja koje nastaje već i zbog toga što stvarni izvori nisu točkasti. [12] [27]

Jednadžba koja prikazuje prigušenje snopa gama-zraka:

$$N(x) = N(0)e^{-\mu x} = N(0)e^{-\frac{\mu}{\rho}\rho x}$$

ne daje osnovu za izračun potrebne debljine štita s obzirom na to da dolazi do niza interakcija i raspršenja gama-zraka (Comptonovo raspršenje, tvorba parova) čime se mijenja energija i smjer zraka. Zbog toga se prethodna jednadžba preoblikuje u:

$$N(x) = B(E, \rho x)N(0)e^{-\frac{\mu}{\rho}\rho x}$$

gdje  $B(E, \rho x)$  predstavlja faktor nakupljanja koji ispravlja danu relaciju te ovisi o vrsti materijala, energiji gama-zraka i debljini štita. [28]

## 6.2 Vrste štitova

### 6.2.1 Štitovi u funkciji zaštite ljudskog tijela

Štitovi koji se koriste u medicinskoj dijagnostici iznimno su važni za pacijente kao i za radnike izložene ionizirajućem zračenju. Prostorije u kojima se provode dijagnostičke pretrage moraju biti zaštićene i izolirane od okoline. U zidove takvih prostorija ugrađuju se olovne ploče ili ploče od materijala koji zadržava prodor rendgenskih zraka u jednakoj mjeri kao i olovo ili se pak zidovi premazuju slojem baritne žbuke. U radiološkoj zaštiti često se moć apsorpcije različitih materijala određuje linearnim ekvivalentom olova. Ako se upotrijebi 1 mm debljine olova, za jednak učinak zaštite potrebna je debljina čelika od 6 mm, baritnog betona od 14 mm ili običnog betona od 75 mm. Zaštita također uključuje točno određenu veličinu prostorije u kojoj se nalazi izvor zračenja, normative zaštite zidova, podova, stropova kao i zaštitu vrata i prozora. Osim što služi za zaštitu prostorija, olovo se koristi kao zaštitna oprema za pacijente izložene zračenju, pa tako i profesionalno izloženo osoblje. [29]

Prilikom sudara rendgenskih zraka s česticama materije nastaje raspršeno zračenje. Glavni izvor raspršenog zračenja sam je pacijent, odnosno dio tijela pacijenta koji je izložen zračenju. Zbog toga je tijekom dijagnostičkih postupaka koji se provode potrebno koristiti zaštitne štitove kako bi se smanjilo ozračenje dijelova tijela koji se ne pregledavaju. Za zaštitu profesionalnog osoblja izloženog raspršenom zračenju u medicini, dentalnoj ili veterinarskoj praksi koriste se olovne pregrade i paravani u prostoriji. Oni se po potrebi mogu premještati te se koriste u okviru raznih procedura tijekom snimanja kada osoba mora biti uz pacijenta. Također se koristi i zaštitni stolac koji štiti donji dio tijela liječnika od raspršenog zračenja, a izgrađen je od olovne gume ili lima prekrivenog drvetom. S obzirom na to da je pacijent glavni izvor raspršenog zračenja, najbolja zaštita za profesionalno osoblje jest zaštitna kabina za pacijenta. Pacijent se smješta u kabinu koja izgledom podsjeća na okomito postavljenu ormar bez dna i poklopca. Stjenke kabine izgrađene su od drveta, a u njih je ugrađen sloj olovnog lima. Osim zaštitnih naprava u prostoriji koriste se i osobna zaštitna sredstva. Njih pojedinac nosi na svome tijelu, a uključuju zaštitne pregače, zaštitne rukavice, štitnik za vrat, zaštitne naočale, štitnike za ovarijske i testise. Danas se pregače za profesionalno osoblje izgrađuju od sintetičkog materijala koji je prožet olovom, dok se dio za leđa izgrađuje od olovne gume kako pregače ne bi bile preteške. Zaštitni učinak opreme pri dijagnostičkom pregledu mora biti jednakovrijedan učinku olova debljine najmanje 0,5 mm. Pri većim energijama kod terapijskih metoda debljina olova mora biti višestruko veća. [23] [29]

## 6.2.2 Štitovi u funkciji zaštite uređaja

### *Štitovi kod rendgenskog uređaja*

Za zaštitu od zračenja veoma je važno da rendgenski uređaji budu tehnički postavljeni i kontrolirani. Zaštitu na rendgenskom uređaju čine sloj olova u oklopu rendgenske cijevi, filtri na izlaznom dijelu rendgenske cijevi, kolimator, olovno zaštitno staklo na ekranu uređaja te zaštitne rese načinjene od olovne gume oko elektronskog pojačala.

Rendgenska cijev postavljena je u olovni oklop načinjen od olovnog lima i električnog izolacijskog materijala. Svrha je olovnog oklopa da djelomično apsorbira zračenje koje dopire sa strana i iza rendgenske cijevi. Kako je olovo teško te se rendgenska cijev često pomiče, ograničena je debljina olovnog oklopa. Zaštitni oklopi koji bi jače apsorbirali zračenje bili bi iznimno teški i veliki te bi ih bilo nemoguće koristiti. Rendgenske zrake koje izlaze iz rendgenske cijevi moraju biti filtrirane. Zbog toga se postavljaju metalni filtri na izlazni dio cijevi čija je zadaća apsorbiranje mekanog dijela snopa zračenja. Intenzitet zračenja opada uporabom filtra koji je izrađen od elemenata s većim atomskim brojem, tako da će filtriranje biti intenzivnije pri prolasku kroz teže elemente. Filtri se najčešće izrađuju od aluminija, cinka ili pak bakra. Kada ne bi bilo filtra, mekane rendgenske zrake apsorbirale bi se u površinskom sloju kože pacijenta te bi uzrokovale nepoželjno biološko djelovanje, a ne bi sudjelovale u nastajanju rendgenske snimke. Kako bi se smanjilo raspršeno zračenje u okolini te suzio primarni snop zračenja, koristi se kolimator. Obično se izrađuje od nekoliko olovnih pločica koje su smještene na određenoj udaljenosti. Pomicanjem olovnih pločica određuje se širina snopa rendgenskih zraka. Uloga olovnog zaštitnog stakla ekrana jest smanjenje raspršenog zračenja, ali i dijela zračenja koji je prošao kroz fluorescentni zaslon i tijelo pacijenta. Pokraj ekrana uz ručke ugrađuju se olovne ploče kako bi se apsorbirale zrake koje se rasprše u tijelu pacijenta ili na nekom dijelu uređaja. Na taj se način štite ruke liječnika. Također, s donje strane ekrana vise rese od olovne gume koje štite liječnika od raspršenog zračenja. One su pokretne kako bi se pri pomicanju pacijenta uvijek našle između njega i liječnika. [29]



## Štitovi kod gama-spektrometra

Kako pozadinsko zračenje iz prirodnih izvora koje je stalno prisutno u okolini ne bi utjecalo na mjerenja koja se provode, gama-spektrometrom potrebno ga je zaštititi. Zaštita na gama-spektrometru također osigurava da zračenje radioaktivnog izvora unutar detektora ne utječe na okolinu.

Gama-spektrometri nalaze se u prostoriji u kojoj se temperatura održava na 20 °C te se ne postavljaju u blizinu uređaja koji proizvode vibracije. Nosač i zaštitna obloga uređaja načinjeni su od 12,7 mm čelika s niskim udjelom ugljika. Izvor zračenja i detektor nalaze se u oklopu izrađenom od 101 mm olova. Olovo je materijal velike gustoće koji najučinkovitije prigušuje gama-zračenje. Unutrašnja stijenka štita obložena je s 1,5 mm bakrene folije te 0,5 mm folije od kadmija. Bakar i kadmij koriste se kao zaštita od rendgenskog zračenja. Kadmij je učinkovit kao filter koji prigušuje rendgenske zrake, dok bakar, osim što služi kao zaštita od rendgenskih zraka, sprječava izlaganje otrovnom kadmiju. Danas se umjesto kadmija upotrebljava kositar, stoga je štiti obložen folijom od bakra i kositra. Kako bi se zaštitio okoliš i profesionalno osoblje, počeo se izbjegavati kadmij jer je vrlo otrovan. Štitovi koji su obloženi folijom od kadmija debljine 0,5 mm zaustavljaju oko 70% rendgenskog zračenja, dok štitovi sa folijom od kositra debljine 1 mm zaustavljaju 95% propuštenog rendgenskog zračenja. Uz bakrenu foliju od 1,5 mm ukupna atenuacija rendgenskog zračenja iznosi 98,5%. [30] [31]



Slika 19: Ortec HPGe Gama-spektrometar

## 7. Materijali i metode

U sklopu praktičnog dijela diplomskog rada provedena su mjerenja koja prikazuju učinkovitost materijala olova, bakra i polimetilmetakrilata (tzv. akril ili pleksiglas) u funkciji zaštite od gama-zračenja. Kao izvori gama-zračenja upotrebljavani su  $^{137}\text{Cs}$  i  $^{152}\text{Eu}$ , dok su kao detektori upotrebljavani instrumenti RDS-31 S/R Multi-Purpose Survey Meter i FH 40 G-L10 Multi-Purpose Digital Survey Meter. Uz pomoć instrumenata RDS-31 i FH 40 G-L10 izmjerena je brzina ambijentalnog doznog ekvivalenta  $H^*(10)$ , odnosno brzina doze za 20 različitih udaljenosti od izvora ionizirajućeg zračenja. Zatim su između instrumenata i izvora zračenja postavljane olovne, bakrene i akrilne ploče različitih debljina te je ponovno izmjerena brzina doze sa svakim od navedenih štitova. Mjerenja su provedena na Institutu za medicinska istraživanja i medicinu rada u Zagrebu, u Jedinici za zaštitu od zračenja.

U narednim točkama opisani su korišteni mjerni instrumenti, izvori zračenja te štitovi. Zatim su prikazani i analizirani grafikoni ovisnosti brzine doze o kvadratu udaljenosti te o debljini zaštitnog materijala.

### 7.1 Korišteni mjerni instrumenti

#### 7.1.1 RDS-31 S/R Multi-Purpose Survey Meter

RDS-31 je uređaj tvrtke *Mirion Technologies* za detekciju gama i rendgenskog zračenja, a kao primarni detektor koristi Geiger-Mullerovu cijev. Također se može rabiti i za detekciju alfa i beta-zračenja uz primjenu vanjskih sondi koje se priključuju na uređaj. RDS-31 radi na baterije, lagan je i jednostavan za rukovanje, otporan na vlagu i udarce te je time pogodan za uporabu u vanjskim uvjetima. Mnogobrojne funkcije čine ga prikladnim za različite primjene. Prilagođen je pojedincu koji mjeri ionizirajuće zračenje u prirodnom kao i u radnom okruženju. Uređaj se upotrebljava za kontrolu stanja radioaktivnosti u okolini, a također je pronašao primjenu u industriji, medicini te u razne laboratorijske i vojne svrhe. [32] [33]



Slika 20: Mjerni uređaj RDS-31

Na uređaju se nalazi veliki LCD zaslon s pozadinskim osvjetljenjem te dvije funkcijske tipke postavljene iznad zaslona. Tipka za uključivanje i isključivanje uređaja te tipka izbornika. Na tipkama se nalaze različiti simboli kako bi se one lakše razlikovale. Dužina trajanja pritiska tipki važna je postavka uređaja kojom se izbjegavaju neželjene akcije, primjerice, slučajno gašenje uređaja. Uređaj sadrži vizualne, vibracijske i auditivne alarme. Alarm uključivanja uređaja ili detektiranja čestica dolazi iz zvučnika koji se nalazi na uređaju. Na njemu se također nalazi priključak za vanjsku sondu kao i za kabel za povezivanje RDS uređaja s računalom. Funkcija histogram vrlo je korisna jer omogućuje pohranjivanje izmjerenih vrijednosti brzina doza u memoriju uređaja. Moguće je i konstruirati prečac funkcije te na taj način dodatno olakšati primjenu mjernog instrumenta. RDS-31 rezultat iskazuje u dvije mjerne jedinice Sv(/h) i R(/h). Ako se priključe vanjske sonde, rezultat može iskazati i u drugim mjernim jedinicama kao što su Bq, cps, cpm ili dpm. [32] [33]

### 7.1.2 FH 40 G-L10 Multi-Purpose Digital Survey Meter

Thermo Scientific FH 40G-L10 uređaj je koji se koristi za mjerenje brzine doze ambijentalnog doznog ekvivalenta gama i rendgenskog zračenja. Kao detektor zračenja upotrebljava se plinski proporcionalni brojač. Interval mogućeg mjerenja kreće se u rasponu od 10 nSv/h

do 100 mSv/h. Detektor registrira i broji impulse koji se aktiviraju u prethodno odabranom vremenskom intervalu. Iz tih vrijednosti izračunava se brzina doze ambijentalnog doznog ekvivalenta. Prikazane izmjerene vrijednosti uključuju: brzinu doze, srednju vrijednost brzine doze, najveću brzinu doze te ukupnu dozu. Utvrđene izmjerene vrijednosti mogu se pohraniti u uređaj i s pomoću posebnog softvera prenijeti na računalo za daljnju obradu. Uređaj je pogodan za uporabu na otvorenom prostoru. FH 40 G-L10 otporan je na promjene, malih dimenzija te lagan i vrlo jednostavan za korištenje. Dolazi u plastičnoj nepropusnoj zaštiti koja štiti uređaj od vanjskih utjecaja, a može se rabiti u temperaturnom rasponu od -30 °C do 55 °C. [34]



Slika 21: Mjerni uređaj FH 40 G-L10

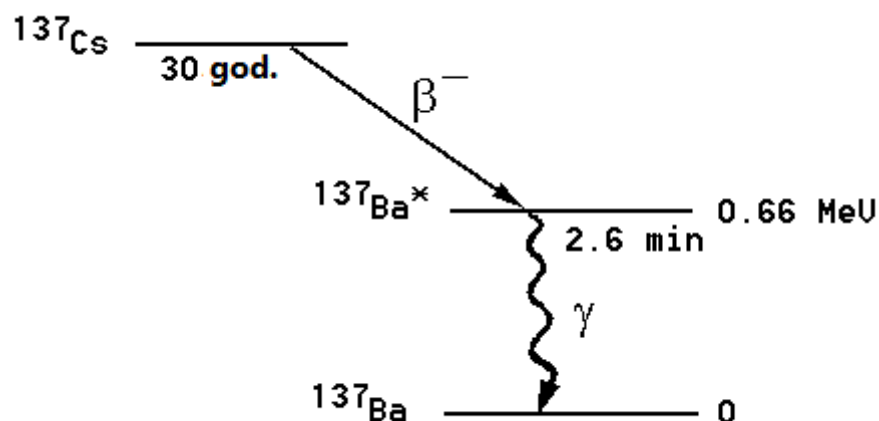
Uređaj sadrži razne funkcije koje se mogu odabrati i postaviti uz pomoć četiri tipke koje se nalaze na uređaju. Tipka „ON/OFF“ (gore lijevo) upotrebljava se za uključivanje i isključivanje uređaja, tipka „Functions“ (dolje lijevo) upotrebljava se za postavljanje odabranih vrijednosti, zatim tipka „Illuminator“ (gore desno) za osvjetljavanje zaslona, dok tipka „Sound generator“ (dolje desno) služi za uključivanje i isključivanje zvučnika. Tipke „Illuminator“ i „Sound generator“ s tipkom „Functions“ upotrebljavaju se za postavljanje različitih parametara funkcija. Na zaslonu osim izmjerenih vrijednosti prikazuju se i podaci o uređaju, kao na primjer trenutno stanje baterije, postavke alarma te poruke ako nastupi neka pogreška. Kako bi uređaj mogao mjeriti različite vrste zračenja ( $\alpha$ -zračenje,  $\beta$ -zračenje, neutronska zračenje) ili detektirati skrivene izvore zračenja, koriste se odgovarajuće vanjske sonde. Mjerni instrument odmah prepoznaje odgovarajuće sonde te u skladu s njima prilagodi zaslon. [34]

## 7.2 Korišteni izvori zračenja

### 7.2.1 $^{137}\text{Cs}$

Cezij je kemijski element prve skupine periodnog sustava elemenata te pripada skupini alkalijskih metala. Taj srebrnasto bijeli metal jedan je od najreaktivnijih alkalijskih metala u prirodi, ali i najmekanijih jer se na temperaturi malo iznad sobne ( $28.44\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) pretvara u tekućinu. Cezij je po svojim kemijskim i fizikalnim svojstvima sličan rubidiju i kaliju. Veliki interes za prisutnost i rasprostranjenost cezija pojavila se u razdoblju intenzivnog testiranja nuklearnog oružja. U prirodi postoji mnogo izotopa cezija, od kojih je samo jedan stabilan,  $^{133}\text{Cs}$ . Od svih izotopa cezija postoji desetak značajnih radioaktivnih izotopa, od kojih su najvažniji  $^{134}\text{Cs}$  i  $^{137}\text{Cs}$ .  $^{134}\text{Cs}$  ima vrijeme poluraspada 2,06 godina, dok je vrijeme poluraspada  $^{137}\text{Cs}$  30,17 godina. Zbog dugog vremena poluraspada i velikog prinosa prilikom nuklearne fisije  $^{137}\text{Cs}$  jedan je od najznačajnijih fisijskih produkata. [35] Izvori iz kojih je  $^{137}\text{Cs}$  danas prisutan u okolini jesu nuklearne elektrane, otpadne radioaktivne tvari te nesreće u nuklearnim postrojenjima. Veće količine  $^{134}\text{Cs}$  i  $^{137}\text{Cs}$  otpuštene su u atmosferu 1986. godine prilikom nesreće u nuklearnoj elektrani u Černobilu te tako dospijeva na područja širom Europe. Kako je vrijeme poluraspada  $^{137}\text{Cs}$  približno 30 godina, on se može pratiti i danas.

Izotop od interesa jest beta-gama emiter zračenja. Emitira gama-zračenje na energiji od 661,62 keV koje slijedi emisiju beta-čestice.  $^{137}\text{Cs}$  raspada se do stabilnog  $^{137}\text{Ba}$  ili češće do metastabilnog  $^{137\text{m}}\text{Ba}$ , koji s vremenom poluraspada od približno 2 minute, prelazi u stabilni  $^{137}\text{Ba}$  te istovremeno emitira gama-zračenje kako je prikazano na slici.



Slika 22: Shema raspada  $^{137}\text{Cs}$  [36]

$^{137}\text{Cs}$  može biti iznimno opasan za žive organizme. Beta-čestica predstavlja veliku opasnost ako se unese u tijelo prilikom ingestije i inhalacije. U organizam ulazi hranom te se resorbira kroz sluznicu probavnog trakta.  $^{137}\text{Cs}$  dijeli metabolička svojstva s kemijskim elementima kalijem i kalcijem te se u tijelu zamjenjuje s kalijem i reproducira u čitavom organizmu. Nakon što se cezij unese u organizam, vrlo se brzo apsorbira u krvi te se nalazi u intracelularnim prostorima gotovo svih tkiva, odakle se kao kalij zamjenjuje ionskom izmjenom. [35] Izlaganje  $^{137}\text{Cs}$  može dovesti do nastanka opekline, akutne bolesti zračenja, a može izazvati čak i smrt. Također se izlaganjem povećava rizik od karcinoma zbog velike energije gama-zračenja. [37]

Izotop  $^{137}\text{Cs}$  koristi se za kalibraciju uređaja za detekciju zračenja kao npr. Geiger-Müllerova detektora jer ima samo jednu energiju na kojoj emitira gama-zračenje. U medicini se koristi u uređajima za medicinsku terapiju zračenjem kod liječenja karcinoma te je pogodan za industrijsko procesiranje materijala. Rabi se za mjerenje i kontrolu protoka tekućine kroz cijevi, u uređajima za mjerenje debljine materijala kao što je papir ili listići metala, istraživanje podzemnih izvora nafte itd.

Za provedena mjerenja korišten je kalibracijski izvor Češkog meteorološkog instituta čiji je certifikat priložen u nastavku. Kalibracijski izvor potječe od 12. 10. 2015. godine. Tada je aktivnost izotopa  $^{137}\text{Cs}$  iznosila je 186,5 kBq. Aktivnost izotopa određena je za mjerenja provedena na Institutu za medicinska istraživanja i medicinu rada dana 23. 9. 2020. godine prema formuli:

$$A = A_0 2^{-\frac{t}{T}}$$

te iznosi 166,305 kBq.



## Czech Metrology Institute

Okružní 31, 638 00 Brno, Czech Republic

phone +420 545 555 111

www.cmi.cz

**Workplace:** Regional Branch Prague, Radiová 1136/3, 102 00 Praha 10  
Ionizing Radiation Building, Radiová 1288/1a  
Phone: +420 266 020 497, Fax: +420 266 020 466

# CERTIFICATE

Certificate No.: 1035- SE - 30780-15      Type: EG 3X      Serial No.: 230915-1533028

Radionuclide: Cs-137

Half life: 10976 days

Activity: 186,5 kBq

Radionuclide impurities: Cs-134 0,05 %

Reference date: 12.10.2015

Combined standard uncertainty: 0,7 %

### Description:

Weighted part of the standard solution is adsorbed on the filter paper in polystyrene capsule. After drying the capsule is sealed.

### Measuring method:

The activity of the standard is calculated from the weight of standard solution and is checked by relative measurement of gamma photon flux. Specific activity of the solution is determined by absolute method.

### Note:

The capsule and the reflector layer of common NaI(Tl) scintillators provide sufficient filtering of beta radiation of the respective radionuclide. Only with types EG 1 and EG 3 with Ce-144 is necessary insert between standard and detector at least 3,2 mm Al.

Classification of sealed source: ISO C 12133

Wipe test passed: 25.9.2015

Date of the certificate issue: 9.10.2015

Certificate validity: 3 years

### Customer:

Institut za medicinska istraživanja i medicinu rada

Ksaverska cseta 2, p.p. 291

HR-100 Zagreb

CROATIA



*v.r.*  
Control: Ing. Vlasta Zdychová

*J. Šuráň*  
Ing. Jiří Šuráň, MBA  
Deputy Director of RB Prague

Slika 23: Certifikat kalibracijskog izvora

### 7.2.2 <sup>152</sup>Eu

Europij je kemijski element koji pripada skupini lantanoida. Od svih elemenata u skupini taj srebrno sivi metal najmekši je, ima najmanju gustoću, na zraku brzo oksidira te pri visokoj temperaturi (150 do 180°C) dolazi do samozapaljenja. U prirodi se pojavljuju dva stabilna izotopa europija, <sup>151</sup>Eu i <sup>153</sup>Eu. Od četrnaest značajnijih radioaktivnih izotopa samo četiri imaju dovoljno dugo vrijeme poluraspada da bi mogli izazvati opasnost.

Izotop od interesa <sup>152</sup>Eu nastaje cijepanjem jezgara uranija i plutonija. Iako najčešće nastaje kao fisijski produkt, može nastati i u nuklearnom reaktoru u kojem se za apsorpciju neutrona koriste kontrolne šipke izrađene od <sup>151</sup>Eu čija neutronska aktivacija uzrokuje stvaranje izotopa <sup>152</sup>Eu. Izotop <sup>152</sup>Eu s vremenom poluraspada od približno 13 godina prolazi beta-raspad i pri tome emitira značajne količine energije u obliku gama-zraka. Radionuklidi koji su stvoreni nuklearnim eksplozijama i danas su prisutni u atmosferi. Radioaktivni materijal taloži se na površini Zemlje u obliku radioaktivnih oborina te se zbog toga <sup>152</sup>Eu u manjim količinama može pronaći u tlu. [38] Također može biti prisutan u nuklearnim reaktorima i postrojenjima koja prerađuju istrošeno nuklearno gorivo. <sup>152</sup>Eu predstavlja vanjsku i unutarnju štetu za žive organizme. Snažno gama-zračenje predstavlja veliku opasnost za organizam, a ako se unesu u tijelo, beta-čestice jednako su opasne kao i gama-zrake. Prilikom ingestije i inhalacije <sup>152</sup>Eu se apsorbira u krv kroz probavni trakt te se dio taloži u jetri, a dio na površini kostiju čime je povećan rizik nastanka karcinoma jetre i kostiju.

<sup>152</sup>Eu se koristi za kalibraciju uređaja za mjerenje zračenja, ima mnogo energija, od niskih do visokih na kojima emitira gama-zračenje. Energije se ne poklapaju s energijama koje možemo pronaći u prirodi. <sup>152</sup>Eu i <sup>154</sup>Eu najzastupljeniji su radioaktivni izvori koji se upotrebljavaju za izradu gromobrana. Opasnost od takvih gromobrana javlja se kada dođe do pada te neovlaštenog uklanjanja gromobrana. Tada može doći do prekomjernog ozračenja pojedinca koji se nalazi u neposrednoj blizini. Izloženost zračenju ovisi o vrsti izvora, ali i duljini zadržavanju u blizini gromobrana. U medicini <sup>152</sup>Eu koristi se za HDR brahiterapiju (visoke brzine doze) gdje se izvor zračenja uvodi u tumor ili njegovu neposrednu blizinu. [39]

Za provedena mjerenja korišten je kalibracijski izvor Češkog meteorološkog instituta čiji je certifikat priložen u nastavku. Kalibracijski izvor potječe od 19. 12. 2018. godine. Tada je aktivnost izotopa <sup>152</sup>Eu iznosila je 513,9 kBq. Aktivnost izotopa određena je za mjerenja provedena na Institutu za medicinska istraživanja i medicinu rada dana 22. 9. 2020. te iznosi 469,64 kBq.





**Czech Metrology Institute**

Okružní 31, 638 00 Brno, Czech Republic

phone +420 545 555 111

www.cmi.cz

**Workplace:** Regional Inspectorate Prague, Radiová 1136/3, 102 00 Praha 10  
Department of Radionuclide Standards Production, Radiová 1288/1a  
phone +420 266 020 497

**CERTIFICATE**  
of the measurement standard of activity

Certificate No.: 1035-SE - 30913-18    Type: EG 3    Serial No.: 111217-1529009

Radionuclide: Eu-152    Half life: 4938,8 (58) days

Activity: 513,9 (36) kBq

Radionuclide impurities: gamma < 0,1%

Reference date: 19.12.2018

Description:

The weighed amount of the standardized solution is adsorbed on the filter paper in a polystyrene capsule. After drying out, the capsule is sealed. The activity of the measurement standard is calculated from the mass and specific activity of the standardized solution.

Metrological traceability:

The declared activity is traceable to the Czech National Measurement Standard of Activity of Radionuclides (ECM 440-1/97-002).

Note: -

Classification of sealed source: ISO/12/C12133    Wipe test passed: 4.12.2018

Date of the certificate issue: 13.12.2018    Certificate validity: 3 years

Customer:

Institut za medicinska istraživanja i medicinu rada

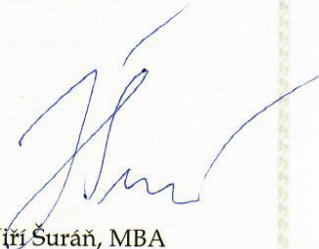
Ksaverska cesta 2, p.p. 291

HR-10000 Zagreb

Croatia

Checked by: Ing. Vlasta Zdychová



  
Ing. Jiří Šuráň, MBA  
Deputy Director of RI Prague

Slika 24: Certifikat kalibracijskog izvora

## 7.3 Korišteni štitovi

### 7.3.1 Olovni štit 5 cm/10 cm

Olovo je odavno poznato kao vrlo učinkovit materijal u zaštiti od različitih izvora zračenja te je kao takvo postalo standard u izradi štitova za zaštitu od zračenja. Svojstva olova koja ga čine izvrsnim zaštitnim materijalom jesu velika gustoća, visok atomski broj, jednostavna obrada, postojanost materijala te laka dostupnost. Najvažnije svojstvo olova pri sprječavanju prodora gama-zraka jest njegova gustoća. Gustoća olova iznosi  $11,35 \text{ g/cm}^3$ . Iako postoje elementi gušći od olova (tantal, volfram), ono je lako dostupno, lako se prerađuje te je niže cijene od ostalih materijala velike gustoće. Površina metala sjajna je i glatka, stoga je manje vjerojatno da će se kontaminirati raznim nečistoćama. Otporan je na koroziju i razne kemijske utjecaje. Olovni štitovi u zaštiti od zračenja mogu se primjenjivati u raznim oblicima, ovisno o potrebi, te mogu težiti od nekoliko grama pa do nekoliko tona. Najčešće se koriste olovne ploče, a zatim i olovne cigle, folije, stakla, olovna vuna, guma itd. [40]



Slika 25: Olovni štit

### 7.3.2 Bakreni štit 0,5 mm/1,0 mm/1,5 mm

Kako je gustoća vrlo važno svojstvo materijala u zaštiti od zračenja, osim olova kao dobar zaštitni materijal pokazao se bakar. Gustoća bakra iznosi  $8,96 \text{ g/cm}^3$ . Bakar se najčešće upotrebljava za zaštitu od rendgenskog zračenja. Od bakra se izrađuju filtri koji apsorbiraju mekane rendgenske zrake na izlasku iz rendgenske cijevi. Također se koristi u izradi štitova

gama-detektora za prigušenje rendgenskih zraka. Prednost je bakra u tome što nije štetan za ljude i okoliš.



Slika 26: Bakreni štit

### 7.3.3 Akrilni štit 1 cm/5 cm/10 cm

Polimetilmetakrilat je prozirni termoplastični materijal koji sadrži derivate akrilne kiseline. Poznat je pod komercijalnim nazivom akril ili pleksiglas. Gustoća akrila iznosi  $1,18 \text{ g/cm}^3$ , jednako kao i prosječna gustoća ljudskog tijela. Djelovanje zračenja na akril ovisi o prirodi, intenzitetu i trajanju zračenja. Akril ima jednak koeficijent apsorpcije gama-zračenja kao i voda. Zračenje velikog intenziteta može uzrokovati zamućenja i oštećenja na akrilnim pločama.



Slika 27: Akrilni štit

#### 7.4 Proces mjerenja

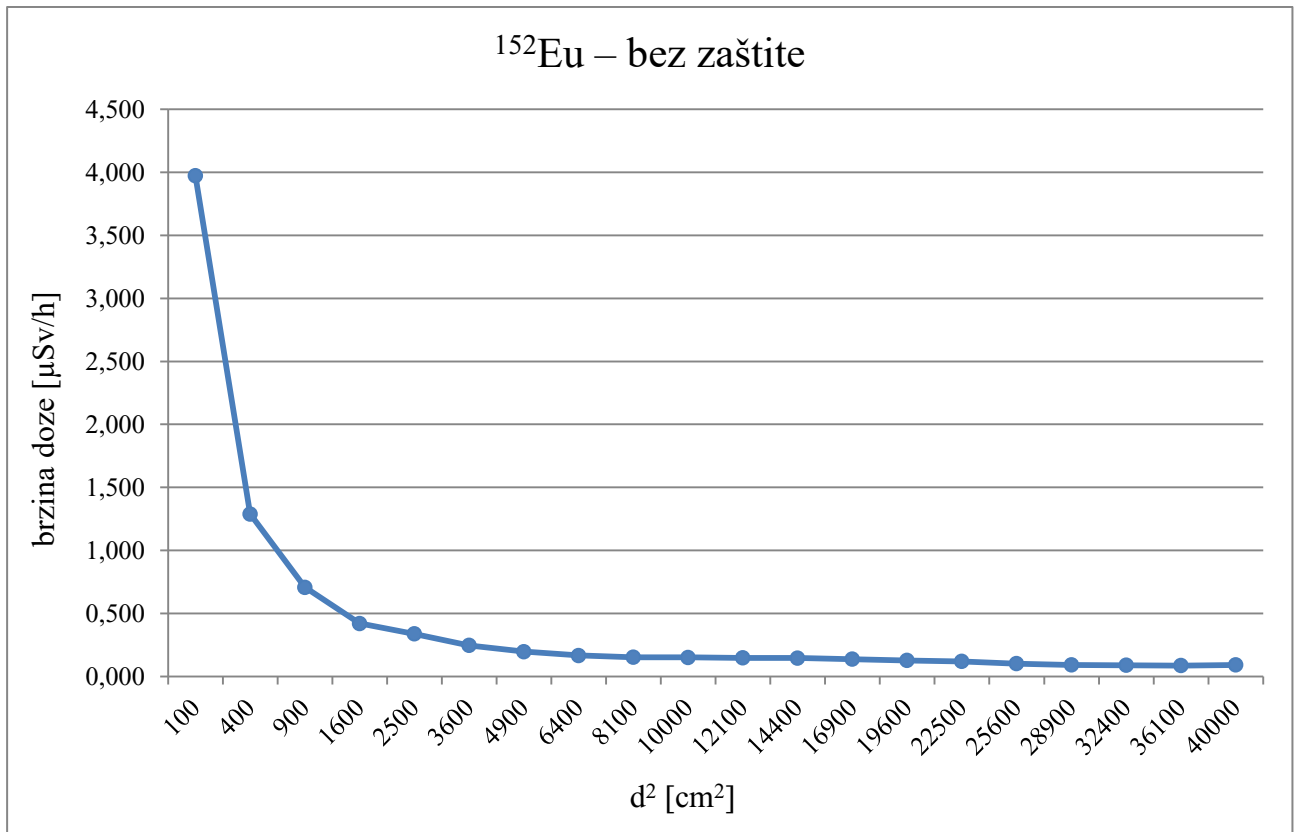
Prije početka izvođenja mjerenja izmjereno je pozadinsko zračenje u prostoriji bez prisutnosti izvora zračenja te iznosi  $0,06 \mu\text{Sv/h}$ .

Nakon što je postavljen izvor zračenja, određena je udaljenosti između izvora i krajnje točke na koju je postavljen detektor. S pomoću uređaja je izmjerena brzina doze zračenja za 20 različitih udaljenosti od izvora ionizirajućeg zračenja. Kada se uređaj postavi na određenu udaljenost potrebno ga je ostaviti neko vrijeme kako bi prikupio potrebne podatke te da bi se ustabilio rezultat. Uređajem su praćene i zabilježene vrijednosti brzine doze te su izražene u  $\mu\text{Sv/h}$ . Između izvora zračenja i uređaja postavljene su olovne, bakrene i akrilne ploče različitih debljina te je ponovno izmjerena brzina doze zračenja sa svakim od navedenih štitova.

## 8. Rezultati i rasprava

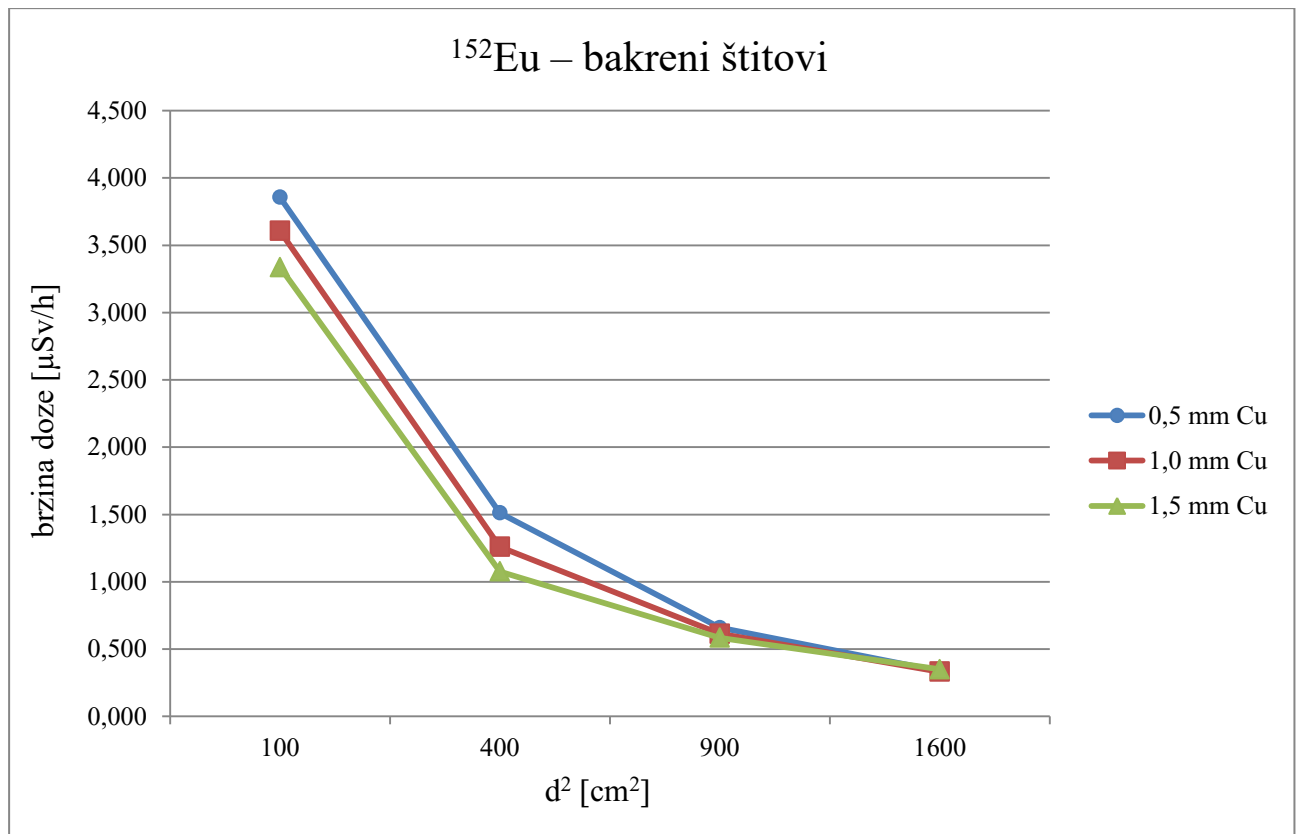
### $^{152}\text{Eu}$

Nakon provedenih mjerenja predočeni su grafikoni koji prikazuju ovisnosti brzine doze o kvadratu udaljenosti te o debljini zaštitnog materijala, pri čemu je korišten izvor zračenja  $^{152}\text{Eu}$ . Aktivnost izotopa  $^{152}\text{Eu}$  iznosi 469,64 kBq.



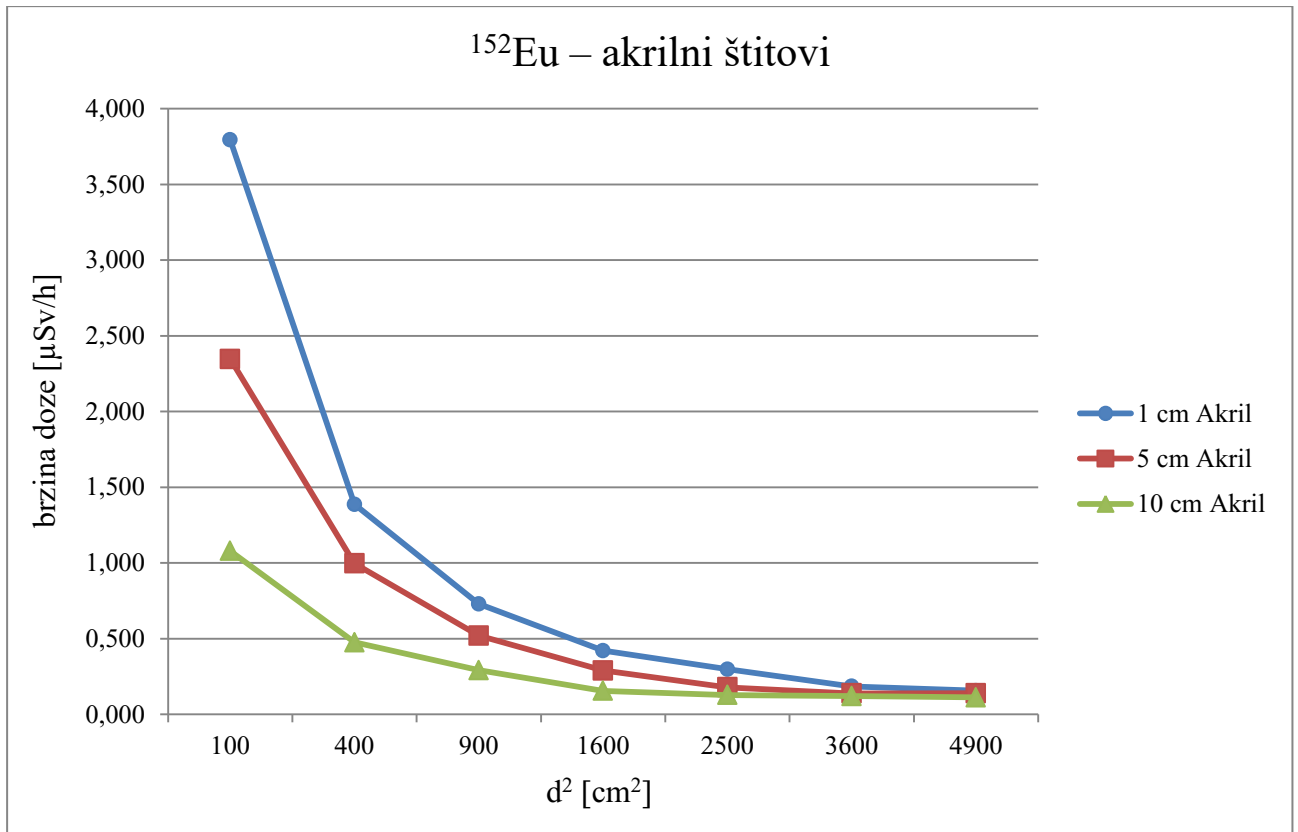
Grafikon 1: Ovisnost brzine doze zračenja o kvadratu udaljenosti bez prisutnosti štita, za izvor zračenja  $^{152}\text{Eu}$ .

- Iz podataka za brzinu doze zračenja i pripadajućih kvadrata udaljenosti od izvora zračenja do uređaja, može se zaključiti da brzina doze opada s kvadratom udaljenosti.



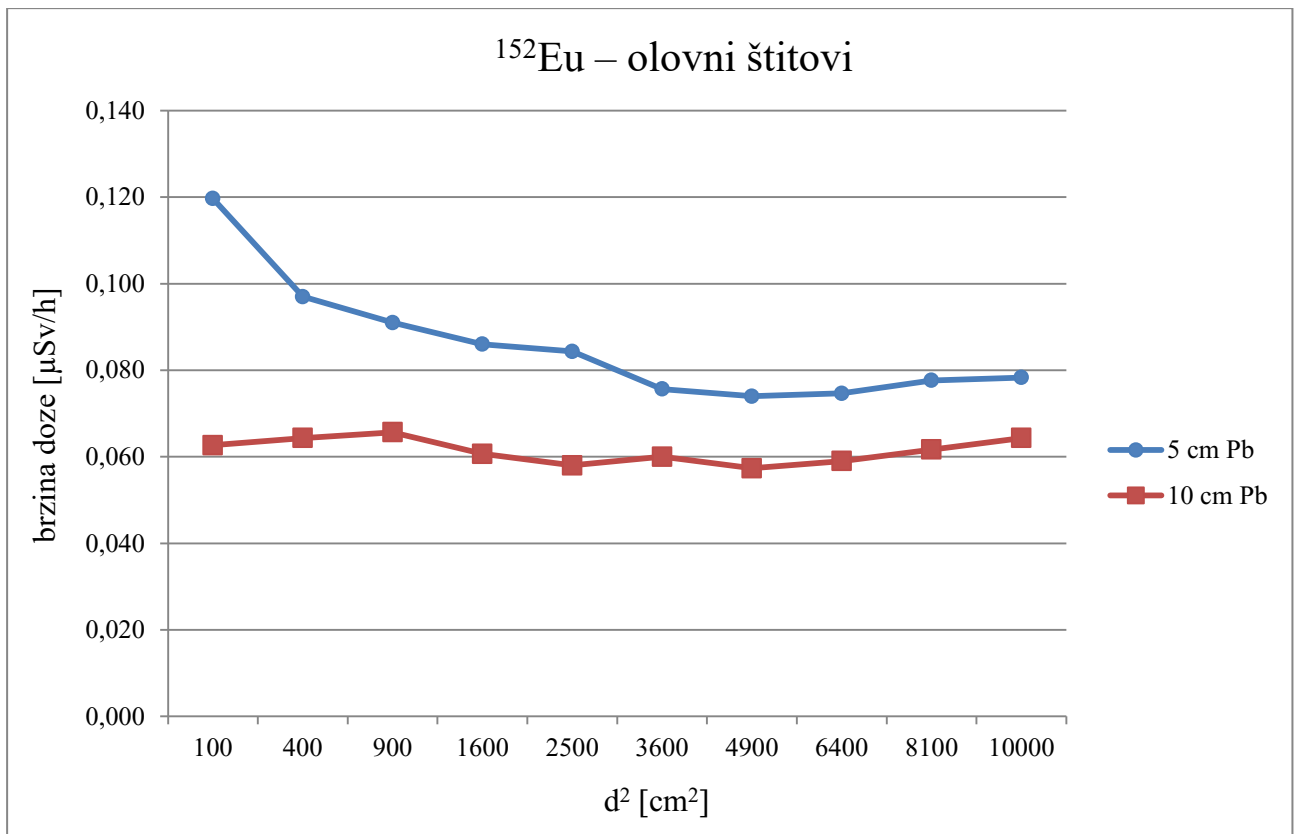
Grafikon 2: Ovisnost brzine doze zračenja o kvadratu udaljenosti uz prisutnost bakrenih štitova različite debljine, za izvor zračenja  $^{152}\text{Eu}$ .

- Između izvora zračenja i uređaja postavljeni su bakreni štitovi debljine 0,5 mm, 1,0 mm, 1,5 mm.
- Prema dobivenim podacima može se zaključiti da brzina doze osim kvadratom udaljenosti opada i uporabom debljeg štita. Najveća brzina doze izmjerena je za bakreni štit debljine 0,5 mm, dok je najmanja brzina doze izmjerena za najdeblji štit debljine 1,5 mm. Također je na grafikonu vidljivo da nema velike razlike između izmjerenih brzina doza za pojedine štitove jer su razlike u debljini štita malene.



Grafikon 3: Ovisnost brzine doze zračenja o kvadratu udaljenosti uz prisutnost akrilnih štitova različite debljine, za izvor zračenja  $^{152}\text{Eu}$ .

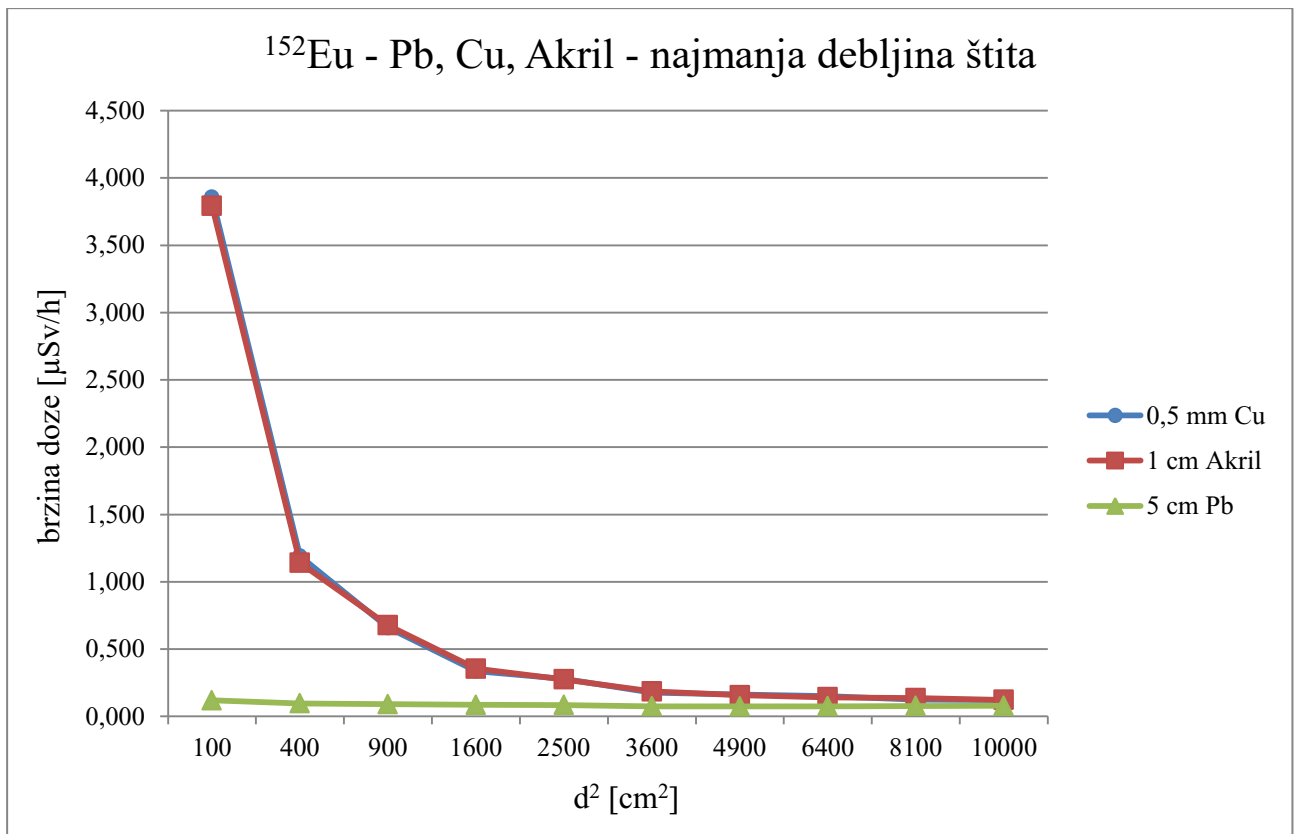
- Između izvora zračenja i uređaja postavljeni su akrilni štitovi debljine 1 cm, 5 cm, 10 cm.
- Prema dobivenim podacima može se zaključiti da brzina doze osim kvadratom udaljenosti opada i uporabom debljeg štita. Najveća brzina doze izmjerena je za akrilni štit debljine 1 cm, dok je najmanja izmjerena za štit debljine 10 cm.



Grafikon 4: Ovisnost brzine doze zračenja o kvadratu udaljenosti uz prisutnost olovnih štitova različite debljine, za izvor zračenja  $^{152}\text{Eu}$ .

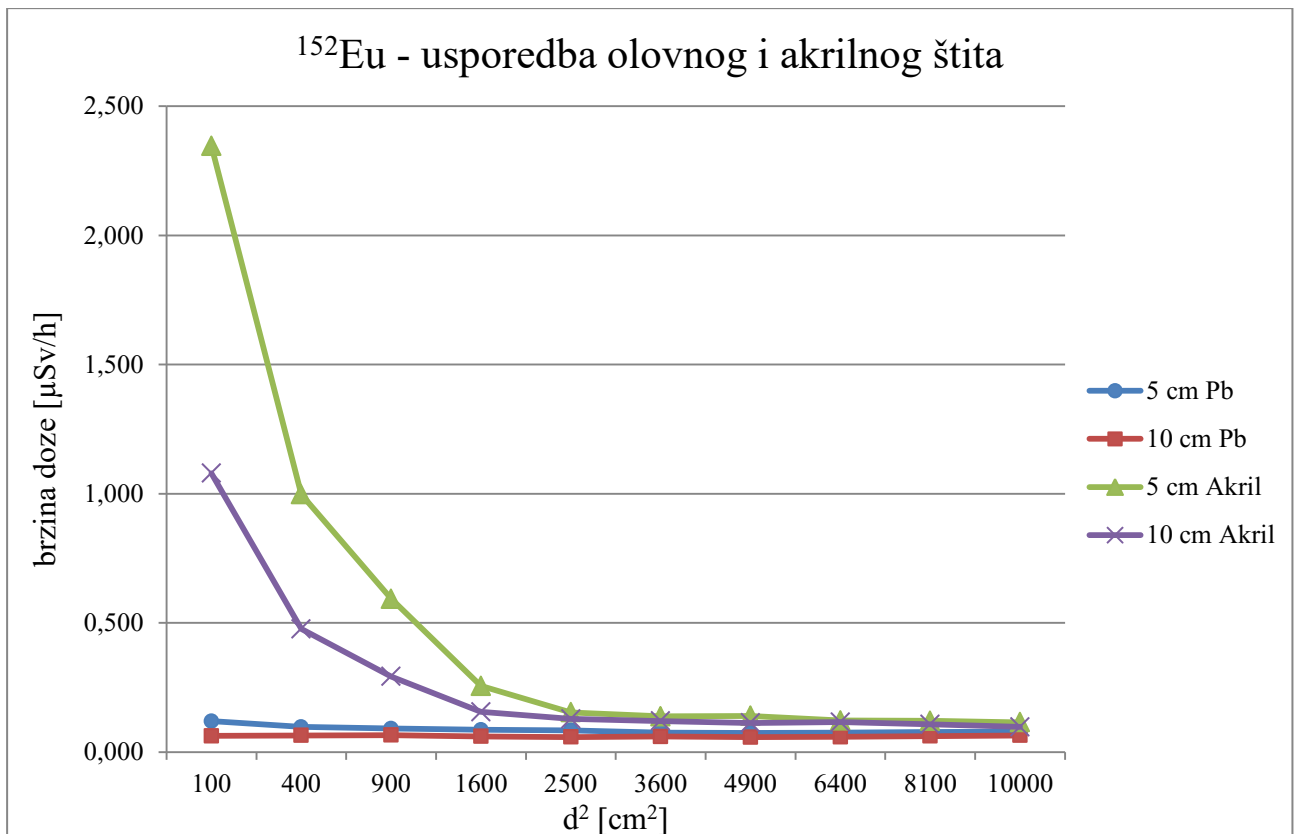
- Između izvora zračenja i uređaja postavljeni su olovni štitovi debljine 5 cm i 10 cm.
- Prema dobivenim podacima može se zaključiti da olovni štit debljine 10 cm ne propušta zračenje koje dolazi od izvora. Na svim udaljenostima detektor mjeri pozadinsko zračenje. Olovni štit debljine 5 cm također pretežno mjeri pozadinsko zračenje, dok je u neposrednoj blizini izvora povećanje brzine doze zanemarivo.
- Nakon prolaska kroz olovni štit intenzitet zračenja znatno je reduciran, čime je opravdana uporaba olovnog štita u zaštiti od zračenja.





Grafikon 5: Ovisnost brzine doze zračenja o kvadratu udaljenosti uz prisutnost olovnog, bakrenog i akrilnog štita najmanje debljine, za izvor zračenja  $^{152}\text{Eu}$ .

- Uspoređeni su podaci ovisnosti brzine doze zračenja o kvadratu udaljenosti uz prisutnost olovnog, bakrenog i akrilnog štita najmanje debljine.
- Iz grafikona je vidljivo da olovo pruža najbolju zaštitu od zračenja. Također je vidljivo da bakreni štiti debljine 0,5 mm daje jednaku zaštitu kao akrilni štiti debljine 1 cm iz čega se može potvrditi da bakar osigurava veću zaštitu od akrila.
- Olovo kao materijal najveće gustoće najbolje atenuira gama-zračenje, zatim ga slijedi bakar, dok je akril materijal najmanje gustoće te pruža najmanju zaštitu.

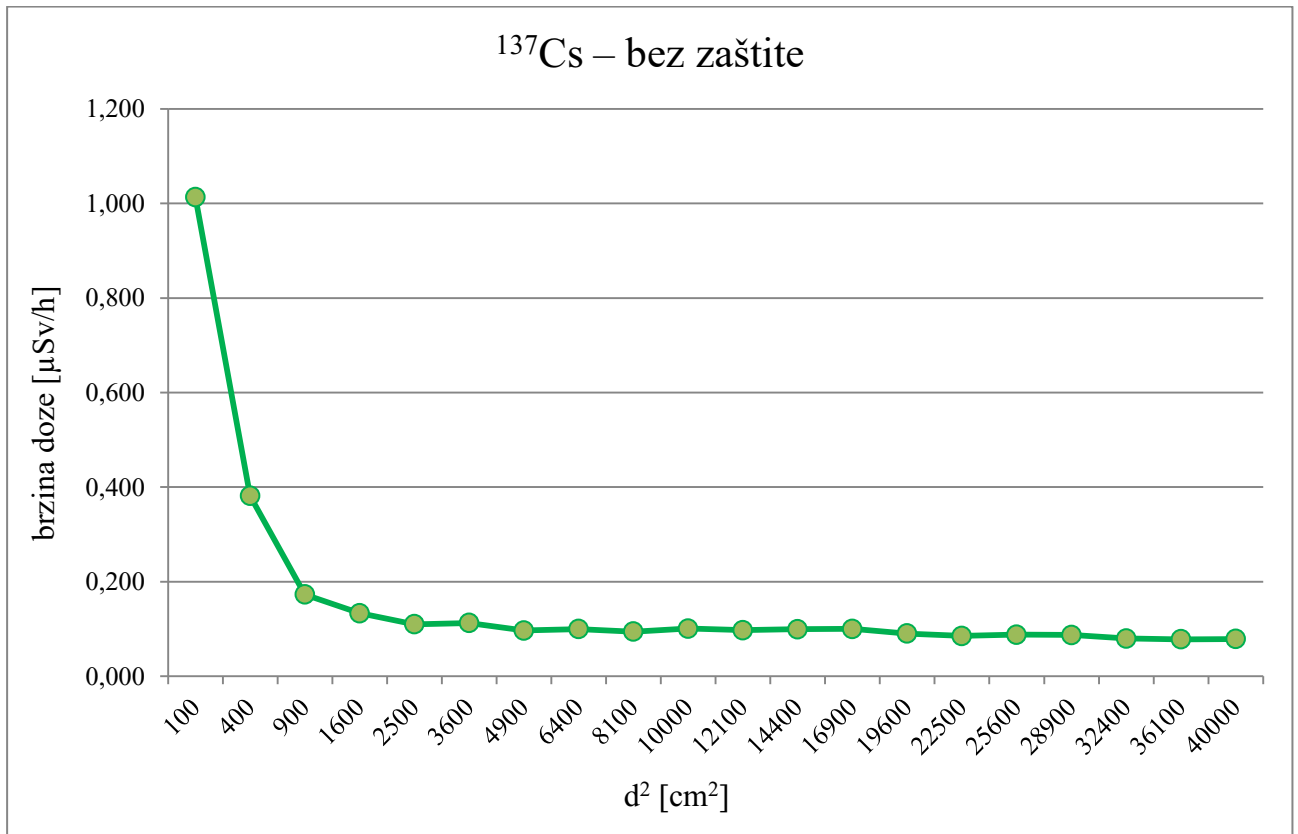


Grafikon 6: Usporedba olovnog i akrilnog štita od 5 cm i 10 cm

- Na grafikonu je prikazana usporedba olovnog i akrilnog štita u funkciji zaštite od zračenja.
- Iz dobivenih podataka može se zaključiti da olovni štit osigurava mnogo veću zaštitu od akrilnog štita. Akрил kao materijal mnogo manje gustoće znatno slabije atenuira zračenje od olova. Također je vidljivo da je brzina doze zračenja manja kod istog materijala veće debljine.

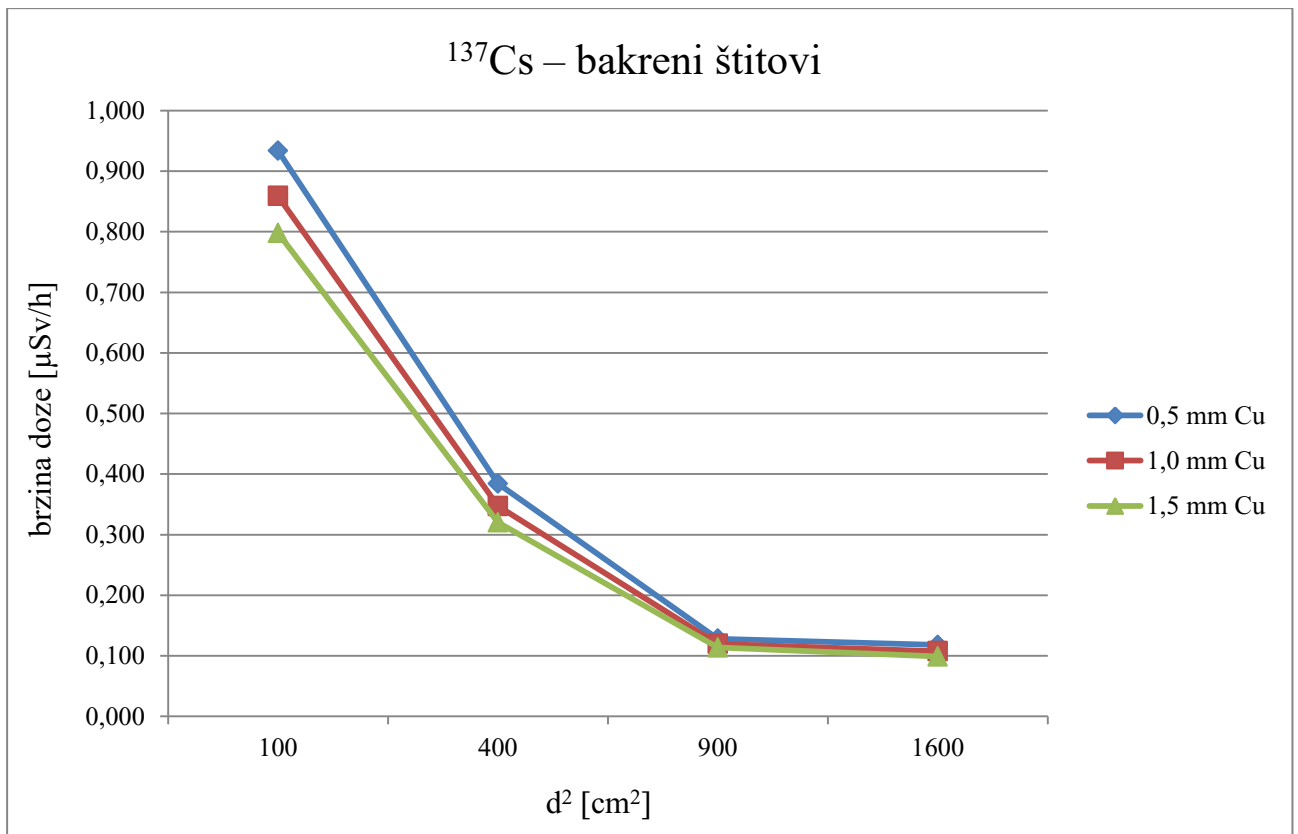
## $^{137}\text{Cs}$

Nakon provedenih mjerenja predočeni su grafikoni koji prikazuju ovisnosti brzine doze o kvadratu udaljenosti te o debljini zaštitnog materijala, pri čemu je korišten izvor zračenja  $^{137}\text{Cs}$ . Aktivnost izotopa  $^{137}\text{Cs}$  iznosi 166,305 kBq.



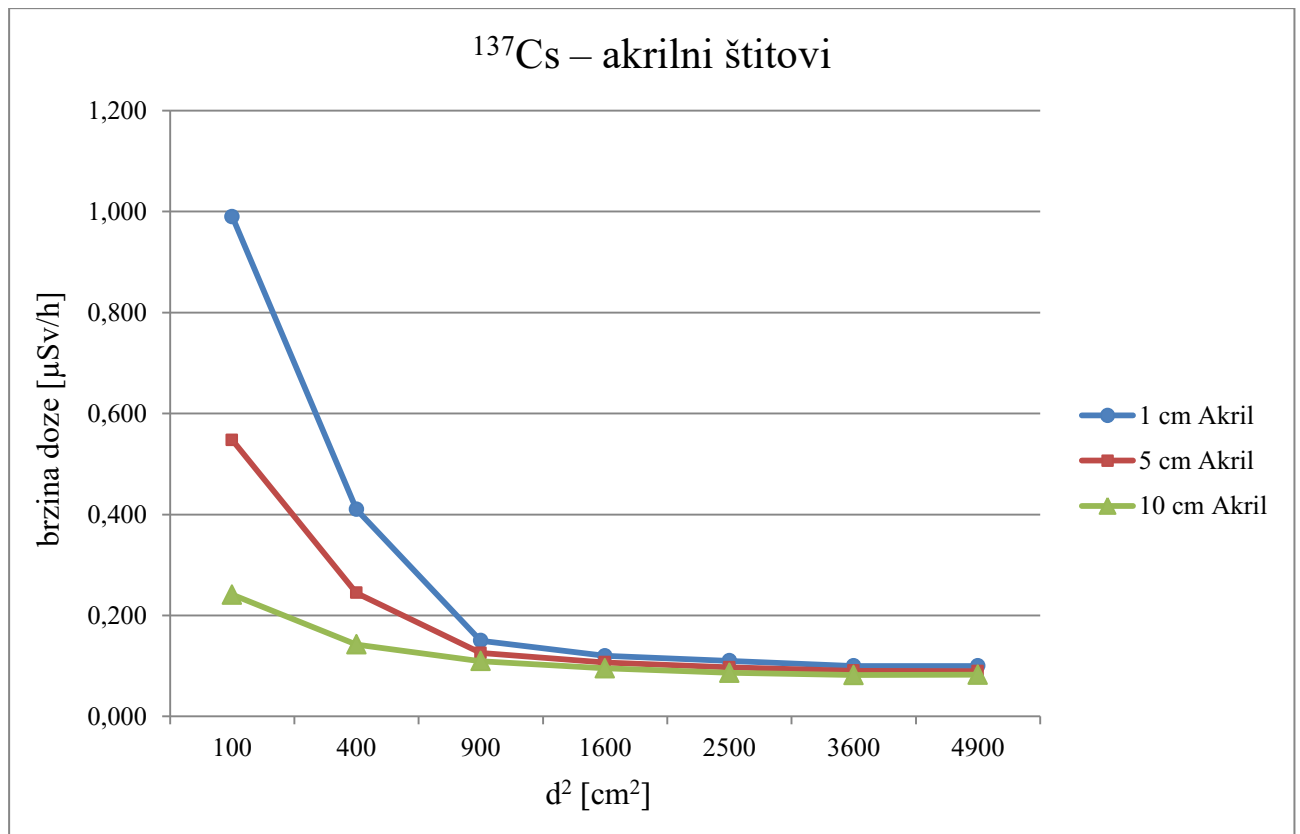
Grafikon 7: Ovisnost brzine doze zračenja o kvadratu udaljenosti bez prisutnosti štita, za izvor zračenja  $^{137}\text{Cs}$ .

- Iz podataka za brzinu doze zračenja i pripadajućih kvadrata udaljenosti od izvora zračenja do uređaja može se zaključiti da brzina doze opada s kvadratom udaljenosti.
- Izmjerena brzina doze manja je za izotop  $^{137}\text{Cs}$  nego za izotop  $^{152}\text{Eu}$  (Grafikon 1.) iz čega se može zaključiti da je izotop  $^{137}\text{Cs}$  slabiji izvor zračenja od  $^{152}\text{Eu}$ .



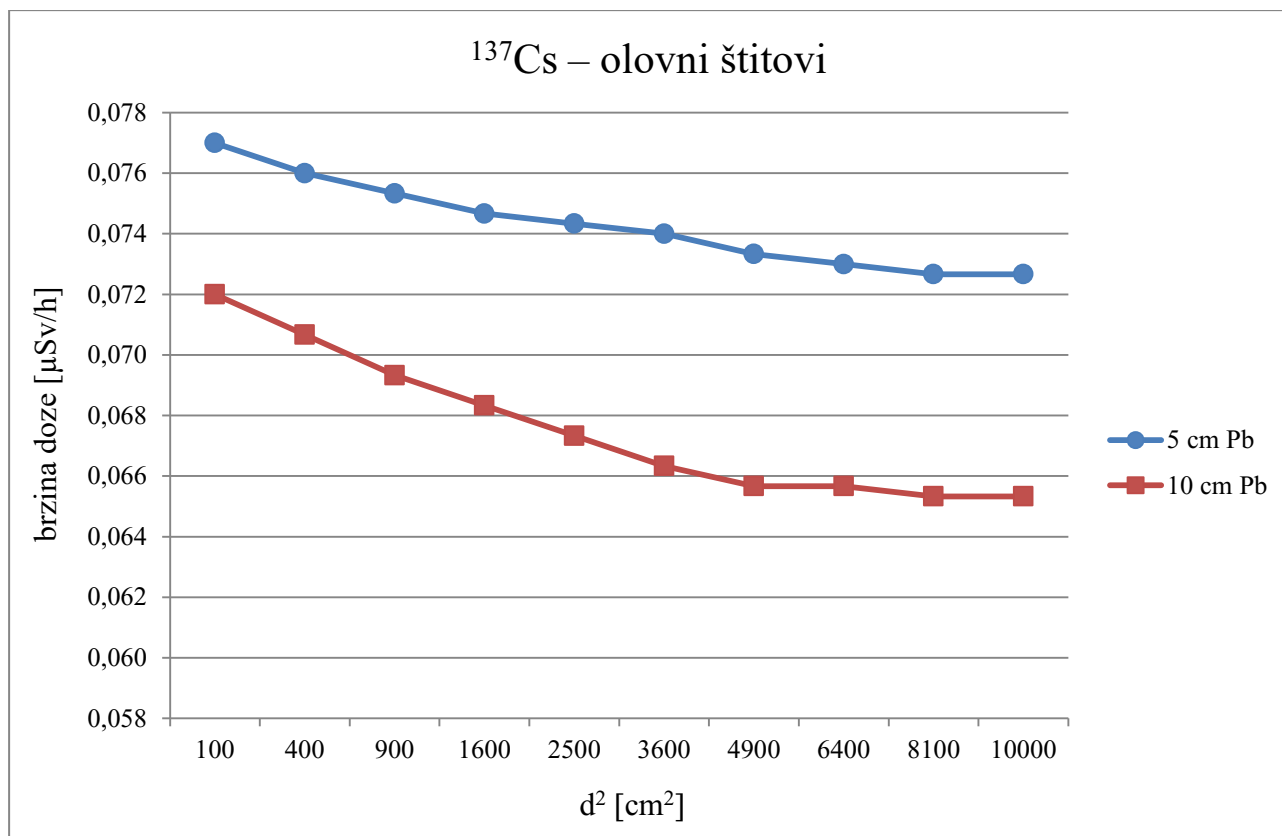
Grafikon 8: Ovisnost brzine doze zračenja o kvadratu udaljenosti uz prisutnost bakrenih štitova različite debljine, za izvor zračenja  $^{137}\text{Cs}$ .

- Između izvora zračenja i uređaja postavljeni su bakreni štitovi debljine 0,5 mm, 1,0 mm, 1,5 mm.
- Prema dobivenim podacima može se zaključiti da se brzina doze osim kvadratom udaljenosti smanjuje i uporabom debljeg štita.
- Najveća brzina doze izmjerena je za bakreni štit debljine 0,5 mm, dok je najmanja brzina doze izmjerena za najdeblji štit debljine 1,5 mm. Također je na grafikonu vidljivo da nema velike razlike između izmjerenih brzina doza za pojedine štitove jer su razlike u debljini štita malene.



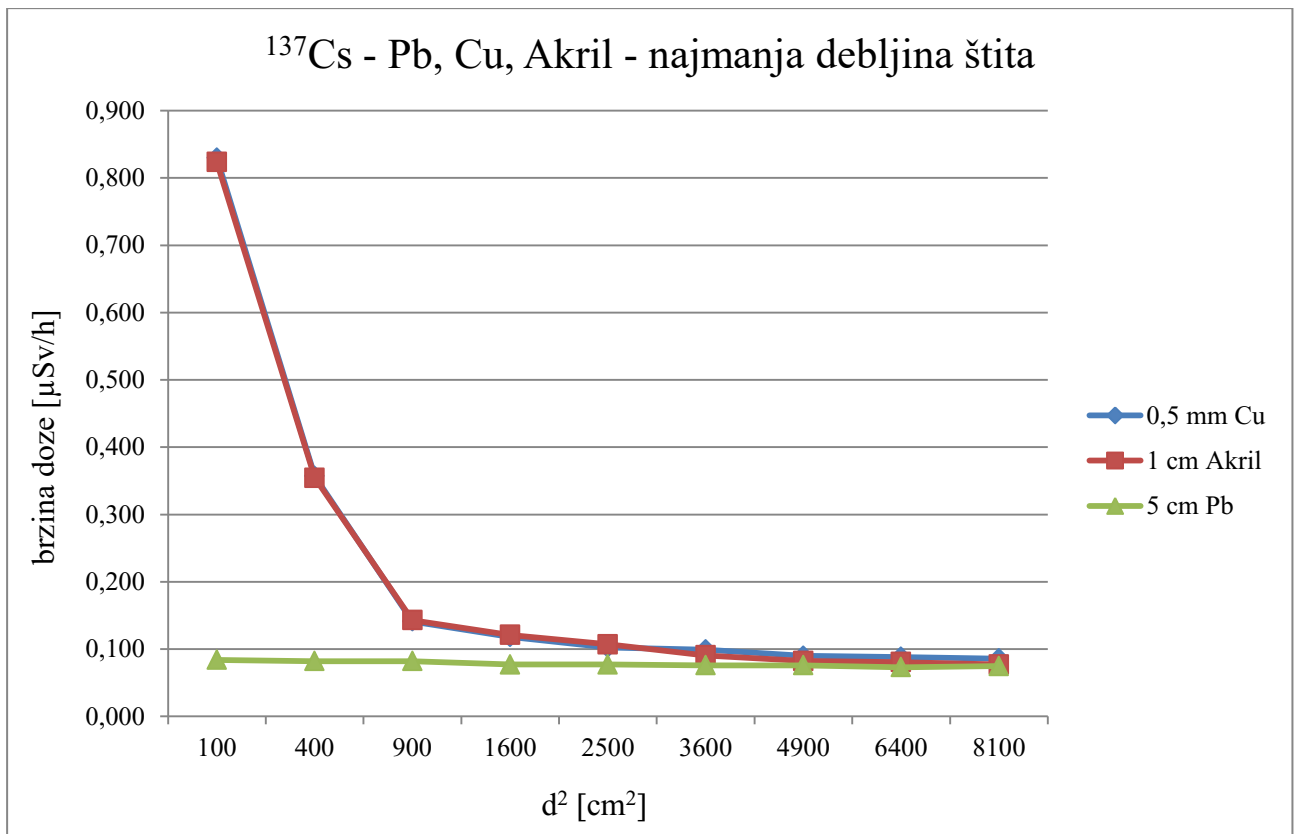
Grafikon 9: Ovisnost brzine doze zračenja o kvadratu udaljenosti uz prisutnost akrilnih štitova različite debljine, za izvor zračenja  $^{137}\text{Cs}$ .

- Između izvora zračenja i uređaja postavljeni su akrilni štitovi debljine 1 cm, 5 cm, 10 cm.
- Prema dobivenim podacima može se zaključiti da brzina doze osim kvadratom udaljenosti opada i uporabom debljeg štita. Najveća brzina doze izmjerena je za akrilni štit debljine 1 cm, dok je najmanja izmjerena za štit debljine 10 cm.



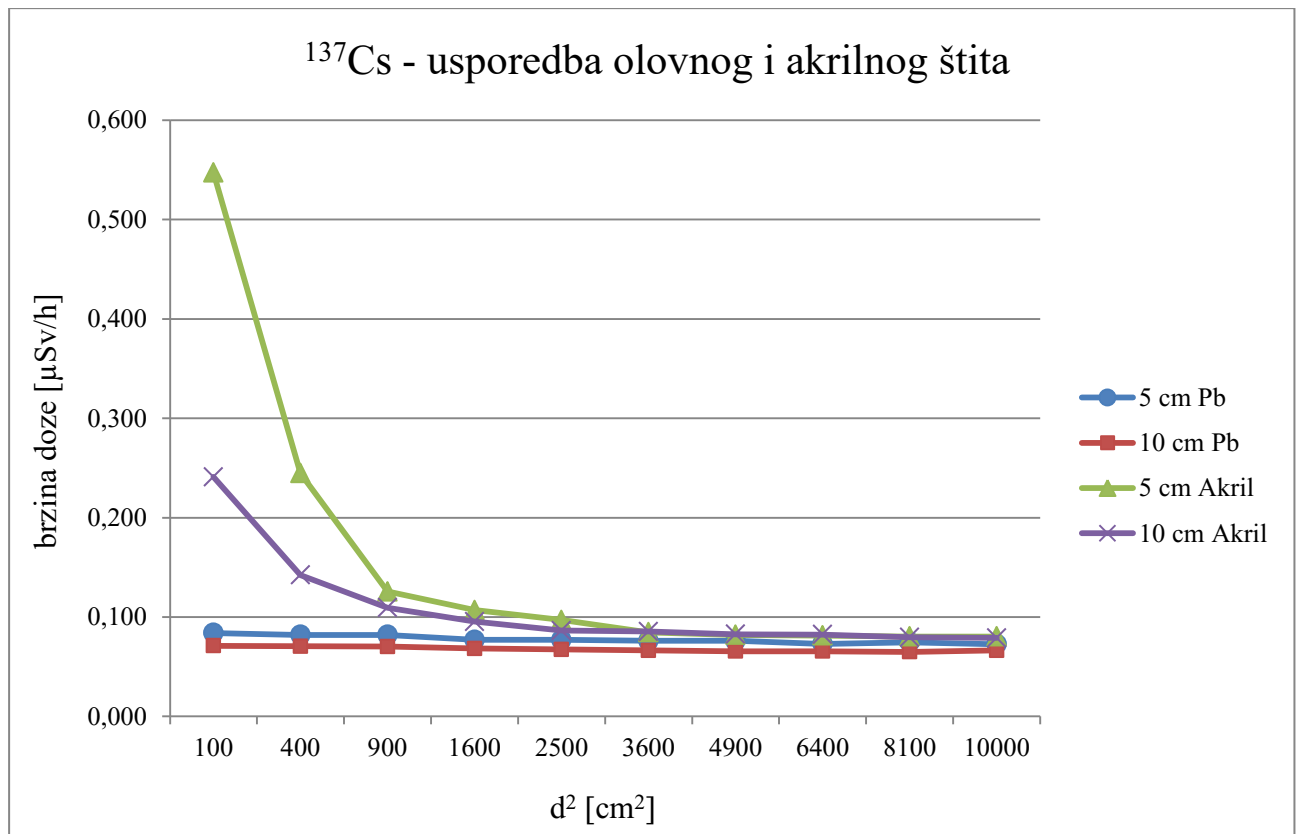
Grafikon 10: Ovisnost brzine doze zračenja o kvadratu udaljenosti uz prisutnost olovnih štitova različite debljine, za izvor zračenja  $^{137}\text{Cs}$ .

- Između izvora zračenja i uređaja postavljeni su olovni štitovi debljine 5 cm i 10 cm.
- Prema dobivenim podacima može se zaključiti da ni jedan olovni štit ne propušta zračenje koje dolazi od izvora. Na svim udaljenostima detektor mjeri pozadinsko zračenje.
- Nakon prolaska kroz olovni štit intenzitet zračenja znatno je reduciran čime je opravdana uporaba olovnog štita u zaštiti od zračenja.



Grafikon 10: Ovisnost brzine doze zračenja o kvadratu udaljenosti uz prisutnost olovnog, bakrenog i akrilnog štita najmanje debljine, za izvor zračenja  $^{137}\text{Cs}$ .

- Uspoređeni su podaci ovisnosti brzine doze zračenja o kvadratu udaljenosti uz prisutnost olovnog, bakrenog i akrilnog štita najmanje debljine.
- Iz grafikona je vidljivo da olovo pruža najbolju zaštitu od zračenja. Također je vidljivo da bakreni štiti debljine 0,5 mm daje jednaku zaštitu kao akrilni štiti debljine 1 cm iz čega se može potvrditi da bakar osigurava veću zaštitu od akrila.
- Olovo kao materijal najveće gustoće najbolje atenuira gama-zračenje, zatim ga slijedi bakar, dok je akril materijal najmanje gustoće te pruža najmanju zaštitu.



Grafikon 6: Usporedba olovnog i akrilnog štita od 5 cm i 10 cm

- Na grafikonu je prikazana usporedba olovnog i akrilnog štita u funkciji zaštite od zračenja.
- Iz dobivenih podataka može se zaključiti da olovni štit osigurava mnogo veću zaštitu od akrilnog štita. Akril kao materijal mnogo manje gustoće znatno slabije atenuira zračenje od olova. Također je vidljivo da je brzina doze zračenja manja kod istog materijala veće debljine.



## 9. Zaključak

Izloženost ionizirajućem zračenju u posljednjem stoljeću narasla je pojavom novih izvora zračenja. Uz iznimno korisne primjene u raznim granama istraživanja, ionizirajuće zračenje donosi niz opasnosti i za stanovništvo i za okoliš. Zbog toga se potrebno zaštititi te svako izlaganje ionizirajućem zračenju svesti na najmanju moguću mjeru.

Od zračenja se, osim povećanjem udaljenosti od izvora te skraćivanjem trajanja izlaganja, možemo zaštititi odgovarajućim štitovima. Oni se izrađuju od prikladnih materijala odgovarajućih dimenzija. U diplomskom radu ispitana je učinkovitost olova, bakra te polimetilmetakrilata (akrila) u zaštiti od gama-zračenja.

Nakon provedbe mjerenja te analize rezultata utvrđeno je da brzina doza opada kvadratom udaljenosti, kao i uporabom štita veće debljine. Kao najbolji zaštitni materijal pokazalo se olovo. Prolaskom kroz olovni štit zračenje je znatno reducirano, čime je opravdana uporaba olova u zaštiti od gama-zračenja. Najmanju zaštitu od gama-zračenja osigurava akril. Akril je materijal koji je ekvivalent ljudskom tkivu. Očekivano, akril znatno slabije atenuira zračenje od olova, ali i od bakra. Pokazalo se da 1 cm akrila osigurava približno jednaku zaštitu kao 0,5 mm bakra, čime je potvrđeno da je bakar učinkovitiji zaštitni materijal od akrila. Stupanj atenuacije gama-zračenja u materijalu ovisi o energiji fotona, atomskom broju elementa, gustoći te o debljini štita, što je potvrđeno mjerenjem. Brzina doze zračenja smanjuje se uporabom štitova veće gustoće te veće debljine. Olovo kao materijal najveće gustoće najbolje atenuira gama-zračenje, zatim ga slijedi bakar, dok je akril materijal najmanje gustoće te pruža najmanju zaštitu. Brzina doze također je manja za slabiji izvor zračenja, u ovom slučaju za izvor zračenja  $^{137}\text{Cs}$ .

Primjenom jednog zaštitnog materijala ili po potrebi istodobnom primjenom više materijala vrlo jaka zračenja mogu se svesti na prihvatljivu razinu te na taj način ukloniti rizik od nepotrebnog prekomjernog izlaganja ionizirajućem zračenju.

## Literatura

- [1]<https://i.stack.imgur.com/S237W.png> (7.9.2020.)
- [2]Kulišić P., Lopac V., *Elektromagnetske pojave i struktura tvari*. Školska knjiga, Zagreb, 2003.
- [3]<https://glossary.periodni.com/rjecnik.php?hr=elektromagnetski+spektar> (10.9.2020)
- [4]Poplašen D., Brumen V., Bućan D., *Djelovanje elektromagnetskog zračenja na ljudski organizam*, SIGURNOST 57 (4) 371 - 374 (2015).
- [5]Hebrang A., Klarić-Čustović R., *Radiologija, treće, obnovljeno i dopunjeno izdanje*. Medicinska naklada, Zagreb, 2007.
- [6]<https://www.mirion.com/learning-center/radiation-safety-basics/types-of-ionizing-radiation> (18.9.2020.)
- [7][https://www.fzsri.uniri.hr/files/FAKULTET/KATEDRE/Katedra\\_temeljne/Microsoft%20Word%20-%20Radioaktivnost\\_Primjena%20u%20medicini\\_povjerenstvo\\_Z.pdf](https://www.fzsri.uniri.hr/files/FAKULTET/KATEDRE/Katedra_temeljne/Microsoft%20Word%20-%20Radioaktivnost_Primjena%20u%20medicini_povjerenstvo_Z.pdf) (18.9.2020.)
- [8]<https://www.nuclear-power.net/> (18.9.2020.)
- [9]<https://radioaktivniotpad.org/radioaktivnost/> (18.9.2020.)
- [10]Jakobović Zvonimir, *Fizika zračenja*. Zdravstveno veleučilište, Zagreb, 2007.
- [11]National Toxicology Program. Report on Carcinogens. U.S. Department of Health and Human Services. 2016.
- [12]Feretić Danilo, *Uvod u nuklearnu energetku*. Školska knjiga, Zagreb, 2010.
- [13]<http://radon.dzrns.hr/o-radonu/> (2.10.2020)
- [14]<https://www.iop.org/> (3.10.2020)
- [15][https://www.fzsri.uniri.hr/files/FAKULTET/KATEDRE/Katedra\\_temeljne/Microsoft%20Word%20-%20Radioaktivnost\\_Primjena%20u%20medicini\\_povjerenstvo\\_Z.pdf](https://www.fzsri.uniri.hr/files/FAKULTET/KATEDRE/Katedra_temeljne/Microsoft%20Word%20-%20Radioaktivnost_Primjena%20u%20medicini_povjerenstvo_Z.pdf) (4.10.2020)
- [16]<https://www.zuccon.hr/radiology.html> (4.10.2020)
- [17]<https://lifeofmedical.com/gama-kameralar/> (4.10.2020)

- [18]Hrvatsko nuklearno društvo (HND). Nuklearne zanimljivosti. Hrvatsko nuklearno društvo & Nuklearna elektrana Krško, 2014.
- [19]<http://www.chernobylgallery.com/chernobyl-disaster/what-is-chernobyl/> (13.10.2020.)
- [20]Valković Vladivoj, Radiološka situacija na lokacijama testiranja nuklearnih bombi, Institut "Ruđer Bošković",pp.1016,10001, Zagreb
- [21]Cherry, S., Phelps, M., Sorenson, J., *Physics in Nuclear Medicine*. Philadelphia: Elsevier Saunders. 2012.
- [22]Jasmina Jakonić, Projektovanje debljine zaštitnih barijera za prostorije za terapiju <sup>131</sup>I, master rad, Novi Sad, 2015.
- [23]Janković S., Eterović D., *Fizikalne osnove i klinički aspekti medicinske dijagnostike*, Medicinska naklada, Zagreb, 2002.
- [24]Surić Mihić M., Prlić I.,J Šiško., Meštrović T., (2013.) *Koncept osobne dozimetrije i osnovne fizikalne veličine u osobnoj dozimetriji*, Matest & certification conference proceeding, Zagreb.
- [25]<https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=17513> (20.10.2020.)
- [26]Dragica Winterhalter, *Fizički principi interakcije neutrona i biološkog tkiva*, Zavod za fiziku Medicinskog fakulteta i Institut Ruđer Bošković, Zagreb, 1967.
- [27]Daniel R. McAlister, Ph.D., *Gamma Ray Attenuation Properties of Common Shielding Materials*, PG Research Foundation, Inc. 1955 University Lane Lisle, IL 60532, USA.
- [28]Skripta iz kolegija Radioekologija, Detekcija i zaštita od zračenja.
- [29]Hebrang A., Petrovčić F., *Radijacija i zaštita u medicinskoj dijagnostici*. Medicinska knjiga, Zagreb, 1989.
- [30]<https://www.ortec-online.com/-/media/ametekortec/brochures/hplbs.pdf?dmc=1&la=en> (1.11.2020)
- [31][https://mirion.s3.amazonaws.com/cms4\\_mirion/files/pdf/application-notes/ultra-low-background-application-note.pdf?1523891784](https://mirion.s3.amazonaws.com/cms4_mirion/files/pdf/application-notes/ultra-low-background-application-note.pdf?1523891784) (5.11.2020)
- [32]<https://mirion.app.box.com/s/gawpdx0cwvizlx95pmhw> (5.11.2020)

[33]Mirion Technologies, RDS-31 S/R Multi-purpose Survey Meter User's Manual, Doc. No. 2096 6082,Ver.2.1

[34]Thermo Scientific, operating instructions DB-033-961017 E, H 40 G Dose Rate Measuring Unit manual pdf.

[35]Marin Cindrić, Radioaktivna kontaminacija mlijeka i radiološka zaštita, Karlovačka industrija, KIM Karlovac, mljekarstvo 41 (9) 245—252, 1991.

[36][http://felix.physics.sunysb.edu/~allen/313/radioactivity\\_lab.html](http://felix.physics.sunysb.edu/~allen/313/radioactivity_lab.html) (24.11.2020.)

[37]<https://www.epa.gov/radiation/radionuclide-basics-cesium-137#cesiumenvironment> (25.11.2020.)

[38]Franić Z., Marović G.,Lokobauer N.,Prlić I., Radioaktivnost u biosferi i u profesionalnoj izloženosti u nas, Institut za medicinska istraživanja i medicinu rada, Zagreb, 1999.

[39][https://www.remm.nlm.gov/ANL\\_ContaminantFactSheets\\_All\\_070418.pdf](https://www.remm.nlm.gov/ANL_ContaminantFactSheets_All_070418.pdf) (1.12.2020.)

[40][https://innovativebiomedical.com/wp-content/uploads/2012/03/radiation\\_shielding-lead-etc..pdf](https://innovativebiomedical.com/wp-content/uploads/2012/03/radiation_shielding-lead-etc..pdf) (1.12.2020.)

## Prilozi

<sup>152</sup> Eu, A = 469,64kBq [bez zaštite]					
d (cm)	d <sup>2</sup> (cm <sup>2</sup> )	Brzina doze ( $\mu$ Sv/h) RDS-31	Brzina doze ( $\mu$ Sv/h) FH 40 G-L10 [1]	Brzina doze ( $\mu$ Sv/h) FH 40 G-L10 [2]	Srednja vrijednost brzina doze ( $\mu$ Sv/h)
10	100	5,200	3,620	3,100	3,973
20	400	1,500	1,200	1,170	1,290
30	900	0,830	0,655	0,640	0,708
40	1600	0,450	0,390	0,423	0,421
50	2500	0,380	0,306	0,330	0,339
60	3600	0,260	0,236	0,245	0,247
70	4900	0,220	0,188	0,185	0,198
80	6400	0,200	0,147	0,154	0,167
90	8100	0,170	0,140	0,150	0,153
100	10000	0,150	0,149	0,156	0,152
110	12100	0,130	0,155	0,160	0,148
120	14400	0,130	0,155	0,156	0,147
130	16900	0,130	0,145	0,138	0,138
140	19600	0,130	0,155	0,100	0,128
150	22500	0,120	0,150	0,091	0,120
160	25600	0,120	0,097	0,090	0,102
170	28900	0,120	0,068	0,088	0,092
180	32400	0,120	0,064	0,087	0,090
190	36100	0,110	0,075	0,077	0,087
200	40000	0,110	0,081	0,087	0,093

$^{152}\text{Eu}$ , A = 469,64kBq [0,5 mm Cu]					
d (cm)	d <sup>2</sup> (cm <sup>2</sup> )	Brzina doze ( $\mu\text{Sv/h}$ ) RDS-31	Brzina doze ( $\mu\text{Sv/h}$ ) FH 40 G-L10 [1]	Brzina doze ( $\mu\text{Sv/h}$ ) FH 40 G-L10 [2]	Srednja vrijednost brzina doze ( $\mu\text{Sv/h}$ )
10	100	4,990	3,360	3,220	3,857
20	400	1,560	1,476	1,500	1,512
30	900	0,800	0,572	0,604	0,659
40	1600	0,400	0,293	0,317	0,337
50	2500	0,250	0,276	0,310	0,279
60	3600	0,180	0,184	0,169	0,178
70	4900	0,180	0,152	0,156	0,163
80	6400	0,160	0,145	0,148	0,151
90	8100	0,140	0,110	0,123	0,124
100	10000	0,140	0,106	0,119	0,122
110	12100	0,140	0,102	0,108	0,117
120	14400	0,100	0,115	0,099	0,105
130	16900	0,100	0,120	0,109	0,110
140	19600	0,100	0,101	0,103	0,101
150	22500	0,100	0,107	0,103	0,103
160	25600	0,100	0,094	0,092	0,095
170	28900	0,090	0,080	0,088	0,086
180	32400	0,090	0,087	0,094	0,090
190	36100	0,090	0,082	0,092	0,088
200	40000	0,090	0,084	0,080	0,085

<sup>152</sup> Eu, A = 469,64kBq [1 mm Cu]					
d (cm)	d <sup>2</sup> (cm <sup>2</sup> )	Brzina doze (μSv/h) RDS-31	Brzina doze (μSv/h) FH 40 G-L10 [1]	Brzina doze (μSv/h) FH 40 G-L10 [2]	Srednja vrijednost brzina doze (μSv/h)
10	100	4,620	3,130	3,070	3,607
20	400	1,260	0,105	1,080	1,260
30	900	0,750	0,502	0,501	0,614
40	1600	0,400	0,293	0,304	0,332
50	2500	0,240	0,248	0,278	0,255
60	3600	0,160	0,150	0,162	0,157
70	4900	0,150	0,127	0,136	0,138
80	6400	0,140	0,126	0,121	0,129
90	8100	0,140	0,110	0,121	0,124
100	10000	0,120	0,108	0,102	0,110
110	12100	0,120	0,100	0,096	0,105
120	14400	0,120	0,099	0,101	0,107
130	16900	0,120	0,102	0,099	0,107
140	19600	0,110	0,090	0,089	0,096
150	22500	0,110	0,093	0,101	0,101
160	25600	0,110	0,080	0,090	0,093
170	28900	0,110	0,078	0,087	0,092
180	32400	0,110	0,077	0,085	0,091
190	36100	0,110	0,081	0,079	0,090
200	40000	0,100	0,080	0,079	0,086

$^{152}\text{Eu}$ , A = 469,64kBq [1,5 mm Cu]					
d (cm)	d <sup>2</sup> (cm <sup>2</sup> )	Brzina doze ( $\mu\text{Sv/h}$ ) RDS-31	Brzina doze ( $\mu\text{Sv/h}$ ) FH 40 G-L10 [1]	Brzina doze ( $\mu\text{Sv/h}$ ) FH 40 G-L10 [2]	Srednja vrijednost brzina doze ( $\mu\text{Sv/h}$ )
10	100	4,010	3,020	2,980	3,337
20	400	1,000	1,120	1,108	1,076
30	900	0,710	0,687	0,444	0,584
40	1600	0,320	0,340	0,390	0,350
50	2500	0,190	0,256	0,216	0,221
60	3600	0,140	0,165	0,148	0,151
70	4900	0,130	0,126	0,123	0,126
80	6400	0,120	0,123	0,115	0,119
90	8100	0,110	0,113	0,110	0,111
100	10000	0,110	0,104	0,108	0,107
110	12100	0,110	0,101	0,099	0,103
120	14400	0,110	0,103	0,102	0,105
130	16900	0,110	0,099	0,104	0,104
140	19600	0,100	0,095	0,099	0,098
150	22500	0,100	0,090	0,101	0,097
160	25600	0,100	0,085	0,089	0,091
170	28900	0,100	0,086	0,096	0,094
180	32400	0,100	0,075	0,099	0,091
190	36100	0,100	0,072	0,080	0,084
200	40000	0,100	0,071	0,079	0,083



$^{152}\text{Eu}$ , A = 469,64kBq [1 cm Akril]					
d (cm)	d <sup>2</sup> (cm <sup>2</sup> )	Brzina doze ( $\mu\text{Sv/h}$ ) RDS-31	Brzina doze ( $\mu\text{Sv/h}$ ) FH 40 G-L10 [1]	Brzina doze ( $\mu\text{Sv/h}$ ) FH 40 G-L10 [2]	Srednja vrijednost brzina doze ( $\mu\text{Sv/h}$ )
10	100	5,160	3,170	3,050	3,793
20	400	1,460	1,400	1,300	1,387
30	900	0,790	0,700	0,700	0,730
40	1600	0,410	0,421	0,433	0,421
50	2500	0,310	0,296	0,289	0,298
60	3600	0,240	0,157	0,160	0,186
70	4900	0,180	0,134	0,156	0,157
80	6400	0,150	0,126	0,148	0,141
90	8100	0,150	0,125	0,131	0,135
100	10000	0,130	0,115	0,125	0,123
110	12100	0,120	0,105	0,133	0,119
120	14400	0,110	0,098	0,120	0,109
130	16900	0,110	0,093	0,091	0,098
140	19600	0,110	0,091	0,084	0,095
150	22500	0,110	0,090	0,077	0,092
160	25600	0,100	0,083	0,082	0,088
170	28900	0,100	0,080	0,074	0,085
180	32400	0,110	0,083	0,080	0,091
190	36100	0,100	0,081	0,079	0,087
200	40000	0,100	0,075	0,079	0,085

<sup>152</sup> Eu, A = 469,64kBq [5 cm Akril]					
d (cm)	d <sup>2</sup> (cm <sup>2</sup> )	Brzina doze (μSv/h) RDS-31	Brzina doze (μSv/h) FH 40 G-L10 [1]	Brzina doze (μSv/h) FH 40 G-L10 [2]	Srednja vrijednost brzina doze (μSv/h)
10	100	2,850	1,980	2,210	2,347
20	400	1,190	0,912	0,890	0,997
30	900	0,530	0,501	0,529	0,520
40	1600	0,310	0,322	0,236	0,289
50	2500	0,172	0,181	0,185	0,179
60	3600	0,140	0,145	0,130	0,138
70	4900	0,130	0,144	0,146	0,140
80	6400	0,110	0,133	0,123	0,122
90	8100	0,110	0,144	0,109	0,121
100	10000	0,100	0,129	0,116	0,115
110	12100	0,100	0,125	0,115	0,113
120	14400	0,100	0,117	0,106	0,108
130	16900	0,100	0,099	0,091	0,097
140	19600	0,100	0,097	0,108	0,102
150	22500	0,100	0,083	0,087	0,090
160	25600	0,100	0,074	0,079	0,084
170	28900	0,090	0,077	0,081	0,083
180	32400	0,090	0,080	0,086	0,085
190	36100	0,090	0,089	0,086	0,088
200	40000	0,090	0,082	0,083	0,085

<sup>152</sup> Eu, A = 469,64kBq [10 cm Akril]					
d (cm)	d <sup>2</sup> (cm <sup>2</sup> )	Brzina doze (μSv/h) RDS-31	Brzina doze (μSv/h) FH 40 G-L10 [1]	Brzina doze (μSv/h) FH 40 G-L10 [2]	Srednja vrijednost brzina doze (μSv/h)
10	100	1,320	0,982	0,936	1,079
20	400	0,540	0,457	0,432	0,476
30	900	0,300	0,280	0,297	0,292
40	1600	0,150	0,157	0,159	0,155
50	2500	0,140	0,129	0,116	0,128
60	3600	0,130	0,121	0,110	0,120
70	4900	0,120	0,119	0,099	0,113
80	6400	0,120	0,126	0,102	0,116
90	8100	0,110	0,102	0,109	0,107
100	10000	0,100	0,093	0,099	0,097
110	12100	0,100	0,097	0,102	0,100
120	14400	0,090	0,095	0,096	0,094
130	16900	0,090	0,091	0,096	0,092
140	19600	0,090	0,091	0,101	0,094
150	22500	0,090	0,089	0,081	0,087
160	25600	0,090	0,090	0,086	0,089
170	28900	0,090	0,088	0,085	0,088
180	32400	0,090	0,084	0,088	0,087
190	36100	0,090	0,071	0,085	0,082
200	40000	0,090	0,074	0,072	0,079

$^{152}\text{Eu}$ , A = 469,64kBq [5 cm Pb]					
d (cm)	d <sup>2</sup> (cm <sup>2</sup> )	Brzina doze ( $\mu\text{Sv/h}$ ) RDS-31	Brzina doze ( $\mu\text{Sv/h}$ ) FH 40 G-L10 [1]	Brzina doze ( $\mu\text{Sv/h}$ ) FH 40 G-L10 [2]	Srednja vrijednost brzina doze ( $\mu\text{Sv/h}$ )
10	100	0,120	0,114	0,125	0,120
20	400	0,100	0,094	0,097	0,097
30	900	0,100	0,084	0,089	0,091
40	1600	0,100	0,078	0,080	0,086
50	2500	0,100	0,075	0,078	0,084
60	3600	0,090	0,068	0,069	0,076
70	4900	0,090	0,064	0,068	0,074
80	6400	0,090	0,066	0,068	0,075
90	8100	0,090	0,068	0,075	0,078
100	10000	0,090	0,069	0,076	0,078
110	12100	0,090	0,070	0,072	0,077
120	14400	0,090	0,069	0,075	0,078
130	16900	0,090	0,070	0,072	0,077
140	19600	0,090	0,066	0,070	0,075
150	22500	0,090	0,067	0,066	0,074
160	25600	0,090	0,068	0,066	0,075
170	28900	0,090	0,075	0,064	0,076
180	32400	0,090	0,072	0,070	0,077
190	36100	0,090	0,079	0,073	0,081
200	40000	0,090	0,071	0,078	0,080

$^{152}\text{Eu}$ , A = 469,64kBq [10 cm Pb]					
d (cm)	d <sup>2</sup> (cm <sup>2</sup> )	Brzina doze ( $\mu\text{Sv/h}$ ) RDS-31	Brzina doze ( $\mu\text{Sv/h}$ ) FH 40 G-L10 [1]	Brzina doze ( $\mu\text{Sv/h}$ ) FH 40 G-L10 [2]	Srednja vrijednost brzina doze ( $\mu\text{Sv/h}$ )
10	100	0,070	0,058	0,060	0,063
20	400	0,070	0,064	0,059	0,064
30	900	0,070	0,064	0,063	0,066
40	1600	0,060	0,062	0,060	0,061
50	2500	0,060	0,060	0,054	0,058
60	3600	0,060	0,065	0,055	0,060
70	4900	0,060	0,060	0,052	0,057
80	6400	0,060	0,062	0,055	0,059
90	8100	0,060	0,065	0,060	0,062
100	10000	0,060	0,066	0,067	0,064
110	12100	0,060	0,064	0,066	0,063
120	14400	0,055	0,062	0,061	0,059
130	16900	0,050	0,064	0,061	0,058
140	19600	0,060	0,065	0,055	0,060
150	22500	0,060	0,061	0,053	0,058
160	25600	0,060	0,060	0,060	0,060
170	28900	0,060	0,064	0,053	0,059
180	32400	0,060	0,064	0,058	0,061
190	36100	0,060	0,060	0,065	0,062
200	40000	0,060	0,060	0,065	0,062

$^{137}\text{Cs}$ , A = 186,5 kBq [bez zaštite]					
d (cm)	d <sup>2</sup> (cm <sup>2</sup> )	Brzina doze ( $\mu\text{Sv/h}$ ) RDS-31	Brzina doze ( $\mu\text{Sv/h}$ ) FH 40 G-L10 [1]	Brzina doze ( $\mu\text{Sv/h}$ ) FH 40 G-L10 [2]	Srednja vrijednost brzina doze ( $\mu\text{Sv/h}$ )
10	100	1,150	0,968	0,923	1,014
20	400	0,470	0,350	0,324	0,381
30	900	0,160	0,163	0,196	0,173
40	1600	0,110	0,140	0,150	0,133
50	2500	0,100	0,120	0,110	0,110
60	3600	0,100	0,118	0,120	0,113
70	4900	0,100	0,090	0,100	0,097
80	6400	0,100	0,091	0,108	0,100
90	8100	0,100	0,083	0,100	0,094
100	10000	0,100	0,098	0,104	0,101
110	12100	0,100	0,093	0,099	0,097
120	14400	0,100	0,092	0,106	0,099
130	16900	0,100	0,097	0,103	0,100
140	19600	0,100	0,087	0,084	0,090
150	22500	0,090	0,084	0,082	0,085
160	25600	0,090	0,081	0,093	0,088
170	28900	0,080	0,080	0,102	0,087
180	32400	0,070	0,081	0,088	0,080
190	36100	0,070	0,081	0,083	0,078
200	40000	0,070	0,081	0,085	0,079

<sup>137</sup> Cs, A = 186,5 kBq [0,5 mm Cu]					
d (cm)	d <sup>2</sup> (cm <sup>2</sup> )	Brzina doze (μSv/h) RDS-31	Brzina doze (μSv/h) FH 40 G-L10 [1]	Brzina doze (μSv/h) FH 40 G-L10 [2]	Srednja vrijednost brzina doze (μSv/h)
10	100	1,110	0,793	0,898	0,934
20	400	0,460	0,333	0,360	0,384
30	900	0,140	0,114	0,131	0,128
40	1600	0,120	0,104	0,130	0,118
50	2500	0,100	0,100	0,107	0,102
60	3600	0,100	0,094	0,104	0,099
70	4900	0,100	0,090	0,080	0,090
80	6400	0,100	0,089	0,076	0,088
90	8100	0,100	0,085	0,073	0,086
100	10000	0,100	0,089	0,075	0,088
110	12100	0,100	0,075	0,080	0,085
120	14400	0,090	0,070	0,076	0,079
130	16900	0,090	0,073	0,077	0,080
140	19600	0,090	0,072	0,072	0,078
150	22500	0,090	0,072	0,070	0,077
160	25600	0,090	0,072	0,071	0,078
170	28900	0,080	0,073	0,069	0,074
180	32400	0,080	0,075	0,070	0,075
190	36100	0,080	0,072	0,071	0,074
200	40000	0,080	0,070	0,070	0,073

$^{137}\text{Cs}$ , A = 186,5 kBq [1 mm Cu]					
d (cm)	d <sup>2</sup> (cm <sup>2</sup> )	Brzina doze ( $\mu\text{Sv/h}$ ) RDS-31	Brzina doze ( $\mu\text{Sv/h}$ ) FH 40 G-L10 [1]	Brzina doze ( $\mu\text{Sv/h}$ ) FH 40 G-L10 [2]	Srednja vrijednost brzina doze ( $\mu\text{Sv/h}$ )
10	100	1,020	0,797	0,760	0,859
20	400	0,400	0,313	0,329	0,347
30	900	0,140	0,104	0,115	0,120
40	1600	0,120	0,098	0,105	0,108
50	2500	0,110	0,095	0,091	0,099
60	3600	0,110	0,093	0,103	0,102
70	4900	0,100	0,090	0,082	0,091
80	6400	0,100	0,087	0,085	0,091
90	8100	0,100	0,085	0,081	0,089
100	10000	0,100	0,089	0,081	0,090
110	12100	0,100	0,086	0,076	0,087
120	14400	0,100	0,086	0,075	0,087
130	16900	0,090	0,087	0,071	0,083
140	19600	0,090	0,086	0,083	0,086
150	22500	0,090	0,084	0,084	0,086
160	25600	0,090	0,070	0,086	0,082
170	28900	0,080	0,071	0,070	0,074
180	32400	0,080	0,070	0,069	0,073
190	36100	0,080	0,062	0,064	0,069
200	40000	0,080	0,061	0,063	0,068



$^{137}\text{Cs}$ , $A = 186,5 \text{ kBq}$ [1,5 mm Cu]					
d (cm)	$d^2$ ( $\text{cm}^2$ )	Brzina doze ( $\mu\text{Sv/h}$ ) RDS-31	Brzina doze ( $\mu\text{Sv/h}$ ) FH 40 G-L10 [1]	Brzina doze ( $\mu\text{Sv/h}$ ) FH 40 G-L10 [2]	Srednja vrijednost brzina doze ( $\mu\text{Sv/h}$ )
10	100	0,990	0,675	0,729	0,798
20	400	0,370	0,298	0,293	0,320
30	900	0,130	0,110	0,101	0,114
40	1600	0,100	0,100	0,097	0,099
50	2500	0,090	0,093	0,086	0,090
60	3600	0,090	0,094	0,081	0,088
70	4900	0,090	0,093	0,080	0,088
80	6400	0,090	0,084	0,079	0,084
90	8100	0,090	0,075	0,071	0,079
100	10000	0,090	0,074	0,070	0,078
110	12100	0,090	0,072	0,067	0,076
120	14400	0,090	0,080	0,069	0,080
130	16900	0,090	0,080	0,071	0,080
140	19600	0,090	0,074	0,069	0,078
150	22500	0,090	0,077	0,075	0,081
160	25600	0,090	0,070	0,074	0,078
170	28900	0,080	0,071	0,070	0,074
180	32400	0,080	0,070	0,069	0,073
190	36100	0,080	0,066	0,066	0,071
200	40000	0,080	0,068	0,067	0,072

<sup>137</sup> Cs, A = 186,5 kBq [1 cm Akрил]					
d (cm)	d <sup>2</sup> (cm <sup>2</sup> )	Brzina doze (μSv/h) RDS-31	Brzina doze (μSv/h) FH 40 G-L10 [1]	Brzina doze (μSv/h) FH 40 G-L10 [2]	Srednja vrijednost brzina doze (μSv/h)
10	100	0,990	0,760	0,721	0,824
20	400	0,410	0,351	0,302	0,354
30	900	0,150	0,138	0,141	0,143
40	1600	0,120	0,120	0,123	0,121
50	2500	0,110	0,108	0,103	0,107
60	3600	0,100	0,081	0,091	0,091
70	4900	0,100	0,070	0,077	0,082
80	6400	0,100	0,073	0,069	0,081
90	8100	0,100	0,069	0,062	0,077
100	10000	0,100	0,079	0,070	0,083
110	12100	0,100	0,075	0,071	0,082
120	14400	0,100	0,085	0,071	0,085
130	16900	0,100	0,079	0,078	0,086
140	19600	0,100	0,079	0,071	0,083
150	22500	0,090	0,078	0,071	0,080
160	25600	0,090	0,079	0,070	0,080
170	28900	0,090	0,079	0,073	0,081
180	32400	0,080	0,077	0,075	0,077
190	36100	0,080	0,078	0,076	0,078
200	40000	0,080	0,073	0,078	0,077

<sup>137</sup> Cs, A = 186,5 kBq [5 cm Akril]					
d (cm)	d <sup>2</sup> (cm <sup>2</sup> )	Brzina doze (μSv/h) RDS-31	Brzina doze (μSv/h) FH 40 G-L10 [1]	Brzina doze (μSv/h) FH 40 G-L10 [2]	Srednja vrijednost brzina doze (μSv/h)
10	100	0,600	0,514	0,528	0,547
20	400	0,260	0,258	0,216	0,245
30	900	0,130	0,123	0,124	0,126
40	1600	0,120	0,100	0,101	0,107
50	2500	0,120	0,087	0,084	0,097
60	3600	0,100	0,083	0,088	0,090
70	4900	0,100	0,081	0,087	0,089
80	6400	0,100	0,075	0,077	0,084
90	8100	0,100	0,072	0,069	0,080
100	10000	0,100	0,066	0,075	0,080
110	12100	0,100	0,069	0,075	0,081
120	14400	0,100	0,075	0,070	0,082
130	16900	0,100	0,072	0,073	0,082
140	19600	0,100	0,072	0,073	0,082
150	22500	0,090	0,079	0,071	0,080
160	25600	0,090	0,072	0,072	0,078
170	28900	0,090	0,071	0,070	0,077
180	32400	0,090	0,074	0,070	0,078
190	36100	0,080	0,070	0,068	0,073
200	40000	0,080	0,068	0,069	0,072

<sup>137</sup> Cs, A = 186,5 kBq [10 cm Akril]					
d (cm)	d <sup>2</sup> (cm <sup>2</sup> )	Brzina doze (μSv/h) RDS-31	Brzina doze (μSv/h) FH 40 G-L10 [1]	Brzina doze (μSv/h) FH 40 G-L10 [2]	Srednja vrijednost brzina doze (μSv/h)
10	100	0,290	0,204	0,229	0,241
20	400	0,160	0,128	0,139	0,142
30	900	0,130	0,100	0,098	0,109
40	1600	0,100	0,098	0,088	0,095
50	2500	0,100	0,082	0,077	0,086
60	3600	0,100	0,075	0,071	0,082
70	4900	0,100	0,074	0,073	0,082
80	6400	0,100	0,075	0,072	0,082
90	8100	0,090	0,077	0,072	0,080
100	10000	0,090	0,077	0,070	0,079
110	12100	0,090	0,070	0,070	0,077
120	14400	0,090	0,069	0,064	0,074
130	16900	0,090	0,063	0,063	0,072
140	19600	0,090	0,064	0,064	0,073
150	22500	0,090	0,069	0,061	0,073
160	25600	0,080	0,061	0,062	0,068
170	28900	0,080	0,060	0,065	0,068
180	32400	0,080	0,069	0,065	0,071
190	36100	0,080	0,060	0,060	0,067
200	40000	0,080	0,068	0,061	0,070

<sup>137</sup> Cs, A = 186,5 kBq [5 cm Pb]					
d (cm)	d <sup>2</sup> (cm <sup>2</sup> )	Brzina doze (μSv/h) RDS-31	Brzina doze (μSv/h) FH 40 G-L10 [1]	Brzina doze (μSv/h) FH 40 G-L10 [2]	Srednja vrijednost brzina doze (μSv/h)
10	100	0,080	0,073	0,078	0,077
20	400	0,080	0,072	0,076	0,076
30	900	0,080	0,074	0,072	0,075
40	1600	0,080	0,074	0,070	0,075
50	2500	0,080	0,072	0,071	0,074
60	3600	0,080	0,074	0,068	0,074
70	4900	0,080	0,074	0,066	0,073
80	6400	0,080	0,074	0,065	0,073
90	8100	0,080	0,074	0,064	0,073
100	10000	0,080	0,074	0,064	0,073
110	12100	0,080	0,074	0,064	0,073
120	14400	0,080	0,074	0,065	0,073
130	16900	0,080	0,074	0,063	0,072
140	19600	0,080	0,074	0,065	0,073
150	22500	0,080	0,074	0,063	0,072
160	25600	0,080	0,074	0,064	0,073
170	28900	0,070	0,074	0,065	0,070
180	32400	0,070	0,074	0,061	0,068
190	36100	0,070	0,074	0,061	0,068
200	40000	0,070	0,074	0,060	0,068

$^{137}\text{Cs}$ , A = 186,5 kBq [10 cm Pb]					
d (cm)	d <sup>2</sup> (cm <sup>2</sup> )	Brzina doze ( $\mu\text{Sv/h}$ ) RDS-31	Brzina doze ( $\mu\text{Sv/h}$ ) FH 40 G-L10 [1]	Brzina doze ( $\mu\text{Sv/h}$ ) FH 40 G-L10 [2]	Srednja vrijednost brzina doze ( $\mu\text{Sv/h}$ )
10	100	0,070	0,074	0,072	0,072
20	400	0,070	0,071	0,071	0,071
30	900	0,070	0,069	0,069	0,069
40	1600	0,070	0,070	0,065	0,068
50	2500	0,070	0,069	0,063	0,067
60	3600	0,070	0,066	0,063	0,066
70	4900	0,070	0,065	0,062	0,066
80	6400	0,070	0,063	0,064	0,066
90	8100	0,070	0,061	0,064	0,065
100	10000	0,070	0,060	0,066	0,065
110	12100	0,070	0,063	0,063	0,065
120	14400	0,070	0,060	0,066	0,065
130	16900	0,070	0,060	0,062	0,064
140	19600	0,070	0,062	0,063	0,065
150	22500	0,070	0,063	0,064	0,066
160	25600	0,070	0,064	0,060	0,065
170	28900	0,070	0,059	0,060	0,063
180	32400	0,060	0,060	0,060	0,060
190	36100	0,060	0,063	0,059	0,061
200	40000	0,060	0,060	0,058	0,059