

# Raspodjela ambijentalnog doznog ekvivalenta u Slavenskom Brodu

---

Tišma, Isabela

Master's thesis / Diplomski rad

2017

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:160:147897>

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

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



Repository / Repozitorij:

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



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



**ISABELA TIŠMA**

**RASPODJELA AMBIJENTALNOG DOZNOG  
EKVIVALENTA U SLAVONSKOM BRODU**

**Diplomski rad**

**Osijek, 2017.**

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



**ISABELA TIŠMA**

**RASPODJELA AMBIJENTALNOG DOZNOG  
EKVIVALENTA U SLAVONSKOM BRODU**

**Diplomski rad**

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

**Osijek, 2017.**

**"Ovaj diplomski rad je izrađen u Slavonskom Brodu pod vodstvom doc.dr.sc. Branka Petrinca u sklopu Sveučilišnog diplomskog studija fizike i informatike na Odjelu za fiziku Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku".**

## **Zahvale**

*Zahvaljujem se Institutu za medicinska istraživanja i medicinu rada, Jedinici za zaštitu od zračenja, na dodjeli mjernog instrumenta na privremeno korištenje u svrhu prikupljanja mjernih podataka. Također se zahvaljujem Zavodu za prostorno uređenje Brodsko-posavske županije na ustupanju svih geoprostornih podataka u potrebnom formatu za izradu web GIS aplikacije, te Državnom hidrometeorološkom zavodu na danoj arhivi meteoroloških podataka. Posebno se zahvaljujem svome mentoru doc.dr.sc. Branku Petrincu, koji mi je svojim stručnim i uvelike koristim savjetima pomogao u izradi i usavršavanju ovog diplomskog rada.*

# Sadržaj

<b>Sažetak</b> .....	VII
<b>Abstract</b> .....	VIII
<b>1. Uvod</b> .....	1
<b>2. Teorijska podloga</b> .....	2
2.1. Spektar elektromagnetskog zračenja .....	2
2.2. Radionuklidi i radioaktivni raspadi .....	3
2.2.1. Notacija izotopa.....	3
2.2.2. Karta nuklida .....	3
2.2.3. Zakon radioaktivnog raspada .....	4
2.2.4. Vrste radioaktivnih raspada.....	5
2.3. Ionizirajuće i neionizirajuće zračenje .....	6
2.4. Utjecaj ionizirajućeg zračenja na čovjeka .....	10
2.5. Prirodni izvori ionizirajućeg zračenja.....	11
2.5.1. Kozmičko zračenje .....	11
2.5.2. Terestrijalno zračenje .....	12
2.6. Umjetni izvori ionizirajućeg zračenja.....	14
2.6.1. Primjena u medicini .....	14
2.6.2. Primjena u industriji .....	15
2.6.3. Primjena u znanstvenim istraživanjima.....	16
2.6.4. Nuklearne elektrane.....	17
2.6.5. Nuklearne eksplozije – testiranje nuklearnog oružja .....	17
2.7. Dozimetrijske veličine .....	19
2.7.1. Zaštitne dozimetrijske veličine.....	19
2.7.1.1. Apsorbirana doza .....	19
2.7.1.2. Ekvivalentna doza .....	19
2.7.1.3. Efektivna doza .....	20
2.7.2. Operativne dozimetrijske veličine.....	21
2.7.2.1. Ambijentalni dozni ekvivalent.....	22
2.7.2.2. Dozni ekvivalent smjera .....	22
2.7.2.3. Osobni dozni ekvivalent .....	23
2.8. Propisane granične vrijednosti primljene doze zračenja .....	23
2.9. Mjere zaštite i sigurnosti.....	24
<b>3. Mjerenje brzine ambijentalnog doznog ekvivalenta <math>\dot{H}^*</math>(10) u Slavonskom Brodu</b> .....	26

3.1. Materijali i metode.....	27
3.1.1. Korišteni instrumenti i aplikacije .....	27
3.1.1.1. RDS-31 S/R Multi-Purpose Survey Meter .....	28
3.1.1.2. CSW-31 Configuration Software for RDS-31 .....	29
3.1.1.3. Quantum GIS .....	29
3.1.1.4. OruxMaps .....	29
3.1.2. Priprema instrumenta RDS-31 .....	30
3.1.3. Prikupljanje i priprema uzoraka .....	32
3.1.4. Obrada rezultata .....	34
3.1.5. Analiza i rasprava dobivenih rezultata .....	35
<b>4. Zaključak.....</b>	<b>39</b>
<b>Literatura.....</b>	<b>40</b>
<b>Prilozi.....</b>	<b>IX</b>

# **RASPODJELA AMBIJENTALNOG DOZNOG EKVIVALENTA U SLAVONSKOM BRODU**

**ISABELA TIŠMA**

## **Sažetak**

U prvih nekoliko poglavlja ovog diplomskog rada dana je kratka teorijska podloga, u kojoj su opisani osnovni pojmovi iz radioekologije, počevši od same definicije zračenja, do definicija osnovnih dozimetrijskih veličina. U nastavku rada dana je metodologija mjerenja brzine ambijentalnog doznog ekvivalenta na području grada Slavenskog Broda, koja su provedena tijekom srpnja i kolovoza 2016. godine, u cilju ispitivanja potencijalnog utjecaja rafinerije nafte Brod, koja je smještena uz obalu rijeke Save, na ozračenje stanovništva Slavenskog Broda. Uz ove rezultate, također su izloženi i rezultati dobiveni uzorkovanjem rijeke Save i tla na području grada. Grafički prikaz dobivenih rezultata predstavljen je unutar web GIS aplikacije, koja u ovisnosti o korisničkom upitu selektira i izdvaja tražene položajne i atributne podatke o mjernim točkama.

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

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

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

**Ocjenjivači:** izv.prof.dr.sc. Vanja Radolić; doc.dr.sc. Branko Petrinec; doc.dr.sc. Marina Poje Sovilj

**Rad prihvaćen:** 25. svibnja 2017.



# **DISTRIBUTION OF AMBIENT DOSE EQUIVALENT IN THE CITY OF SLAVONSKI BROD**

**ISABELA TIŠMA**

## **Abstract**

In the first few chapters of this master thesis a short theoretical background was given, in which the basic concepts from radioecology were described, beginning from the definition of the radiation itself, to the definitions of a basic dosimetric quantities. In the following chapters, a methodology of measuring ambient dose rate equivalent in the city of Slavonski Brod during the period of July, 2016. to August, 2016., was given. The primary goal of this research was to examine the potential influence of oil refinery Brod, situated along the Sava River, on ionizing radiation exposure of the population of Slavonski Brod. Apart from this results, the results of Sava River and soil sampling on locations in the city area were also presented. Cartographic view of the recorded data is displayed within the web GIS application, which selects and extracts requested spacial and attribute information about measurement points, depending on the user made queries.

## **Thesis deposited in Department of Physics library**

**Keywords:** ambient dose rate equivalent/ dosimetric quantities/ radiation/ radiation exposure of the population/ web GIS application

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

**Reviewers:** Associate Professor Vanja Radolić, PhD; Assistant Professor Branko Petrincec, PhD; Assistant Professor Marina Poje Sovilj, PhD

**Thesis accepted:** May 25., 2017.

# 1. Uvod

Radionuklidi su prisutni u zraku, vodi i tlu, a mnogi datiraju još od vremena prije nastanka Sunčevog sustava. Zračenje i radionuklidi mogu biti umjetnog porijekla i danas imaju mnogo korisnih primjena. Međutim, ljudsko tijelo nema razvijeno osjetilo za detekciju ionizirajućeg zračenja i upravo zbog toga se često zanemaruju moguće posljedice prekomjerne izloženosti takvoj vrsti zračenja. Iz toga se razvila potreba za ispitivanjem i praćenjem zastupljenosti različitih izvora zračenja prisutnih u našoj okolini. Monitoring okoliša – kontinuirano ispitivanje i praćenje kontaminacije radionuklidima – ovisi o značajkama mjesta u okolišu na kojem se izvode mjerenja, a provodi se kako bi se detektirale promjene u dugoročnim trendovima u koncentracijama aktivnosti ili brzinama ambijentalnog doznog ekvivalenta u okolišu, odnosno radi identifikacije potencijalno opasnih radionuklida. Monitoringom dobivamo potrebne podatke za analizu i evaluaciju kontaminacije okoliša. [1]

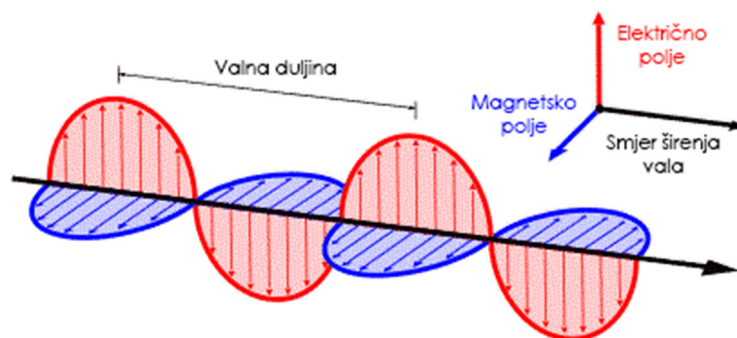
Razmatrajući trenutno aktualnu problematiku onečišćenja zraka u Slavonskom Brodu zbog utjecaja rafinerije nafte u Bosanskom Brodu, koja je smještena uz obalu rijeke Save, prirodno se nametnulo i pitanje: kakav je utjecaj rafinerije nafte Brod na ozračenje stanovništva u Slavonskom Brodu?

U prvih nekoliko poglavlja rada dana je sažeta teorijska podloga, radi upoznavanja čitatelja s osnovnim terminima u području zaštite od zračenja, te kako bi se shvatio smisao cjelokupnog teksta i napravio uvod u tematiku ovog rada. Drugi dio rada, koji je ujedno i najznačajniji, sadrži metodologiju mjerenja brzine ambijentalnog doznog ekvivalenta, u cilju procjene mogućeg ozračenja stanovništva i ispitivanja potencijanih izvora ionizirajućeg zračenja na području grada Slavenskog Broda, a posebice na području uz rijeku Savu, gdje je smještena rafinerija nafte Brod. Revizijom dobivenih rezultata izveden je opći zaključak, čime je ovaj diplomski rad kompletiran.

## 2. Teorijska podloga

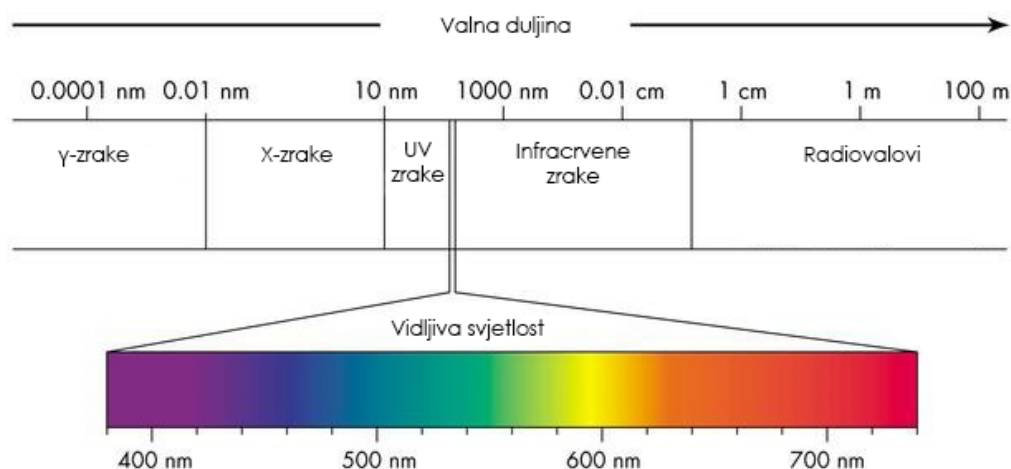
### 2.1. Spektar elektromagnetskog zračenja

Elektromagnetski valovi nastaju ubrzanim gibanjem nabijenih čestica pod utjecajem električnog i magnetskog polja. Ubrzani naboji proizvode titrajuća električna i magnetska polja koja se rasprostiru u prostoru konačnom brzinom, koja je jednaka brzini svjetlosti, i to u tzv. paketićima svjetlosne energije koje nazivamo fotonima. Vektori magnetskog i električnog polja u elektromagnetskom valu su okomiti jedan na drugog i na smjer rasprostiranja vala, stoga su elektromagnetski valovi transverzalni (Slika 1.).



Slika 1. Elektromagnetski val u prostoru [2]

Elektromagnetski spektar (Slika 2.) prikazuje raspodjelu svih vrsta elektromagnetskih valova, ovisno o njihovoj valnoj duljini, odnosno frekvenciji. Dijeli se na sljedeća područja: gama ( $\gamma$ ) zračenje, rendgensko (X) zračenje, ultraljubičasto (UV) zračenje, vidljiva svjetlost, infracrveno (IR) zračenje, mikrovalno zračenje i radiovalovi. Međutim, ljudsko oko može detektirati samo maleni dio elektromagnetskog spektra koji nazivamo vidljivom svjetlosti.



Slika 2. Elektromagnetski spektar [3]

## 2.2. Radionuklidi i radioaktivni raspadi

Sva materija započinje s atomima, a svaki element je određen atomskim brojem, odnosno brojem protona u svojoj jezgri atoma. Atome istog kemijskog elementa koji imaju isti broj protona, a različit broj neutrona nazivamo izotopima. Svaki element ima određeni raspon broja neutrona koji mogu pripadati jezgri atoma, a da ona pritom ostane stabilna. Prema tome, izotop nazivamo stabilnim ukoliko je omjer broja protona i neutrona u jezgri atoma optimalan. Ukoliko jezgra sadrži premali ili pak preveliki broj neutrona, atom je nestabilan. Izotope koji nisu stabilni, odnosno spontano se raspadaju i pritom emitiraju zračenje nazivamo radionuklidima. Tijekom procesa raspada, njihova aktivnost opada s vremenom, da bi u konačnici postali stabilni. [4]

### 2.2.1. Notacija izotopa

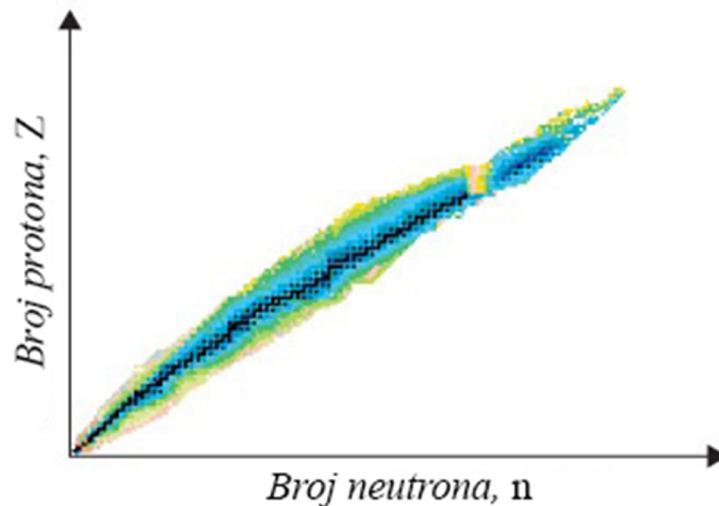
S obzirom da pojedini kemijski elementi mogu imati više izotopa, kako bi se naznačio određeni izotop, uz simbol kemijskog elementa se dodaje odgovarajući indeks i eksponent



gdje je X simbol elementa, Z atomski broj (broj protona), a A maseni broj (koji je jednak zbroju  $A = Z + n$ , gdje je n broj neutrona). Zbog toga što svi izotopi nekog elementa imaju jednak atomski broj Z, on se često izostavlja u zapisu izotopa.

### 2.2.2. Karta nuklida

Svi poznati postojeći izotopi (stabilni i nestabilni) se mogu prikazati na tzv. karti nuklida, koja sadrži informacije o svojstvima jezgri na položajima (Z, n), gdje je Z broj protona, a n broj neutrona. Svaki kvadratić na grafu (Slika 3.) predstavlja jedan izotop, odnosno jednu kombinaciju protona i neutrona. Crno osjenčani kvadratići na grafu tvore zakrivljenu liniju stabilnih izotopa, odnosno tzv. liniju stabilnosti. Što je izotop dalje smješten od linije stabilnosti, to je on radioaktivniji. Kada nestabilni, radioaktivni atom emitira zračenje kako bi postao stabilniji, kažemo da on prolazi kroz proces radioaktivnog raspada. [5]



Slika 3. Karta nuklida [6]

### 2.2.3. Zakon radioaktivnog raspada

Aktivnost radionuklida eksponencijalno opada s vremenom. Atomi se preobražavaju prema određenoj konstanti raspada  $\lambda$ , koja ovisi o prirodi radioaktivnog elementa. Broj atomskih jezgri  $dN$  koje se raspadnu u kratkom vremenskom intervalu  $dt$  dan je izrazom

$$dN = -\lambda N(t)dt. \quad (1)$$

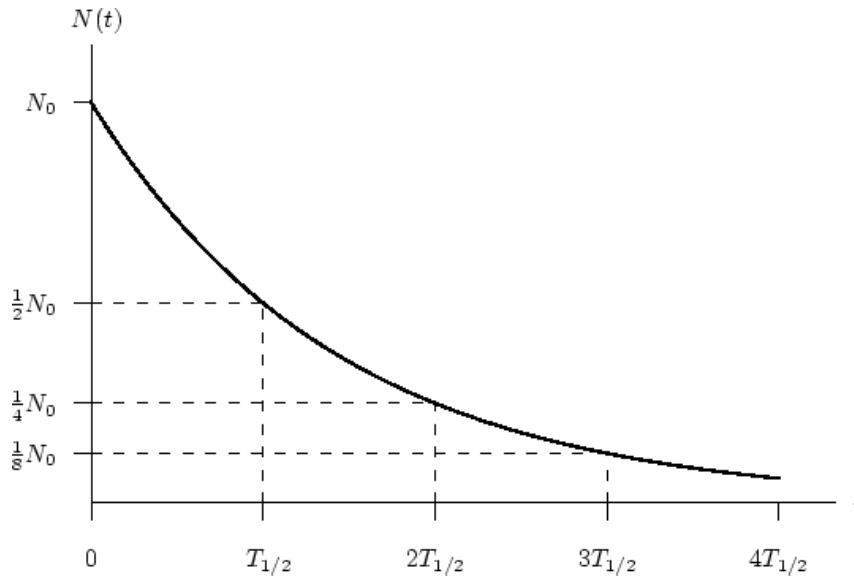
Integracijom ovog izraza dobivamo

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}, \quad (2)$$

ukoliko postavimo da se radioaktivna supstanca u trenutku  $t = 0$  sastoji od  $N_0$  atoma, dok  $N(t)$  označava broj preostalih atoma nakon proteklog vremena  $t$ . Gornji izraz je poznat kao zakon radioaktivnog raspada (Slika 4.).

Svatom radionuklidu se može pripisati određeno vrijeme poluraspada  $T_{1/2}$ , koje definiramo kao vrijeme potrebno da se broj atoma radionuklida smanji na polovinu početne vrijednosti  $N_0$ . Konstanta raspada  $\lambda$  je povezana s vremenom poluraspada izrazom

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} = \frac{0,693}{T_{1/2}}. \quad (3)$$



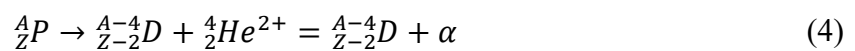
Slika 4. Radioaktivni raspad [7]

Zakon radioaktivnog raspada je statističke prirode, te samo daje vjerojatnost da se atom raspadne u nekom vremenskom intervalu između  $t_0$  i  $t_0 + \Delta t$ . Neki atomi će se raspasti gotovo trenutno, dok će drugima za to trebati mnogo više vremena.

#### 2.2.4. Vrste radioaktivnih raspada

Radioaktivne jezgre tijekom raspada mogu emitirati alfa ( $\alpha$ ) ili beta ( $\beta$ ) čestice, kao i gama ( $\gamma$ ) zrake. U nastavku su opisane tri osnovne i najčešće vrste radioaktivnih raspada.

- ⚠ Alfa raspad: U ovom procesu, nestabilna jezgra (roditelj)  $P$  raspada se u stabilniju jezgru (kćer)  $D$  i pritom emitira  $\alpha$  česticu. S obzirom da je  $\alpha$  čestica jezgra helija,  $\alpha$  raspadom se atomski broj roditelja  $P$  smanjuje za dva, a njegov maseni broj za četiri: [8]



- ⚠ Beta raspad ( $\beta^-$ ,  $\beta^+$ ):  $\beta^-$  raspad podrazumijeva proces u kojem neutron prelazi u proton uz emisiju  $\beta^-$  čestice (elektrona,  $e^-$ ) i antineutrina  $\bar{\nu}_e$ ; atomski broj se pritom povećava za jedan, dok se maseni broj ne mijenja: [8]



Tijekom  $\beta^+$  raspada, proton prelazi u neutron uz emisiju  $\beta^+$  čestice (pozitrona  $e^+$ ) i neutrina  $\nu_e$ ; atomski broj nastalog elementa je manji za jedan, dok maseni broj ostaje isti: [8]



⚠ Gama raspad: Nastaje zbog preostale energije u jezgri (kažemo da se ona nalazi u pobuđenom energijskom stanju) nakon alfa ili beta raspada, ili nakon neutronske uhvata (»proces u kojem atomska jezgra uhvati neutron« [9]) u nuklearnom reaktoru. Atomska jezgra prelazi iz pobuđenog u osnovno energijsko stanje i pritom se preostala energija oslobađa u obliku fotona  $\gamma$  gama zračenja:



gdje je s  ${}^A_Z X^*$  označeno pobuđeno stanje jezgre  ${}^A_Z X$ . Gama zračenje ne utječe na atomski ili maseni broj radionuklida, odnosno ovim raspadom ne nastaje novi kemijski element. [4] [8]

### 2.3. Ionizirajuće i neionizirajuće zračenje

Zračenje predstavlja energiju u obliku valova ili struje čestica. Razlikujemo dvije vrste zračenja: neionizirajuće i ionizirajuće zračenje. [4]

Neionizirajuće zračenje ima manju energiju od ionizirajućeg zračenja, odnosno ono ne posjeduje dovoljno energije da bi stvaralo ione. Primjeri neionizirajućeg zračenja su vidljiva svjetlost, infracrveno zračenje, radiovalovi, mikrovalno zračenje i Sunčeva svjetlost. [4]

Ionizirajuće zračenje ima dovoljno energije da izbacuje elektrone iz atoma, narušavajući na taj način neutralnost atoma koji zatim postaje pozitivno nabijen. Tako električki nabijene molekule i atomi nazivaju se ionima. Ionizirajuće zračenje uključuje zračenje koje potječe od prirodnih i

umjetnih radioaktivnih izvora. Nekontrolirana primjena umjetnih izvora zračenja, nastalih kao posljedica ljudske aktivnosti, predstavlja potencijalnu opasnost za žive organizme. [4]

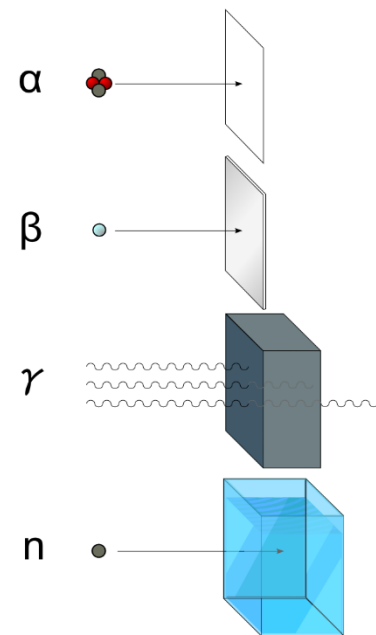
Razlikujemo nekoliko vrsta ionizirajućeg zračenja: alfa zračenje ( $\alpha$ ), beta zračenje ( $\beta$ ), fotonsko zračenje (gama ( $\gamma$ ) i rendgensko (X)) i neutronska zračenje (n).

Alfa čestice se sastoje od dva protona i dva neutrona i nose dvostruki pozitivni naboj. Najčešće se javljaju kao produkt radioaktivnog raspada najtežih radioaktivnih elemenata kao što su  $^{238}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  i  $^{210}\text{Po}$ . Zbog njihove relativno velike mase i naboja, imaju iznimno ograničenu sposobnost prodiranja u materiju (može ih zaustaviti list papira) (Slika 5.). Zdravstvene posljedice koje alfa čestice mogu ostaviti na ljudsko tijelo znatno

ovise o vrsti izloženosti. Vanjska kontaminacija (izvor se nalazi izvan organizma) ostavlja mnogo manje posljedice od unutarnje kontaminacije (izvor je smješten unutar organizma), zbog toga što alfa česticama nedostaje energije za prodiranje vanjskih slojeva kože. Međutim, ukoliko alfa emiteri dospiju u organizam, primjerice udisanjem ili gutanjem, tjelesna tkiva će u potpunosti apsorbirati energiju alfa zračenja, koje tada može ostaviti ozbiljne posljedice na unutrašnja tkiva i organe. [11]

Beta čestice predstavljaju elektrone relativističkih brzina koji se emitiraju iz jezgre tijekom radioaktivnog raspada. Ljudi su izloženi beta česticama zbog prirodnih i umjetnih izvora zračenja, kao što su  $^3\text{H}$  (tricij),  $^{14}\text{C}$  i  $^{90}\text{Sr}$ . Beta čestice imaju veći domet od alfa čestica (čiji domet u zraku iznosi svega nekoliko centimetara), ali ostavljaju manje posljedice na jednako prijađenim udaljenostima. Njihov domet u zraku iznosi nekoliko metara, a možemo ih zaustaviti slojem nekog materijala, primjerice aluminijskom pločicom debljine nekoliko milimetara. Beta čestice mogu prodrijeti u kožu i izazvati opekotine. Međutim, iznimno su štetne ukoliko ih organizam apsorbira kroz dišni ili probavni sustav (udisanjem ili gutanjem). [11]

Gama zrake čine fotoni elektromagnetskog zračenja. Nemaju naboj niti masu i imaju veliku sposobnost prodiranja u materiju. Mogu prodrijeti kroz različite materijale, uključujući i ljudsko tijelo, a i tkivo ih može apsorbirati. Potreban je debeli sloj nekog materijala, primjerice olova, kako



**Slika 5.** Prodornost pojedinih vrsta ionizirajućeg zračenja u materiju [10]



bi se zaustavilo gama zračenje. Jedan od prirodnih izvora gama zraka je radionuklid  $^{40}\text{K}$ . Najznačajniji umjetni izvori beta i gama zračenja su  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  ( $^{137\text{m}}\text{Ba}$ ) i  $^{131}\text{I}$ . [11]

### **Kalij**

Kalij je prirodni sastojak tla, široko je rasprostranjen u prirodi i prisutan je u svim biljnim i životinjskim tkivima. Njegova koncentracija u Zemljinoj kori iznosi oko 15 000 mg/kg, a u morskoj vodi oko 416 mg/L.  $^{40}\text{K}$  je prirodni radioaktivni izotop kalija. Zbog toga što  $^{40}\text{K}$  sačinjava 0,012 % prirodnog kalija, njegova koncentracija u Zemljinoj kori iznosi oko 1,8 mg/kg. Zajedno s dušikom i fosforom, kalij se koristi za proizvodnju umjetnih gnojiva, pa koncentracija  $^{40}\text{K}$  u tlu ovisi o vrsti i količini gnojiva koje se dodaje tlu.  $^{40}\text{K}$  se apsorbira u biljna i životinjska tkiva kroz uobičajene biološke procese. Predominantan je radioaktivni sastojak ljudskog tkiva i većine prehrambenih namirnica. Ima vrijeme poluraspada od 1,3 milijardi godina. U 89 % slučajeva podliježe beta raspadu i prelazi u  $^{40}\text{Ca}$ , dok u 11 % slučajeva elektronskim uhvatom nastaje  $^{40}\text{Ar}$ , praćen emisijom gama zračenja. Energija emitirane gama zrake je od posebnog značaja, jer pomoću nje možemo ustanoviti kada je započeo raspad  $^{40}\text{K}$ . Na taj način metodom datiranja može se odrediti starost stijena ili organizama koji sadrže  $^{40}\text{K}$ . [12] [13]

### **Cezij**

Cezij se u prirodi pojavljuje kao izotop  $^{133}\text{Cs}$  i dio je sastava različitih ruda, a u manjoj mjeri pojavljuje se i u tlu. Cezij ima desetak značajnih radioaktivnih izotopa, a samo dva od njih imaju dovoljno dugo vrijeme poluraspada da bi mogli izazvati opasnost:  $^{134}\text{Cs}$  i  $^{137}\text{Cs}$ . Oba radioaktivna izotopa nastaju procesom nuklearne fisije. Radioaktivni cezij je prisutan u tlu na mnogim mjestima diljem svijeta, uglavnom kao posljedica atmosferskih nuklearnih testiranja. Također ulazi u sastav istrošenog nuklearnog goriva, visoko radioaktivnog otpada koji nastaje obradom istrošenog nuklearnog goriva, i radioaktivnog otpada nastalog u nuklearnim reaktorima.  $^{137}\text{Cs}$  ima vrijeme poluraspada od približno 30 godina i prolazi beta raspad do stabilnog  $^{137}\text{Ba}$  ili metastabilnog  $^{137\text{m}}\text{Ba}$ . Metastabilni  $^{137}\text{Ba}$  (s vremenom poluraspada  $\approx 2$  min) prelazi u stabilni  $^{137}\text{Ba}$  i pritom emitira gama zračenje. U otprilike 95 % slučajeva će raspadom nastati  $^{137\text{m}}\text{Ba}$ , dok će stabilni  $^{137}\text{Ba}$  nastati u samo 5 % slučajeva. Radioaktivni  $^{134}\text{Cs}$  ima vrijeme poluraspada od približno dvije godine, a najčešće se raspada u stabilni  $^{134}\text{Ba}$  beta raspadom ili (u manjem broju slučajeva) u stabilni  $^{134}\text{Xe}$  elektronskim uhvatom, i u oba slučaja emitira gama zračenje.  $^{137}\text{Cs}$  predstavlja vanjsku, kao i unutarnju štetu za organizam. Snažno vanjsko gama zračenje, koje nastaje kao nusprodukt njegova raspada u  $^{137\text{m}}\text{Ba}$ , čini ga vanjskim kontaminantom, a za obranu je često potrebno koristiti

štitove. Unutar organizma, cezij predstavlja izvor beta i gama zračenja, čime je povećan rizik od nastanka karcinoma. [12] [14]

### **Jod**

Jod je element prirodno prisutan u morskoj vodi i tlu. Dolazi u obliku stabilnih i nestabilnih (radioaktivnih) izotopa. Većina nestabilnih oblika je umjetnog porijekla, nastala utjecajem ljudskih aktivnosti.  $^{131}\text{I}$  je nestabilni izotop joda, koji se proizvodi u medicinske i industrijske svrhe procesom nuklearne fisije. Također je nusprodukt fisijskih procesa u nuklearnim reaktorima i testiranja nuklearnog oružja. Posebno značajnu ulogu ima u medicini, gdje se koristi za uspostavljanje dijagnoze i tretiranje pacijenata oboljelih od karcinoma štitnjače. S vremenom poluraspada od 8 dana, podliježe beta raspadu i prelazi u metastabilni  $^{131}\text{Xe}$ , koji emitira relativno slabo gama zračenje. Vanjska izloženost velikim količinama  $^{131}\text{I}$  može dovesti do pojave opekline na očima i koži. Ukoliko  $^{131}\text{I}$  dospije u organizam u velikim količinama, može se akumulirati u štitnjači, koja koristi jod za proizvodnju hormona, i koja ne razlikuje radioaktivni jod ( $^{131}\text{I}$ ) od stabilnog joda. Kontaminacija  $^{131}\text{I}$  u okolišu posljedica je nekontroliranog ispuštanja radioaktivnog materijala u atmosferu tijekom nuklearne nesreće. Oslobođanjem u atmosferu,  $^{131}\text{I}$  može dospjeti u tlo, i na taj način dovesti do kontaminacije hrane i vode koju ljudi potom konzumiraju. Prema tome, u slučaju nuklearne nesreće potrebno je određeno vrijeme pratiti koncentracije  $^{131}\text{I}$  u hrani, posebno u mlijeku i povrću, a također i u vodi. [15]

Rendgenske zrake čine fotoni visokih energija koji nastaju interakcijom nabijenih čestica s materijom. Rendgenske zrake i gama zrake imaju ista svojstva, ali su različitog porijekla. Rendgenske zrake nastaju procesima izvan jezgre (npr. bombardiranjem teških atoma brzim elektronima), dok gama zrake nastaju unutar jezgre atoma (tijekom raspada radioaktivnih atoma). Rendgenske zrake je 1895. godine otkrio Wilhelm Conrad Roentgen, u tijeku svog rada s katodnom cijevi. Uočio je da visoki napon između elektroda postavljenih u staklenu cijev ispunjenu plinom, pri vrlo niskom tlaku, proizvodi prodorno zračenje, koje potiče određene materijale da fluoresciraju vidljivu svjetlost. Također je zamijetio da pri naponu većem od 30 kV, nastale zrake (koje je on nazvao X-zrakama zbog njihove nepoznate prirode) mogu prodrijeti kroz ljudsko tkivo, ali ne i kroz kosti i metalne predmete, ostavljajući pritom sjenu na fluorescentnom zaslonu. Potom se došlo do saznanja da elektroni, emitirani iz negativne elektrode (katode) i ubrzani primjenom visokog napona, emitiraju elektromagnetsko zračenje (fotone X-zračenja) prilikom sudara s pozitivnom elektrodom (anodom). Zanimljiva je činjenica da se većinski dio energije pristiglih elektrona pretvara u toplinu, dok ostatak (oko 1 %) čine rendgenske zrake.

Rendgenske zrake imaju manju energiju i stoga su manje prodorne od gama zraka. Nekoliko milimetara olova može zaustaviti rendgenske zrake. Rendgensko zračenje ima široku primjenu u medicini i industriji, koja se uglavnom odnosi na prodiranje zračenja kroz tvar u svrhu ispitivanja njezine unutrašnje strukture. [11] [16] [17]

Neutroni su električki neutralne čestice u jezgri atoma, i imaju masu približno jednaku masi protona, koji se također nalaze u jezgri. Zbog toga što neutroni nemaju električni naboj, oni ne ostvaruju interakciju s elektronima atoma, ali su u interakciji s jezgrama atoma. Nuklearna sila koja drži nukleone (čestice koje tvore jezgru atoma) i dovodi do ovih interakcija ima veoma kratak domet, što znači da neutron mora proći blizu jezgre kako bi došlo do interakcije. S obzirom da je atomska jezgra malena u odnosu na atom u cjelini, neutroni imaju malu vjerojatnost interakcije i stoga su vrlo prodorni. Ovisno o njihovoj energiji, mogu proći kroz nekoliko desetaka centimetara tkiva. Kao zaštita se obično koristi voda u nuklearnim reaktorima i debeli sloj betona u akceleratorima čestica, jer su interakcije s jezgrama vodika vrlo učinkovite u redukciji energije neutrona. [16]

## **2.4. Utjecaj ionizirajućeg zračenja na čovjeka**

Ionizirajuće zračenje je pojava koju ljudsko tijelo ne može detektirati sa svojim osjetilima. Posljedice nisu trenutno osjetne niti vidljive, već se zamjećuju tek kroz određeni vremenski period, a ovise o apsorbiranoj dozi i o vremenskoj izloženosti zračenju.

Svi smo mi izloženi prirodnom zračenju iz okoline, stoga ga ne možemo izbjeći. Međutim, dodatni izvori zračenja, nastali utjecajem ljudskih aktivnosti, mogu uzrokovati ozbiljne zdravstvene posljedice, a u ponekim slučajevima mogu dovesti i do smrti organizma, ukoliko ukupna efektivna doza izloženog pojedinca prijeđe određenu graničnu vrijednost. Zračenje i radioaktivni materijali umjetnog porijekla imaju mnogo korisnih primjena, primjerice u medicini, industriji, te znanstveno-istraživačkom radu. Prije upotrebe radioaktivnih izvora i uređaja u bilo koju svrhu nužno je predvidjeti moguće posljedice na radnike, stanovništvo i okoliš, te propisati određene radnje i mjere zaštite koje će se provoditi u slučaju izvanrednog događaja.

Izloženost ljudskog tkiva ili organa ionizirajućem zračenju može prouzrokovati smrt stanica i time onemogućiti normalan rad izloženog tkiva ili organa. Učinci ovog tipa nazivaju se determinističkim učincima, i klinički su primjetni na pojedincu samo ukoliko primljena doza zračenja prijeđe određenu graničnu vrijednost. Međutim, izloženost zračenju također može

inducirati i neletalnu transformaciju stanica, koje i dalje mogu zadržati svoju sposobnost diobe. Čovjekov imunološki sustav je vrlo djelotvoran u detekciji i uništavanju abnormalnih stanica. No ipak, moguće je da ta neletalna transformacija stanice, nakon latentnog perioda («period bolesti u kojem ne postoje vidljivi klinički simptomi» [18]), rezultira pojavom karcinoma kod izloženog pojedinca, ukoliko se radi o somatskoj (tjelesnoj) stanici, ili takva transformacija stanice može izazvati nasljedne učinke, ukoliko se radi o spolnoj stanici. Ovakvi učinci nazivaju se slučajnim, odnosno stohastičkim učincima, jer nisu točno određeni i ne možemo ih predvidjeti. Drugim riječima, vjerojatnost nastanka stohastičkih učinaka je neovisna o primljenoj dozi zračenja, odnosno za stohastičke učinke ne postoji određena granična vrijednost. [19]

## **2.5. Prirodni izvori ionizirajućeg zračenja**

Mnogi radionuklidi se prirodno pojavljuju u okolišu, a neki od njih su i sastavni dio našeg organizma. Tzv. primordijalni radionuklidi, prisutni su na Zemlji još od vremena nastanka Sunčevog sustava. Primjeri takvih radionuklida su uranij i torij, koji imaju vrijeme poluraspada od nekoliko milijardi godina, i još uvijek su prisutni u našoj okolini. U prirodne izvore ionizirajućeg zračenja ubrajamo kozmičko i terestrijalno zračenje. [4]

### **2.5.1. Kozmičko zračenje**

Zemlja je konstantno izložena utjecaju kozmičkog zračenja, odnosno tzv. kozmičkih zraka, koje čine subatomske, električki nabijene čestice iz svemira. Kozmičke zrake sastoje se od visoko-energetskih čestica, uglavnom protona (83 %), zatim helijevih jezgri, odnosno alfa čestica (13 %), elektrona (3 %) te atomskih jezgri masivnijih od helija (1 %), primjerice ugljika, kisika i jezgri željeza. Kozmičke zrake, iako ih nazivamo »zrakama«, nisu oblik elektromagnetskog zračenja; radi se o čestičnom zračenju. Znanstvenici su koristili to ime prije nego što su otkrili sastav kozmičkih zraka; neki su smatrali da se radi o visoko-energetskim gama zrakama. To mišljenje se zadržalo sve do 1932. godine kada je otkriveno da Zemljino magnetsko polje zakreće putanju kozmičkih zraka, što je dovelo do zaključka da su kozmičke zrake nabijene čestice, a ne elektromagnetsko zračenje. Danas znamo da su kozmičke zrake nabijene subatomske čestice koje putuju brzinom malo manjom od brzine svjetlosti. Zemljina atmosfera ponekad propušta čestice ovog zračenja, koje zatim apsorbiraju ljudi, te na taj način ljudsko tijelo postaje izloženo prirodnoj radioaktivnosti. [20]

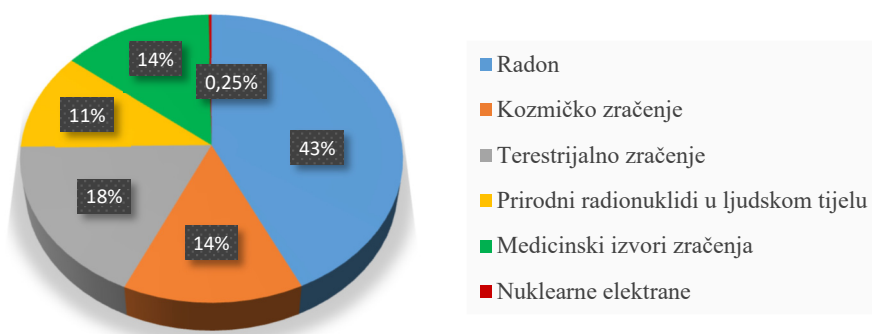
## 2.5.2. Terestrijalno zračenje

Kozmičko zračenje predstavlja manji izvor izloženosti rendgenskom i gama zračenju. Većina prirodne izloženosti potječe od terestrijalnih izvora. Sve što se nalazi na Zemljinoj površini i u njezinoj unutrašnjosti sadrži radionuklide. Primordijalni radionuklidi pronađeni u tlu ( $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$  i  $^{232}\text{Th}$ ), zajedno s radionuklidima u koje se raspadaju, emitiraju zračenje. Procjene vanjske kontaminacije, odnosno izloženosti zračenju čiji je izvor izvan ljudskog tijela, znatno se razlikuju od jednog mjesta do drugog. Tako neki lokaliteti imaju toliko veliku koncentraciju navedenih radionuklida da vrijednost brzine doze može biti i 100 puta veća od globalne prosječne vrijednosti. Ovi radionuklidi, i neki drugi nastali interakcijom kozmičkih zraka sa Zemljinom atmosferom, također su prisutni u hrani i piću i tako dospijevaju u ljudski organizam. [16] [21]

Udisanje radioaktivnih plinova, čiji su izvor radioaktivni minerali pronađeni u tlu i stijenama, predstavlja potencijalnu opasnost od zračenja. Primjer takvog plina je radon. Radon je prirodni radioaktivni plin koji nastaje raspadom uranija. Riječ je o plinu bez mirisa, boje i okusa, pa ga ljudska osjetila ne mogu detektirati. Prirodno je prisutan u tlu, iz kojeg se oslobađa u zrak i podzemne vode. Kada se jednom oslobodi u zrak, obično se rasprši u atmosferi u koncentraciji koja je bezopasna za ljudsko zdravlje. Međutim, u zatvorenim, osobito stambenim prostorima radon se može akumulirati i udisanjem dospjeti u ljudsko tijelo, što može izazvati zdravstvene probleme, ukoliko njegova koncentracija dosegne određenu kritičnu vrijednost. Prosječna koncentracija radona u otvorenim prostorima se kreće između 5-15 Bq/m<sup>3</sup>, dok u zatvorenim prostorima te vrijednosti variraju od 10 Bq/m<sup>3</sup> do čak više od 10 000 Bq/m<sup>3</sup>. Koncentracije radona su najviše na područjima nalazišta uranijevih i torijevih ruda, te granita. Radon se primarno upotrebljava u istraživanju; nema značajnu industrijsku namjenu. Od 20 poznatih izotopa radona, samo se tri pojavljuju u prirodi, i svi su radioaktivni.  $^{222}\text{Rn}$  je najčešći i najstabilniji izotop radona, a nastaje raspadom radija.  $^{220}\text{Rn}$  (toron) nastaje raspadom torija, a  $^{219}\text{Rn}$  (aktinon) raspadom aktinija. Radon i njegovi kratkoživući produkti raspada u atmosferi daju najveći doprinos efektivnoj dozi od prirodnih izvora. [4] [16] [22]

Znanstveni odbor o učincima atomskog zračenja Ujedinjenih naroda (UNSCEAR) redovno izdaje izvješća s procjenama razine izloženosti stanovništva svim izvorima ionizirajućeg zračenja. Rezultati njihove posljednje objave od 2000. godine [23] prikazani su grafički pomoću dijagrama na Slici 6. Ukupna godišnja efektivna doza koju primi svaki izloženi stanovnik od svih izvora ionizirajućeg zračenja iznosi 2,8 mSv. Oko 86 % od te ukupne vrijednosti dolazi od prirodnih

izvora ionizirajućeg zračenja, s time da oko polovine te vrijednosti (43 %) dolazi od produkata raspada radona u zatvorenim prostorima/kućama. [24]



**Slika 6.** Udio zračenja iz različitih izvora u ukupnoj godišnjoj efektivnoj dozi koju primi svaki izloženi stanovnik (UNSCEAR, 2000.) [24]

**Tablica 1.** Doprinos pojedinih izvora zračenja ukupnoj godišnjoj efektivnoj dozi koju primi svaki izloženi stanovnik (UNSCEAR, 2000.) [24]

		Izvor	Doza (mSv)
Prirodni	Vanjska kontaminacija	Kozmičko zračenje	0,4
		Terestrijalno gama zračenje	0,5
	Unutarnja kontaminacija	Ingestija (hrana)	0,3
		Inhalacija (najvećim dijelom radon)	1,2
Umjetni	Medicinska dijagnostika		0,4
	Atmosferska nuklearna testiranja		0,005
	Černobil		0,002
	Nuklearne elektrane		0,0002
<b>Ukupna doza:</b>			<b>2,8</b>

## 2.6. Umjetni izvori ionizirajućeg zračenja

Prirodni izvori ionizirajućeg zračenja su prisutni posvuda u okolišu, i nisu posljedica ljudskog djelovanja. Zračenje može biti korisno za nas, ali nam isto tako može i naštetiti. Tijekom prošlog stoljeća, ljudi su razvili metode pomoću kojih će moći iskoristiti prednosti zračenja u istraživanju, medicini i industriji. Međutim, nesreće velikih razmjera u prošlosti (kao primjerice ona u Černobilu 1986. godine) su proizvele dodatno zračenje i prouzrokovale ispuštanje radioaktivnih materijala u atmosferu i okoliš, a posljedice su osjetne još i danas. Stoga je iznimno bitna stroga kontrola i zbrinjavanje radioaktivnog otpada, kako bismo zaštitili okoliš i žive organizme u njemu od potencijalnog prekomjernog ozračenja. [25] [26]

Umjetni izvori ionizirajućeg zračenja nastali su djelovanjem ljudskih aktivnosti, i imaju veliku primjenu u medicini, industriji, te u znanstvenim i tehnološkim istraživanjima.

### 2.6.1. Primjena u medicini

Najveći doprinos ukupnoj godišnjoj efektivnoj dozi zračenja kojem je izložen pojedini stanovnik od umjetnih izvora ionizirajućeg zračenja čine medicinski izvori zračenja (UNSCEAR, 2000.). Radioaktivni izvori i uređaji danas se uglavnom koriste u medicinskoj dijagnostici, za liječenje karcinoma ili za ozračivanje krvnih pripravaka. Najpoznatija primjena je u rendgenskim uređajima, koji koriste zračenje za detekciju slomljenih kostiju ili za dijagnosticiranje bolesti. Postupak snimanja rendgenskim uređajem temelji se na dobivanju i bilježenju slike predmeta ispitivanja, koja nastaje prolaskom i apsorpcijom ionizirajućeg zračenja u predmet ispitivanja. Da bi se u konačnici dobio oblik prikladan za prikaz na dijagnostičkom monitoru, rendgenski uređaji u sklopu svoje strukture imaju elektroničko pojačalo slike, u kojem se nakon prolaska kroz predmet ispitivanja rendgensko zračenje pretvara u slikovne podatke. U nuklearnoj medicini se pak za snimanje unutrašnjosti ljudskog tijela i za postavljanje dijagnoze uglavnom koristi gama kamera (Slika 7.). Postupak se sastoji u tome da se prije samog snimanja u tijelo pacijenta intravenozno



**Slika 7.** Gama kamera [27]

unese određeni radionuklid, čiji će se put kroz tijelo pratiti kasnijim snimanjem gama kamerom koja će detektirati gama zračenje koje emitira dani radionuklid. Na taj način može se ispitati funkcionalnost određenog organa. Neki od značajnijih radionuklida koji se primjenjuju u području medicinske dijagnostike i u nuklearnoj medicini su  $^{131}\text{I}$ ,  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{192}\text{Ir}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  i drugi. [4] [28] [29] [30]

U terapiji liječenja karcinoma, tumorsko tkivo je izloženo ionizirajućem zračenju, a postupak se može provoditi na način da je izvor postavljen izvan tijela pacijenta i usmjeren prema mjestu oboljenja (teleterapija) ili postavljanjem radioaktivnih izvora u tijelo pacijenta unutar ili u neposrednu blizinu tumorskog tkiva (brahiterapija). Djelovanjem zračenja uništavaju se stanice karcinoma, a rezultat je eliminacija ili redukcija tumorskog tkiva. [28]

U određenim slučajevima, potrebno je ozračiti krvni pripravak prije transfuzije kako bi se spriječila proliferacija limfocita (sposobnost limfocita da se umnažaju nakon stimulacije; limfociti su vrsta leukocita). Izlaganjem limfocita zračenju pri određenim dozama neće učiniti značajnu štetu drugim krvnim stanicama, stoga su ozračene komponente sigurne za sve pacijente. Međutim, istraživanja su pokazala da ozračeni eritrociti (crvene krvne stanice) brže propadaju od neozračenih, pa ovaj postupak dovodi do smanjenja roka uporabe pripravka. Ozračivanjem krvnog pripravka rendgenskim zrakama može se spriječiti i rijetka nuspojava transfuzijskog liječenja – bolest transplantata protiv primatelja (GVHD). [28] [31] [32]

### 2.6.2. Primjena u industriji

Radionuklidi imaju široku industrijsku primjenu. Najznačajnija područja primjene su sljedeća:

- ⚠ Industrijska radiografija: Također se naziva i postupkom nedestruktivnog testiranja (*engl. nondestructive testing, NDT*). Zračenje se koristi za kontrolu i nadzor cijevi, zidova i mnoštvo drugih objekata, odnosno za dobivanje slike njihove unutrašnjosti, u potrazi za mogućim nepravilnostima i propustima. Kao izvor se može koristiti izolirani izvor od radioaktivnog materijala ( $^{192}\text{Ir}$ ) ili rendgenski uređaj. [33]
  
- ⚠ Instrumenti za mjerenje ili praćenje određenih aktivnosti: Ovi uređaji (prijenosni ili fiksno postavljeni na određenu lokaciju) mogu pratiti i mjeriti brzinu protoka tekućina, mjeriti i kontrolirati debljinu metala, filma, papira i plastike, te gustoću materijala. Neki tipovi ovih



instrumenata se također koriste za određivanje sastava materijala, i obično sadrže radioaktivne materijale koji su emiteri gama zraka ili neutrona. [34]

⚠ Detektori dima: Značajni su sigurnosni uređaji. Većina detektora za dim sadrži umjetno proizvedeni radionuklid –  $^{241}\text{Am}$ , koji nastaje u nuklearnim reaktorima i produkt je raspada  $^{241}\text{Pu}$ . Ovakvi tipovi detektora koriste radioaktivni materijal kako bi otkrili prisutnost dima ili izvora plamena. [35]

⚠ Sterilizacija: Proizvodi koji se podvrgavaju ovom procesu se izlažu velikoj dozi zračenja. Ta doza zračenja je strogo kontrolirana, a proces se provodi kako bi se uništile bakterije koje slučajno dospiju u ambalažu tijekom procesa proizvodnje. Pritom sami proizvod ostaje netaknut. [28]

### 2.6.3. Primjena u znanstvenim istraživanjima

Brojne akademske i znanstvene institucije koriste radioaktivne izvore u cilju izvođenja laboratorijskih demonstracija i provođenja eksperimentalnih istraživanja. Znanstvenici koriste metodu datiranja pomoću radioaktivnog izotopa ugljika za određivanje starosti organskih tvari. Naime, u gornjim slojevima atmosfere, kozmičke zrake pogađaju dušikove atome i tako izgrađuju prirodni radioaktivni izotop ugljika  $^{14}\text{C}$ . Ugljik ulazi u sastav svih organskih tvari. Kada biljka ili životinja uquine, ona prestaje unositi novi ugljik u svoj organizam, i  $^{14}\text{C}$  koji se u njoj akumulirao za vrijeme života započinje proces radioaktivnog raspada. Kao rezultat toga, nakon smrti organizma, koncentracija  $^{14}\text{C}$  se počinje smanjivati u skladu sa zakonom radioaktivnog raspada. Računajući ovu razliku, arheolozi mogu odrediti približnu starost organizma. [36]

Radioaktivnost je našla svoju primjenu i u istraživanju svemira. Tako primjerice, svemirske letjelice posjeduju radionuklidne termoelektrične generatore (RTG), koji koriste toplinu dobivenu raspadom radionuklida plutonija za proizvodnju električne energije koja im je potrebna za dugotrajno putovanje Sunčevim sustavom, ali i za pokretanje računala koje prikuplja i obrađuje velike količine podataka. [37]

#### **2.6.4. Nuklearne elektrane**

Energiju možemo proizvesti na različite načine, koristeći generatore koje pokreće Sunce, vjetar, voda, ugljen, loživo ulje, plin, ili nuklearna fisija. Svrha nuklearne elektrane je da zagrije vodu do točke ključanja, kako bi se proizvela vodena para koja će pokrenuti generator, koji potom proizvodi električnu energiju. Nuklearne elektrane za pogon koriste nuklearno gorivo, i to uranij, koji proizvodi toplinu procesom fisije. Uranij pritom emitira radioaktivne tvari. Manji dio ovih radioaktivnih tvari (većinom plinovi) se pomiješa s vodom koja se koristi za hlađenje reaktora. Ostale nečistoće u vodi također postaju radioaktivne kako prolaze kroz reaktor. Voda koja prolazi kroz reaktor se filtrira kako bi se uklonile ove nečistoće, prije nego se vrati u okoliš. Međutim, malene količine radioaktivnih plinova i tekućina se naposljetku ipak ispuste u okoliš, ukoliko je ukupna aktivnost sadržanih radionuklida unutar propisanih granica otpuštanja. [36]

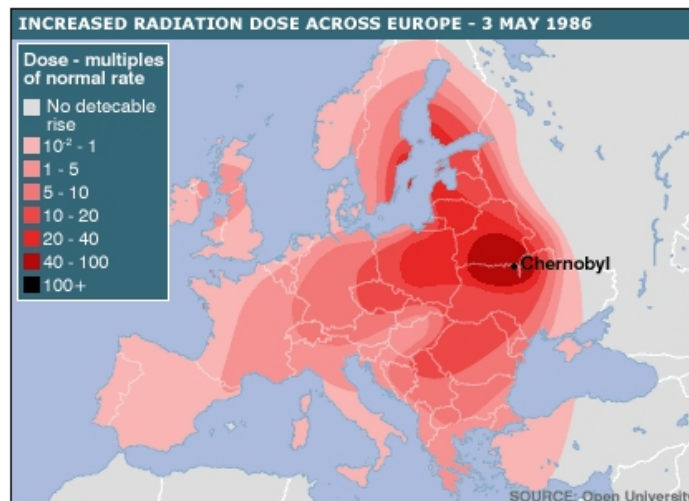
Iskorišteni radioaktivni izvori koji nemaju daljnju upotrebu moraju se pravilno zbrinuti. Kontroliranim skladištenjem i odlaganjem može se znatno smanjiti volumen radioaktivnog otpada. Za niski i srednje radioaktivni otpad način skladištenja je utvrđen i već u provedbi. Najčešće se koriste duboko iskopane jame s podlogom od nepropusnog materijala na koju se postavlja betonska ploča, a na nju betonski bazeni. Radioaktivni otpad u posudama se odlaže u betonske spremnike, koji se odlažu u betonski bazen. Potom se bazen zatvara betonskom pločom i prekriva zemljom. Za trajno odlaganje visoko radioaktivnog otpada odlučeno je da se koriste tzv. geološki repozitoriji – stabilne geološke formacije na kopnu. [38] [39]

#### **2.6.5. Nuklearne eksplozije – testiranje nuklearnog oružja**

Nuklearno oružje je jedan od izvora onečišćenja okoliša. Testiranja nuklearnog oružja se provode u svrhu provjere učinkovitosti nuklearnog oružja, a odvijaju se u atmosferi, pod zemljom i pod vodom. Atmosferskim testiranjem dolazi do ispuštanja i širenja velike količine radioaktivnog materijala u atmosferu. Kod podzemnih testiranja detonacijom dolazi do raspršenja radioaktivnog materijala u zemlji, koji ponekad može izbiti i na njezinu površinu. Podvodna testiranja su osobito štetna jer je u tom slučaju područje zagađenja izrazito veliko i utječe na morski biosustav.

Mjesta na kojima su se dogodile nuklearne eksplozije i testiralo nuklearno oružje nisu prikladna za naseljavanje stanovništva, zbog kontaminacije zahvaćenog područja, o čemu svjedoče i posljedice nuklearne katastrofe u Černobilu 1986. godine (Slika 8.), te u japanskom gradu Fukushima 2011. godine. Černobilska nuklearna katastrofa rezultat je neispravne postojeće

konstrukcije reaktora u nuklearnoj elektrani u Černobilu (Ukrajina), i nedovoljnog stručnog znanja, poznavanja i razumijevanja tehničkih procedura koje su se izvodile na nuklearnom reaktoru, što je u konačnici dovelo do njegove eksplozije i ispuštanja ogromne količine radioaktivnih materijala u atmosferu. S druge strane, nesreću u nuklearnoj elektrani Fukushima Daiichi izazvao je razoran potres, za kojim je uslijedio tsunami visine 15 m, koji je uzrokovao pad sustava za opskrbu električnom energijom, čime se onemogućilo hlađenje triju reaktora koji su potom eksplodirali pod utjecajem visoke temperature i tlaka. U nesreći su zahvaćena četiri od ukupno šest reaktora. Doze ionizirajućeg zračenja kojem su stanovnici Fukushime bili izloženi su male, stoga nisu evidentirani smrtni slučajevi zbog posljedica nuklearne eksplozije, već zbog posljedica potresa i nastalog tsunamija. Zbog radioaktivne kontaminacije područja iseljeno je više od 100 tisuća stanovnika. [40]



**Slika 8.** *Izmjerene brzine doze na području Europe tjedan dana nakon Černobilske katastrofe; obojena područja pokazuju koliko je puta izmjerena brzina doze na određenim područjima veća od normalne vrijednosti [41]*

## 2.7. Dozimetrijske veličine

### 2.7.1. Zaštitne dozimetrijske veličine

#### 2.7.1.1. Apsorbirana doza

Apsorbirana doza  $D$  definirana je omjerom

$$D = \frac{d\bar{\epsilon}}{dm}, \quad (8)$$

gdje je  $d\bar{\epsilon}$  srednja vrijednost energije koju je apsorbirala tvar mase  $dm$ . Mjerna jedinica za apsorbiranu dozu je gray (Gy). Doza od 1 Gy jednaka je jedinici energije (joule) koju apsorbira 1 kg tvari ( $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J kg}^{-1}$ ). [42]

#### 2.7.1.2. Ekvivalentna doza

Jednake apsorbirane doze neće nužno značiti i da su biološki učinci zračenja na različita tkiva i organe izloženog organizma jednaki. Posljedice ovise i o vrsti zračenja. Tako će, primjerice, doza od 1 Gy alfa zračenja učiniti mnogo veću štetu izloženom tkivu nego 1 Gy beta zračenja. Stoga se svakoj vrsti zračenja pripisuje odgovarajući težinski faktor zračenja  $w_R$ , koji opisuje biološki učinak zračenja. Ekvivalentna doza  $H_T$ , za tkivo ili organ  $T$ , jednaka je produktu težinskog faktora zračenja  $w_R$ , za vrstu zračenja  $R$ , i apsorbirane doze za tkivo ili organ  $D_T$

$$H_T = w_R D_T. \quad (9)$$

Ukoliko je organ ozračen s više različitih vrsta zračenja, ekvivalentna doza je dana izrazom:

$$H_T = \sum w_R D_{T,R}. \quad (10)$$

Mjerna jedinica za ekvivalentnu dozu je joule po kilogramu ( $\text{J kg}^{-1}$ ) i ima poseban naziv – sievert (Sv). [4] [42] [43]

**Tablica 2. Težinski faktori zračenja**  
(Pravilnik o granicama ozračenja, NN 59/2013)

Vrsta zračenja	Težinski faktor zračenja $w_R$
Fotoni, svih energija	1
Elektroni, mioni, svih energija	1
Neutroni	
< 10 keV	5
10 keV – 100 keV	10
> 100 keV – 2 MeV	20
> 2 MeV – 20 MeV	10
> 20 MeV	5
Protoni, > 2 MeV	5
Alfa čestice, fisijski fragmenti, teške jezgre	20

### 2.7.1.3. Efektivna doza

Različita tkiva i organi nisu jednako osjetljivi na zračenje. Primjerice, koštana srž je mnogo osjetljivija na zračenje nego što su mišićna i živčana tkiva. Kako bi se uzele u obzir ove razlike, potrebno je uvesti tzv. težinski faktor tkiva, koji je karakteristika određenog tkiva ili organa. Efektivna doza  $E$  jednaka je sumi (po svim organima i tkivima  $T$ ) produkata ekvivalentne doze  $H_T$  i odgovarajućeg težinskog faktora tkiva  $w_T$

$$E = \sum_T w_T H_T. \quad (11)$$

Težinski faktor tkiva  $w_T$  je relativna mjera koja opisuje vjerojatnost pojave stohastičkih učinaka koji mogu nastati kao posljedica ozračivanja određenog tkiva, uzimajući u obzir njihovu osjetljivost na zračenje. Mjerna jedinica za efektivnu dozu je joule po kilogramu ( $J\ kg^{-1}$ ), odnosno sievert (Sv). [42] [44]

**Tablica 3.** Težinski faktori tkiva (Pravilnik o granicama ozračenja, NN 59/2013)

Tkivo/organ	Težinski faktor tkiva $w_T$
Gonade	0,20
Koštana srž (crvena), debelo crijevo, pluća, želudac	0,12
Mjehur, grudi, jednjak, jetra, štitnjača	0,05
Kosti (površinski dio), koža	0,01
* Ostala tkiva: nadbubrežne žlijezde, bubrezi, mišići, gušterača, tanko crijevo, slezena, maternica, mozak, timus	

### 2.7.2. Operativne dozimetrijske veličine

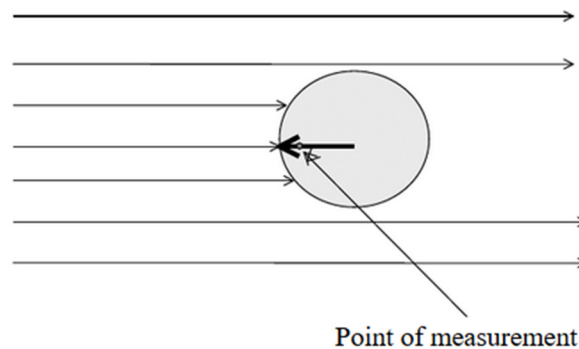
Apsorbirana doza za tkivo ili organ  $D_T$ , ekvivalentna doza  $H_T$  i efektivna doza  $E$  nisu izravno mjerljive veličine. Stoga ICRU (*International Commission on Radiation Units and Measurements*) uvodi sljedeće mjerljive operativne veličine u području zaštite od zračenja: ambijentalni dozni ekvivalent, dozni ekvivalent smjera i osobni dozni ekvivalent. [43]

Sievert nije jedinica za mjerljivu fizičku veličinu, iako se definira kao količina energije koju apsorbira 1 kg tvari. Zapravo se radi o ekvivalentnoj energiji koju izloženi organ apsorbira u ovisnosti o njegovom kancerogenom potencijalu, odnosno osjetljivosti tog organa na zračenje. Za razliku od sieverta, gray je jedinica za fizičku veličinu koja je mjerljiva. Između navedenih jedinica vrijedi odnos:  $1 \text{ Sv} = 1 \text{ Gy} \cdot Q$ , gdje je  $Q$  faktor kvalitete, odnosno konverzijski faktor koji ovisi o vrsti zračenja (energiji). U slučaju gama zračenja,  $Q = 1$ . [45]

Većina uređaja za monitoring je kalibrirana u terminima ICRU operativnih dozimetrijskih veličina (u Sv) u svrhu procjene radiološkog rizika. Međutim, problem je u tome što su te veličine definirane na računalnom modelu (fantomu), odnosno ICRU sferi koja se ne može dobro konstruirati u realnosti, pa se zapravo izračunati konverzijski faktori ne mogu eksperimentalno provjeriti.

### 2.7.2.1. Ambijentalni dozni ekvivalent

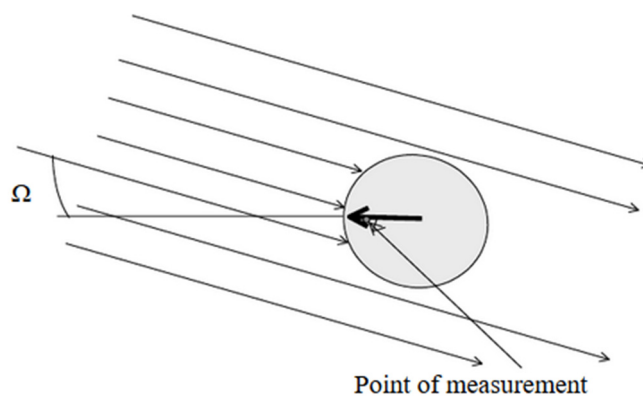
Ambijentalni dozni ekvivalent u točki radijacijskog polja  $H^*(d)$  definira se kao dozni ekvivalent koji bi proizvelo usmjereno i prošireno polje u ICRU sferi na dubini  $d$ , koja je definirana na radijvektoru suprotne orijentacije od vektora usmjerenog polja. ICRU sfera je sfera promjera 30 cm, načinjena od tkivno ekvivalentnog materijala gustoće  $1 \text{ g cm}^{-3}$ , u čijem je sastavu 76,2 % kisika, 11,1 % ugljika, 10,1 % vodika i 2,6 % dušika. Koristi se kao referentni fantom pri definiranju operativnih veličina. Kod vrlo prodornog zračenja uzima se dubina  $d = 10 \text{ mm}$ . Jedinica za ambijentalni dozni ekvivalent je sievert (Sv). [43] [46]



Slika 9. Definicija ambijentalnog doznog ekvivalenta [45]

### 2.7.2.2. Dozni ekvivalent smjera

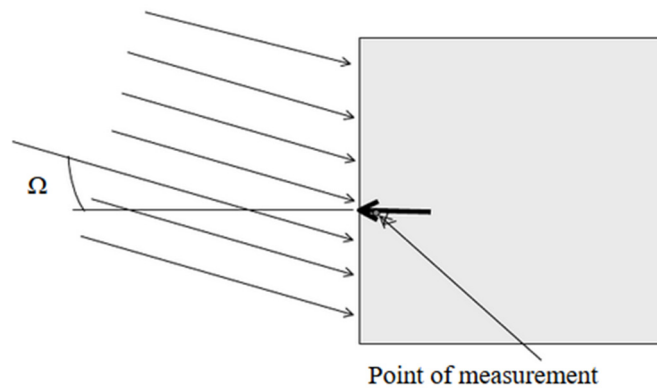
Dozni ekvivalent smjera u točki radijacijskog polja  $H'(d, \Omega)$  definira se kao dozni ekvivalent koji bi proizvelo usmjereno i prošireno polje u ICRU sferi na dubini  $d$ , koja je definirana na radijvektoru u određenom smjeru  $\Omega$ . Kut  $\Omega$  je kut između nadolazeće zrake i radijusa ICRU sfere na kojem je definirana dubina  $d$ . Za slabo prodorno zračenje uzima se dubina  $d = 0,07 \text{ mm}$ . Jedinica za dozni ekvivalent smjera je sievert (Sv).



Slika 10. Definicija doznog ekvivalenta smjera [45]

### 2.7.2.3. Osobni dozni ekvivalent

Osobni dozni ekvivalent  $H_p(d)$  definira se kao dozni ekvivalent za meko tkivo (ICRU 4-elementno tkivo), ispod određene točke na tijelu na odgovarajućoj dubini  $d$ . Za duboke organe uzima se dubina  $d = 10 \text{ mm}$ , dok se za površinske organe uzima dubina  $d = 0,07 \text{ mm}$  za kožu i  $d = 3 \text{ mm}$  za očnu leću. [43]



**Slika 11.** Definicija osobnog doznog ekvivalenta pomoću ICRU ploče, dimenzija  $30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$ , izrađene od polimetilmetakrilata (PMMA), ili tzv. pleksiglasa [63] [45]

## 2.8. Propisane granične vrijednosti primljene doze zračenja

Prema Zakonu o radiološkoj i nuklearnoj sigurnosti [47], izloženost pojedinca ionizirajućem zračenju mora biti ograničena, a primljena doza zračenja ne smije prijeći granice propisane Pravilnikom o granicama ozračenja [48]. Preporučene granice ozračenja u Pravilniku su navedene za pojedinog stanovnika i za izložene radnike, odnosno za osobe koje tijekom svog rada dolaze u izravan ili neizravan doticaj s izvorima ionizirajućeg zračenja. Pravilnikom su također utvrđene i granice ozračenja određenih ljudskih tkiva i organa.



**Tablica 4.** *Dozvoljene granice izlaganja u jednoj godini propisane Pravilnikom o granicama ozračenja (Pravilnik o granicama ozračenja, NN 59/2013)*

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

## 2.9. Mjere zaštite i sigurnosti

Glavni je cilj sigurnosnih mjera u polju zaštite od zračenja izbjeći nepotrebnu izloženost zračenju, odnosno dodatnu kontaminaciju radioaktivnim tvarima. »Provedbom mjera zaštite se izlaganje radnika i drugih osoba ionizirajućem zračenju od svih djelatnosti s izvorima ionizirajućeg zračenja, nuklearnih djelatnosti i svih izvora ionizirajućeg zračenja smanjuje toliko nisko koliko je razumno moguće unutar propisanih granica, uvažavajući tehničke, organizacijske, gospodarske, zdravstvene i socijalne čimbenike.« [47, čl. 4] Radi se o tzv. ALARA (*As Low As Reasonably Achievable*) principu. [47]

Tri su čimbenika koji utječu na primljenu dozu zračenja:

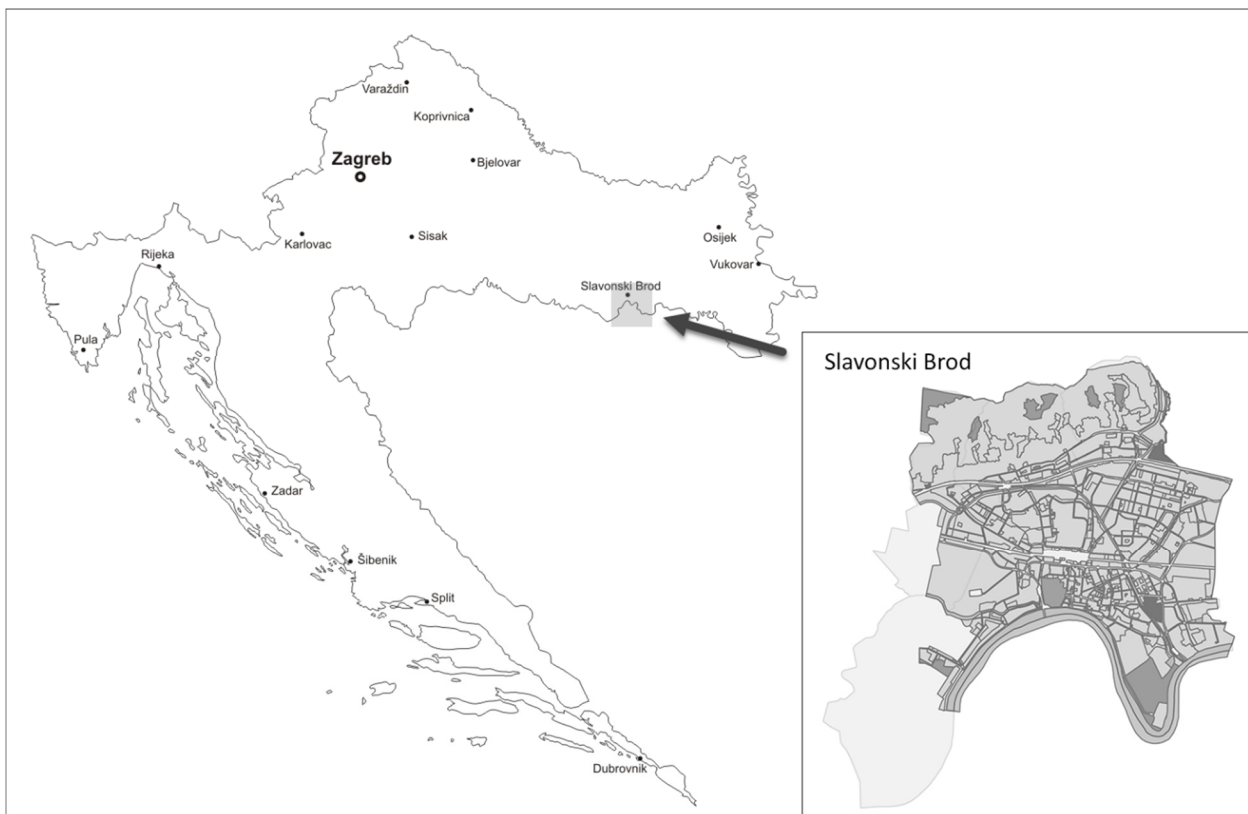
1. Udaljenost od izvora zračenja: Primljena doza zračenja je to manja što je veća udaljenost od izvora zračenja (intenzitet zračenja opada s kvadratom udaljenosti od izvora).

2. Vrijeme izloženosti: Što je manje vrijeme izloženosti zračenju, to je i primljena doza zračenja manja.
3. Štitovi: Prepreke od olova, betona ili vode pružaju zaštitu od prodornog gama i rendgenskog zračenja, stoga se određeni radioaktivni materijali skladište ispod vode ili u nepropusnim spremnicima (kontejnerima) izrađenim od betona ili olova. Postavljanje odgovarajućeg štita između osobe i izvora zračenja može znatno smanjiti primljenu dozu zračenja. [49]

Za osobe koje se bave otkrivanjem/pronalaskom radioaktivnih izvora ili uređaja, udaljenost i vrijeme su najefikasnije metode za kontrolu razine izloženosti ionizirajućem zračenju. Ukoliko se na nekom mjestu opazi nekontrolirani radioaktivni izvor ili uređaj, javnost se može zaštititi od zračenja kombinacijom prve dvije metode. U slučaju izvanrednog događaja, važno je odmah napustiti kontaminirano područje, te obavijestiti nadležna tijela kako bi se poduzele sve moguće mjere zaštite. [28]

### 3. Mjerenje brzine ambijentalnog doznog ekvivalenta $\dot{H}^*$ (10) u Slavonskom Brodu

Nekontroliranim ispuštanjem radionuklida u atmosferu, tlo i vodu iz različitih izvora može doći do povećanog ozračenja stanovništva i okoline, što će rezultirati štetnim posljedicama. Monitoring okoliša je, prema tome, neizostavan za procjenu ozračenosti i predviđanje mogućih posljedica na stanovništvo i okoliš, te kako bi se utvrdile mjere zaštite u slučaju izvanrednih događaja. To nas dovodi do aktualnog problema onečišćenja zraka u gradu Slavonskom Brodu zbog utjecaja rafinerije nafte u Bosanskom Brodu. Grad Slavonski Brod smješten je u istočnom dijelu Republike Hrvatske, na sjevernoj obali rijeke Save (granica s Bosnom i Hercegovinom), na 18° istočne zemljopisne dužine i 45° sjeverne zemljopisne širine, s površinom od oko 50 km<sup>2</sup>.



**Slika 12.** Slavonski Brod (karta i smještaj u Republici Hrvatskoj)

Sastoji se od tri naselja, koja čine: Slavonski Brod, Podvinje i Brodski Varoš. Mjerne postaje u Slavonskom Brodu nerijetko bilježe prekoračenja satnih graničnih vrijednosti koncentracija određenih plinova i lebdećih čestica u zraku, što predstavlja opasnost za zdravlje tamošnjeg stanovništva i stanje okoliša.

Prema »Izvješću o razinama onečišćenosti i ocjeni kvalitete zraka u Slavonskom Brodu za 2016. godinu« [50], kvaliteta zraka u Slavonskom Brodu pripada drugoj kategoriji (onečišćeni zrak), s prekoračenim graničnim vrijednostima za pojedine onečišćujuće tvari (odnosno tvari prisutne u okolnom zraku koje mogu imati štetan učinak na ljudsko zdravlje i/ili okoliš, a koje se mjere na postojećim mjernim postajama). Najveći broj prekoračenja graničnih vrijednosti za 2016. godinu je bio 160 puta, i to za sumporovodik.

Eksperimentalni dio ovog diplomskog rada sastojao se u mjerenju brzine ambijentalnog doznog ekvivalenta  $\dot{H}^*(10)$  na području grada Slavnskog Broda, u cilju procjene mogućeg ozračenja stanovništva i ispitivanja potencijalnih izvora ionizirajućeg zračenja, osobito na području uz rijeku Savu kako bi se ispitaio utjecaj rafinerije nafte u Bosanskom Brodu na ozračenje stanovništva Slavnskog Broda. U konačnici su dobivenim mjernim podacima pridruženi odgovarajući položajni i atributni podaci te je omogućen grafički prikaz unutar GIS aplikacije. Pod GIS (*Geographic Information System*) aplikacijama podrazumijevaju se alati za prikaz, analizu i obradu prostornih podataka, a koriste se i za postavljanje korisničkih upita na geoprostornu bazu.

### **3.1. Materijali i metode**

#### **3.1.1. Korišteni instrumenti i aplikacije**

Za prikupljanje mjernih podataka, te obradu i analizu rezultata mjerenja korišteni su sljedeći instrumenti i aplikacije:

1. Mjerni instrument RDS-31 S/R Multi-Purpose Survey Meter
2. Konfiguracijski softver CSW-31 za uređaj RDS-31
3. Quantum GIS (QGIS)
4. OruxMaps

Sve aplikacije za prikupljanje i obradu podataka korištene u ovom radu (Quantum GIS, OruxMaps) su tipa *OpenSource*, odnosno njihov sadržaj je besplatan, a izvorni programski kod javno dostupan i može se mijenjati i dalje distribuirati.



**Slika 13.** Mjerni uređaj RDS-31 (lijevo) i pripadna sonda GMP-12SD (desno)

### 3.1.1.1. RDS-31 S/R Multi-Purpose Survey Meter

RDS-31 je detektor gama i rendgenskog zračenja, koji koristi Geiger-Mullerovu cijev kao primarni detektor. Uz upotrebu odgovarajućih vanjskih sonda koristi se i za detekciju alfa i beta zračenja. Ima vrlo široko područje primjene, posebno u praćenju stanja radioaktivnosti u okolišu, te u industrijske, vojne, medicinske, laboratorijske i edukacijske svrhe. [51]

Glavni dijelovi RDS-31 su LCD zaslon s automatskim osvjetljenjem i dvije funkcijske tipke koje su smještene iznad zaslona. Svaka funkcijska tipka nosi određeni simbol, radi lakšeg razlikovanja. Tipka [⊕] je tipka za uključivanje i isključivanje uređaja, a tipka [E] je tipka izbornika. Duljina trajanja pritiska na tipku ima određeno značenje i presudna je za ostvarivanje željene akcije. S donje strane uređaja nalazi se priključak za vanjski detektor (sondu), koji također služi i za povezivanje uređaja s računalom. Funkcija histogram (**HISTO**) je izuzetno značajna jer se koristi za pohranu izmjerenih vrijednosti doze i brzine doze u memoriju uređaja, koje kasnije možemo preuzeti u XML formatu na računalo koristeći konfiguracijski softver CSW-31.

Kako bi se proširile mogućnosti i povećala preciznost ovog multifunkcionalnog uređaja, koriste se priključne sonde. Primjer je GMP-12SD (Slika 13.), vanjska sonda namijenjena za detekciju gama i rendgenskog zračenja. Sastoji se od aluminijskog kućišta valjkastog oblika, promjera 35 mm, unutar kojeg je smješten detektor (silicijeva PIN dioda). Upotrebljava se za mjerenje brzine ambijentalnog doznog ekvivalenta  $H^*(10)$ , u rasponu od 10  $\mu\text{Sv/h}$  do 10 Sv/h. [52]

RDS-31 može iskazati rezultat u sljedećim mjernim jedinicama: Sv(/h), R(/h), a uz priključivanje vanjske sonde i u jedinicama: Gy(/h), cps (*counts per second*), cpm (*counts per minute*), dpm (*disintegrations per minute*) i Bq. [51]

#### **3.1.1.2. CSW-31 Configuration Software for RDS-31**

CSW-31 je konfiguracijski softver za RDS-31. Omogućava komunikaciju između računala i mjernog uređaja. Unutar ovog softvera mogu se mijenjati postavke u konfiguraciji i kalibraciji uređaja, definirati određene funkcije, postavljati prečaci i alarmi, izvoziti mjerni podaci iz histograma i drugo. Komunikacija s uređajem uspostavlja se putem RF ili USB komunikacijske veze.

#### **3.1.1.3. Quantum GIS**

QuantumGIS (QGIS), ili tzv. QGIS, je *OpenSource* geografski informacijski sustav, koji se koristi za stvaranje, uređivanje i upravljanje geoprostornim podacima, kako u profesionalne, tako i u akademske svrhe. Projekt je nastao 2002. godine, a njegov primarni cilj je bio omogućiti korisnicima besplatni GIS preglednik podataka. Objavljen je pod GNU-ovom Općom Javnom Licencom, danas najpoznatijom licencom za *OpenSource* softver, koja omogućava zakonito mijenjanje i distribuiranje slobodnih programa. QGIS je namijenjen za Linux, Unix, Mac OSX i Windows operacijske sustave. Podržava vektorske i rasterske formate te različite formate baza podataka. QGIS je svoje razvojno sučelje otvorio svim razvijateljima softvera (*engl. developers*), u smislu izrade različitih dodataka (*engl. plugins*), koji su korišteni i u ovom radu za dobivanje grafičkog prikaza mjernih točaka s pripadnim podacima. [53]

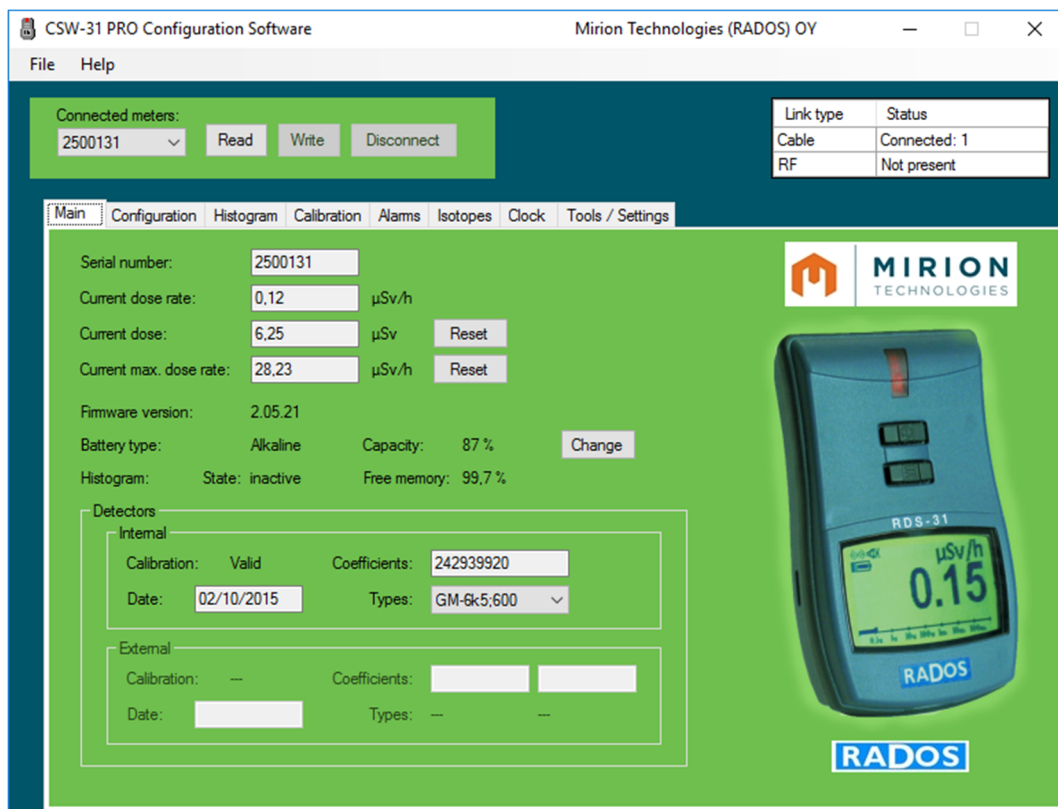
#### **3.1.1.4. OruxMaps**

OruxMaps je besplatna i jednostavna GPS aplikacija za Android mobilne uređaje, koja se koristi za *online* i *offline* navigaciju, snimanje tragova, bilježenje interesnih točaka s dodatnim informacijama (kao što je npr. nadmorska visina, GPS koordinate, vrijeme itd.) i u brojne druge svrhe. OruxMaps omogućava unos i pohranu gotovih karata i ruta, prethodno napravljenih u nekoj drugoj mobilnoj aplikaciji ili programu na računalu. Ima osnovnu podršku i za WMS *online* servise, ali samo u određenim koordinatnim sustavima. (WMS (*Web Map Service*) je javno

dostupna georeferencirana karta, objavljena na poslužitelju kao web servis.) Aplikaciju OruxMaps koristili smo za bilježenje mjernih točaka i njihovih GPS koordinata.

### 3.1.2. Priprema instrumenta RDS-31

Za početak je na računalo potrebno instalirati pripadni konfiguracijski softver CSW-31. Zatim pomoću USB konektora spojimo uređaj RDS-31 na računalo. Pokrenemo CSW-31, uključimo uređaj i pričekamo da program prepozna i ispiše osnovne informacije o uređaju na kartici **Main** (kao što je primjerice serijski broj uređaja, trenutna i maksimalna vrijednost brzine doze, kapacitet baterije itd.). Kada je uspostavljena komunikacijska veza između uređaja i konfiguracijskog softvera, u tablici **Link type-Status** za status veze će pisati **Connected: 1** (Slika 14.).

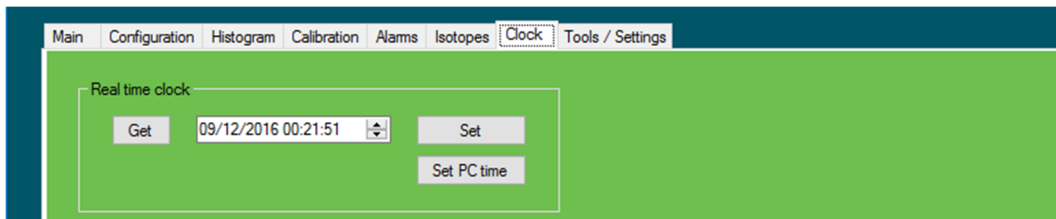


Slika 14. Kartica *Main*

Uređaj nije bilo potrebno kalibrirati, jer je tvornički kalibriran.

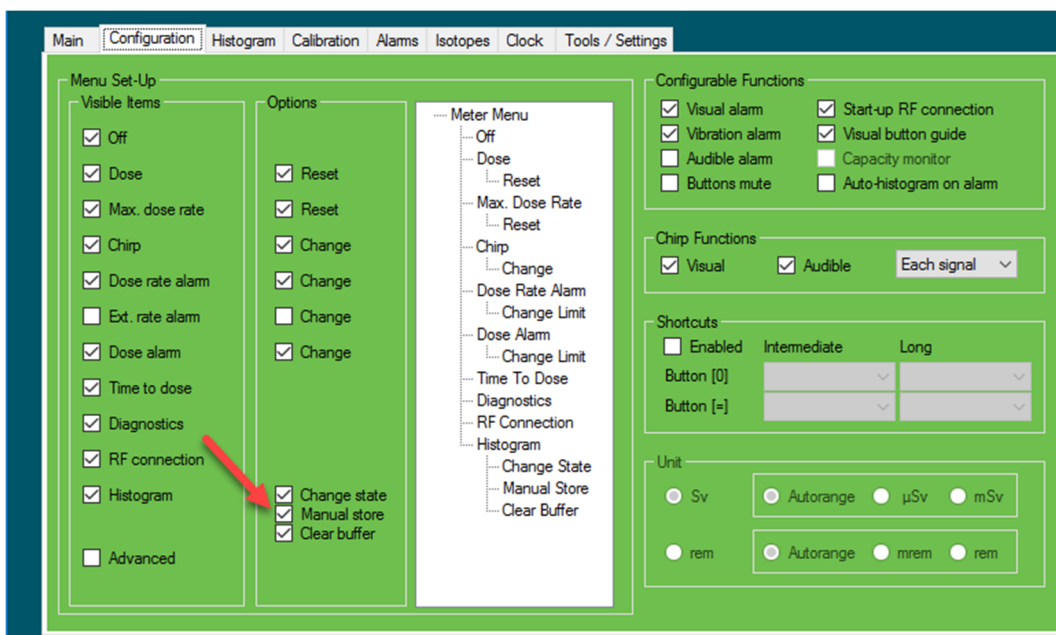
Na kartici **Clock** postavljamo sistemski sat uređaja (Slika 15.). Podatak o trenutnom datumu/vremenu možemo preuzeti od računala klikom na gumb **Set PC time**, ili ga možemo ručno postaviti klikom na gumb **Set**. Sistemski sat uređaja može izgubiti podatak o trenutnom

datumu/vremenu, ukoliko uklonimo baterije iz uređaja na vremenski period dulji od jedne minute. Stoga je svakako bitno provjeriti je li sistemski sat uređaja usklađen s trenutnim datumom/vremenom, što možemo učiniti klikom na gumb **Get**.



**Slika 15. Kartica Clock**

Na kartici **Configuration** (Slika 16.) možemo odabrati opcije za koje želimo da nam budu vidljive i dostupne u izborniku uređaja. Za svrhu ovog rada bilo je potrebno uključiti opciju **Manual store** za histogram, kako bi mogli ručno pohraniti podatke o mjerenju u proizvoljnom trenutku.

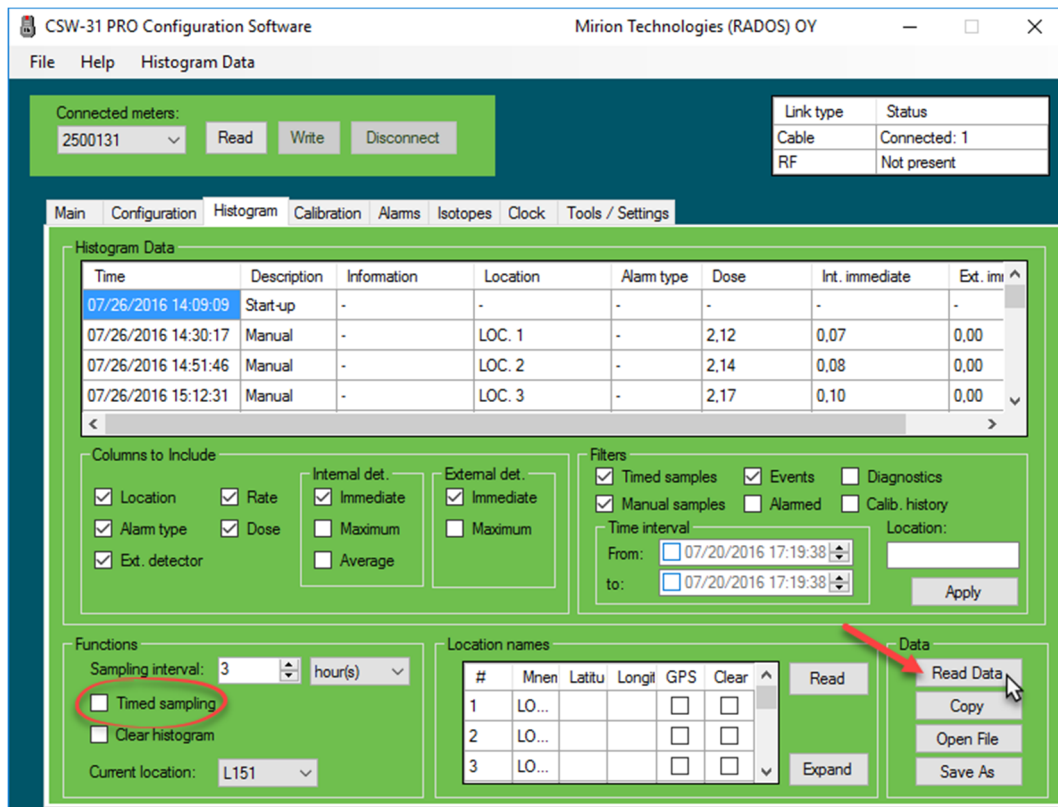


**Slika 16. Kartica Configuration**

Kartica **Histogram** (Slika 17.) je iznimno bitna, jer nam omogućuje da dobijemo pogled na dobivene podatke mjerenja s uređaja, klikom na gumb **Read Data**. Također, ovdje možemo specificirati koje točno podatke, odnosno parametre želimo uključiti u naša mjerenja, što će nam se odabirom prikazati u našem histogramu. Uz to, postoji i mogućnost filtriranja dobivenih podataka iz histograma. Ovdje korisnik može postaviti i tzv. vrijeme uzorkovanja (**Sampling interval**), što je izuzetno korisno ukoliko se mjerenje izvodi na jednoj lokaciji, nakon kojeg će uređaj sam zabilježiti podatke u memoriju histograma. Uređaj također ima mogućnost i bilježenja



lokacije na kojoj se izvodilo mjerenje, ali samo uz neke specifične oznake (primjerice lokacija LOC.1). Lokacije izvođenja mjerenja su u ovom slučaju različite, pa je bilo potrebno isključiti opciju **Timed sampling**, odnosno konfigurirati uređaj na ručno pohranjivanje podataka (**Manual store**).



Slika 17. Kartica *Histogram*

### 3.1.3. Prikupljanje i priprema uzoraka

Postupak prikupljanja podataka obuhvaća praćenje vrijednosti za brzinu ambijentalnog doznog ekvivalenta  $\dot{H}^*(10)$  i bilježenje istih pomoću mjernog uređaja RDS-31, na 150 lokacija na otvorenom prostoru u gradu Slavenskom Brodu.

Kako bi se prikupljanje mjernih podataka ograničilo samo na područje grada Slavenskog Broda, na kartu s Geoportala DGU u programu OruxMaps dodan je KML sloj s istaknutim granicama grada. (KML (*Keyhole Markup Language*) je format datoteke koji se koristi za prikaz geografskih podataka u zemaljskim preglednicima, kao što je primjerice Google Earth.) Dokument s geoprostornim podacima o vanjskim granicama grada je prethodno dobiven na zahtjev od Zavoda za prostorno uređenje Brodsko-posavske županije.

Prije početka izvođenja mjerenja bilo je potrebno definirati i privremene mjerne točke po kojima se valjalo voditi, jer bi vlastito određivanje mjernih lokacija, zbog njihovog velikog broja, najvjerojatnije dovelo do nejednolike raspodjele točaka. Stoga je u programu QuantumGIS napravljena jednolika raspodjela mjernih točaka unutar granica grada, pomoću alata koji je matematičkim putem jednoliko rasporedio točke unutar poligona koji sadrži geoprostorne podatke o granicama grada. Potom su na realnim mjernim točkama izvršene potrebne korekcije.

Tijekom izvođenja mjerenja uzeti su u obzir sljedeći faktori:

- geografski podaci o lokacijama mjerenja
- datum i vrijeme izvođenja mjerenja
- vremenski interval uzorkovanja
- metode provođenja mjerenja
- meteorološki podaci za period izvođenja mjerenja
- poznavanje razine pozadinskog zračenja na ispitivanom području.

Uređaj je postavljen na svaku lokaciju na okvirno vrijeme od 15 minuta (što se smatra optimalnim vremenom da bi uređaj uspio prikupiti potrebne podatke i da bi se ustabilio rezultat), na visinu od 1 m iznad neobrađene travnate površine, u skladu s Pravilnikom o praćenju stanja radioaktivnosti u okolišu. [54] Uređajem su praćene i bilježene vrijednosti  $\dot{H}^*(10)$ , izražene u nSv/h, tijekom srpnja i kolovoza 2016. godine. Pomoću aplikacije OruxMaps bilježene su mjerne točke, kojima su zatim redom pridružene brojčane oznake i pripadne GPS koordinate. Preostali bitni parametri, kao što su meteorološki podaci za period izvođenja mjerenja, su naknadno, na zahtjev, dobiveni od Državnog hidrometeorološkog zavoda (DHMZ). Mjerenja su provedena tijekom dana s podjednakim meteorološkim uvjetima, kako bi anomalije u rezultatima zbog utjecaja vremenskih prilika bile minimizirane.

#### ❖ Uzorkovanje vode i tla

Provedeno je uzorkovanje i analiza savske vode na području Slavonskog Broda, u svrhu ispitivanja radioaktivnih supstanci u njezinu sastavu. Prikupljeni uzorci su uzorkovani prema standardnim procedurama Međunarodne agencije za atomsku energiju (IAEA). Uzorci vode su

volumena 50 L, koji se uparava na volumen 1 L i mjeri se u nepropusnim plastičnim Marinelli posudama volumena 1 L. [55] [56]

Tlo je uzorkovano na četiri lokacije na području Slavenskog Broda. Uzorkovanje tla provedeno je na sljedeći način: na površini od 1 m<sup>2</sup> uzeto je 10 uzoraka bušačem od promjera 10 cm do dubine 10 cm. Prikupljeni uzorak raširen je na odgovarajuću površinu te se ostavio sušiti na sobnoj temperaturi nekoliko dana. Nakon sušenja, uzorak tla je prosijan na čestice veličine 2 mm, a potom se prosijani dio uzoraka dva do tri dana sušio u sušioniku do konstantne mase na 105 °C i homogenizirao. Osušenom uzorku zemlje je određena masa, te su potom uzorci spaljivani na temperaturi od 450 °C, nakon čega se dobiveni uzorak pakirao u odgovarajuću geometriju mjerenja i ostavio na čekanje do postizanja ravnoteže radionuklida. [55] [56]

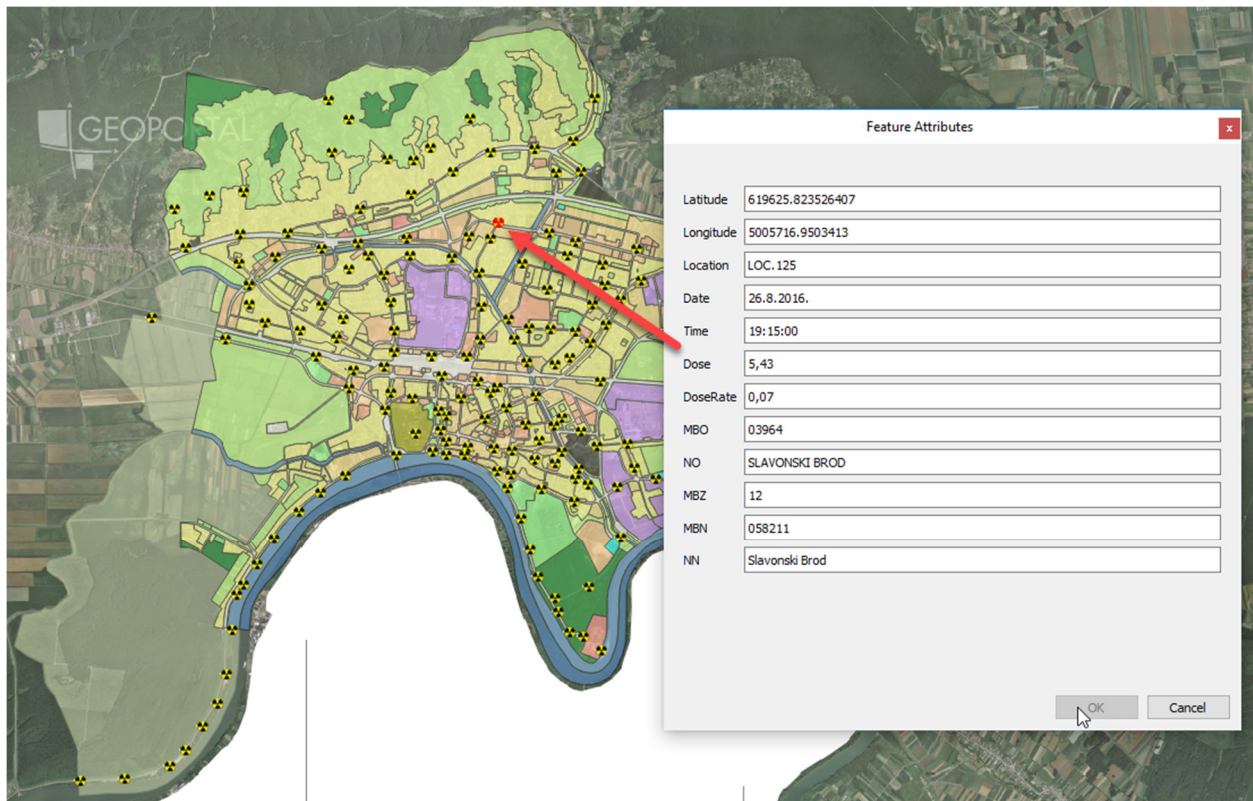
Za analizu uzoraka tla korišten je gamaspektrometrijski sustav temeljen na High-Purity Germanium Coaxial Photon Detector System ORTEC HPGe detektoru (FWHM 2,24 keV na 1,33 MeV <sup>60</sup>Co i s relativnom efikasnosti od 74,2 % na 1,33 MeV), spojen s višekanalnim analizatorom. [57] Detektor je zaštićen sa slojem olova 10 cm debljine, i unutrašnjom stijenkom od bakra debljine 2 mm, te folije kadmija debljine 2 mm. Kalibracija energije i efikasnosti gama spektrometra je provedena koristeći kalibracijske izvore s Češkog mjeriteljskog instituta koji pokrivaju energijski raspon od 40 do 2000 keV.

#### **3.1.4. Obrada rezultata**

Nakon završetka mjerenja, prikupljeni mjerni podaci objedinjeni su i uneseni u program Quantum GIS radi njihove daljnje obrade. Ovdje su mjerenja pridružena svojim lokacijama i prikazana su grafički u projekcijskom referentnom sustavu HTRS96/TM (Slika 18.), koji je zasnovan na »preslikavanju elipsoida GRS80 (*Geodetic Reference System 1980*) u ravninu projekcije po zakonitostima poprečne Mercatorove projekcije«. HTRS96 je skraćenica za Hrvatski Terestrički Referentni Sustav za epohu 1995.55. Za mjerila 1:250 000 i krupnija koristi se projekcijski koordinatni sustav poprečne Mercatorove (Gauss-Krügerove) projekcije TMP (*Transverse Mercator Projection*), odnosno tzv. HTRS96/TM. [58] [59]

Pridruživanjem mjernih podataka georeferenciranim točkama stvorena je geoprostorna baza podataka, koja sadrži geometrijske podatke o svakoj pojedinoj lokaciji mjerenja i opisne (atributivne) podatke, koji su prikazuju u tablici. Dakle, vezanjem na točku lokaliteta, svi atributi koji su pridruženi mjernoj točki postali su geoprostorni podaci. Pridruživanjem dodatnih atributa

iz prostorno planske dokumentacije grada Slavenskog Broda, mjerna mjesta s postojećim mjernim atributima dobila su nove sadržajne tribute iz prostora svog lokaliteta (određena točka je dobila svoj atributni podatak iz prostora – definirano je područje u kojem se ona nalazi prema prostorno planskoj dokumentaciji). Kao što su i ovi podaci pridruženi mjerenjima, tako se mogu pridružiti i ostali podaci iz nekih drugih izvora. Po unosu svih relevantnih podataka u QGIS otvara se mogućnost rada s istim podacima, u smislu kreiranja različitih upita i izvođenja analiza za različite potrebe znanstvenih ispitivanja.



**Slika 18.** Prikaz atributnih podataka za određenu točku unutar programa QGIS

### 3.1.5. Analiza i rasprava dobivenih rezultata

Izravnim mjerenjima dobivena je prosječna vrijednost za brzinu ambijentalnog doznog ekvivalenta

$$\dot{H}^*(10) = (80,0 \pm 15,5) \text{ nSv/h.} \quad (12)$$

Kako bismo ispitali potencijalni utjecaj rafinerije nafte na ozračenje stanovništva Slavenskog Broda, morali smo odrediti koliki je doprinos brzini ambijentalnog doznog ekvivalenta

od zraka, vode i tla. Gamasppektrometrijskom metodom određene su koncentracije aktivnosti radionuklida od interesa u tlu. Rezultati su dani u Tablici 5.

**Tablica 5.** *Izmjerene koncentracije aktivnosti radionuklida od interesa za četiri lokacije uzorkovanja tla*

Oznaka lokacije	<sup>40</sup> K (Bq kg <sup>-1</sup> )	<sup>137</sup> Cs (Bq kg <sup>-1</sup> )	<sup>232</sup> Th (Bq kg <sup>-1</sup> )	<sup>238</sup> U (Bq kg <sup>-1</sup> )	<sup>226</sup> Ra (Bq kg <sup>-1</sup> )	<sup>210</sup> Pb (Bq kg <sup>-1</sup> )
1	431,27	0,31	42,76	46,14	36,51	18,45
2	458,25	7,58	41,11	49,04	45,94	78,30
3	473,81	2,37	37,16	24,42	35,25	44,53
4	450,75	2,55	34,63	32,76	37,30	32,10

Uzorkovanjem rijeke Save, otkrili smo prisutnost samo dva radionuklida: <sup>40</sup>K i <sup>137</sup>Cs, dok su koncentracije ostalih radionuklida od interesa bile ispod granice detekcije. Iz toga proizlazi da je doprinos  $\dot{H}^*(10)$  od vode gotovo neznan.

Kako bismo procijenili radiološki rizik za ljude i okoliš zbog radionuklida prisutnih u tlu, izračunali smo vanjski indeks rizika i ekvivalentnu aktivnost radija. Vanjski indeks rizika  $H_{ex}$  se može izračunati iz sljedećeg izraza [60]:

$$H_{ex} = \frac{A(^{226}\text{Ra})}{370} + \frac{A(^{232}\text{Th})}{259} + \frac{A(^{40}\text{K})}{4810} \leq 1, \quad (13)$$

gdje su  $A(^{226}\text{Ra})$ ,  $A(^{232}\text{Th})$  i  $A(^{40}\text{K})$  koncentracije aktivnosti <sup>226</sup>Ra, <sup>232</sup>Th i <sup>40</sup>K, izražene u Bq/kg. Ukoliko vanjski indeks rizika ima vrijednost veću od 1, vanjska doza ozračenja izloženog pojedinca prelazi preporučenu graničnu vrijednost, i potrebno je poduzeti određene mjere. U ovom slučaju, dobiveni vanjski indeks rizika za sve analizirane uzorke je manji od 1 (Tablica 6.). Potom je izračunata ekvivalentna aktivnost radija  $Ra_{eq}$ , pomoću izraza [60]:

$$Ra_{eq} = A(^{226}\text{Ra}) + 1,43 \cdot A(^{232}\text{Th}) + 0,077 \cdot A(^{40}\text{K}), \quad (14)$$

gdje su  $A(^{226}\text{Ra})$ ,  $A(^{232}\text{Th})$  i  $A(^{40}\text{K})$ , kao i prije, koncentracije aktivnosti <sup>226</sup>Ra, <sup>232</sup>Th i <sup>40</sup>K, izražene u Bq/kg. Ekvivalentna aktivnost radija u analiziranim uzorcima tla imala je vrijednost manju od 370 Bq/kg, koja se uzima kao granična vrijednost.

Uvrštavanjem izmjerenih vrijednosti koncentracija aktivnosti prirodnih radionuklida u tlu, brzina doze se može izračunati iz sljedećeg izraza [23]:

$$\dot{D} = 0,0417 \cdot A(^{40}\text{K}) + 0,462 \cdot A(^{238}\text{U}) + 0,604 \cdot A(^{232}\text{Th}), \quad (15)$$

gdje su  $A(^{40}\text{K})$ ,  $A(^{238}\text{U})$  i  $A(^{232}\text{Th})$  koncentracije aktivnosti  $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$  i  $^{232}\text{Th}$ , izražene u Bq/kg. Brzina energijskih polja gama zraka po jedinici mase, na visini od 1 m iznad tla, zbog utjecaja prirodnih radionuklida u tlu dana je sa:

$$\dot{E} = x_K A(^{40}\text{K}) + x_U A(^{238}\text{U}) + x_{Th} A(^{232}\text{Th}), \quad (16)$$

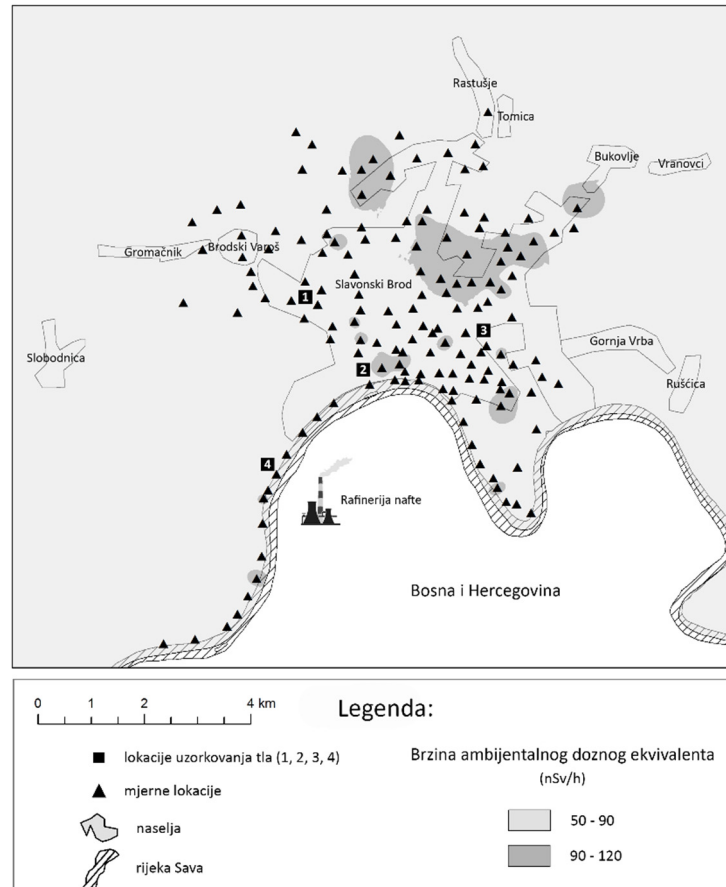
gdje je  $\dot{E}$  izražen u  $\text{J kg}^{-1}\text{h}^{-1}$ . Ako je  $\dot{E} = \dot{D}$ , onda je  $x_K = 0,0417$ ,  $x_U = 0,463$  i  $x_{Th} = 0,604$ , te ako je  $\dot{E} = \dot{H}^*(10)$ , onda imamo  $x_K = 0,0512$ ,  $x_U = 0,564$  i  $x_{Th} = 0,749$ . Dobiveni rezultati za  $\dot{D}$  i  $\dot{H}^*(10)$  prikazani su u Tablici 6. Možemo uočiti da su ovi rezultati u skladu s prosječnom vrijednosti  $\dot{H}^*(10)$  koju smo dobili izravnim mjerenjima ( $80,0 \pm 15,5$  nSv/h). Iz navedenog slijedi da gotovo sav doprinos brzini ambijentalnog doznog ekvivalenta dolazi od prirodno prisutnih radionuklida u tlu, odnosno doprinos od zraka je vrlo malen. [61] [23] [62]

**Tablica 6.** Dobivene vrijednosti za  $\dot{D}$ ,  $\dot{H}^*(10)$ ,  $Ra_{eq}$  i  $H_{ex}$  za četiri lokacije uzorkovanja tla, izračunate iz izmjerenih koncentracija aktivnosti radionuklida od interesa

Oznaka lokacije	$\dot{D}$ (nGy h <sup>-1</sup> )	$\dot{H}^*(10)$ (nSv h <sup>-1</sup> )	$Ra_{eq}$ (Bq kg <sup>-1</sup> )	$H_{ex}$
1	65,17	80,13	130,86	0,35
2	66,64	81,91	140,01	0,38
3	53,51	65,86	124,88	0,34
4	54,88	67,49	121,53	0,33

Dobivene vrijednosti brzine ambijentalnog doznog ekvivalenta u Slavonskom Brodu su u okviru prosječnih vrijednosti za Republiku Hrvatsku (Slika 19.). Na području uz rijeku Savu maksimalna izmjerena vrijednost iznosi 110 nSv/h. Povišene vrijednosti, u odnosu na srednju vrijednost u Slavonskom Brodu, uočene su i na urbanom području centra grada, također u iznosu od 110 nSv/h.

Također su uočene i manje razlike u rezultatima između pojedinih mjernih točaka. Uzroci nastalih odstupanja mogu biti promjenjivi vremenski uvjeti (oborine, vjetar). Primjerice, uz kišu će radioaktivni materijal koji se nalazi u zraku dospjeti na zemlju, te će na taj način doći do promjene u intenzitetu ili u koncentraciji radionuklida u zraku u prilično kratkom vremenu. Isto tako, vjetar nosi čestice radioaktivnog zračenja pa, ovisno o njegovoj brzini i smjeru, može doći do smanjenja ili povećanja koncentracije radionuklida u zraku. Dobivena odstupanja na nekim mjestima mogu biti i rezultat očekivanog povećanog zračenja zbog utjecaja prirodnih radionuklida.



Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Odjel za fiziku, veljača 2017.

**Slika 19.** Karta Slavonskog Broda s lokacijama mjerenja

Kako bi utvrdili jesu li dobivene povišene vrijednosti povezane s ispuštanjem dimnih čestica i plinova iz rafinerije Brod, izvršena su ponovna mjerenja na sedam lokacija. Rezultati ponovljenih mjerenja su jednaki ili za oko 15 % manji od prvotnih mjerenja.

Sukladno dobivenim rezultatima, možemo zaključiti da neposredna blizina rafinerije vjerojatno nije uzrok povišenih vrijednosti za ambijentalnu brzinu doze na području uz rijeku Savu i u centru grada. Međutim, to ne možemo potvrditi sa sigurnošću, zbog nedostatka podataka o samom izvoru, a u obzir je potrebno uključiti i znatno veći broj čimbenika. Zaključujemo da nema vanjskih radioaktivnih kontaminanata, te da su rezultati varijacije osnovnog zračenja.

## 4. Zaključak

Svakodnevna izloženost prirodnom pozadinskom zračenju rezultat je doprinosa od kozmičkih i većinskim dijelom terestrijalnih izvora, što pak ovisi o geološkoj građi samog područja. Uz to, trebamo uzeti u obzir i umjetne izvore zračenja nastale utjecajem ljudskih aktivnosti, koji dodatno kontaminiraju okoliš.

Možemo reći da su učinci kontaminacije na živi organizam danas više-manje poznati. Time je i opravdan strah od rizika stanovništva koje je naseljeno (i stoga svakodnevno izloženo) u blizini nuklearnih postrojenja, ili pak drugih industrijskih postrojenja koji su izvori kontaminacije okoliša. Konkretno u ovom slučaju, fokus je bio usmjeren na rafineriju nafte Brod koja je trenutno primarni izvor onečišćenja zraka u Slavonskom Brodu. Međutim, rezultati mjerenja  $\dot{H}^*(10)$  pokazuju da ista vjerojatno nije uzrok povišenih vrijednosti (u odnosu na dobivenu prosječnu vrijednost)  $\dot{H}^*(10)$  na području uz rijeku Savu, odnosno drugim riječima: većinski doprinos  $\dot{H}^*(10)$  na tom području dolazi od radionuklida koji su prirodno prisutni u tlu, dok doprinos od zraka gotovo da možemo zanemariti, s obzirom na rezultate dobivene uzorkovanjem vode i tla. Ipak, kako bismo ovo mogli potvrditi sa sigurnošću, morali bismo provoditi ova mjerenja kroz znatno dulji vremenski period, te pritom razmotriti i uzeti u obzir i druge čimbenike koji mogu utjecati na dobivene rezultate.



## Literatura

- [1] International Atomic Energy Agency (IAEA). *Environmental and Source Monitoring for Purposes of Radiation Protection*. IAEA, Vienna, 2005.
- [2] [http://www.srh.noaa.gov/jetstream/remote/remote\\_intro.html](http://www.srh.noaa.gov/jetstream/remote/remote_intro.html) (05.11.2016.)
- [3] <http://www.cyberphysics.co.uk/topics/light/emspect.htm> (05.11.2016.)
- [4] Canadian Nuclear Safety Commission (CNSC). *Introduction to Radiation*. CNSC, 2012.
- [5] International Atomic Energy Agency (IAEA). *The Safe Use of Radiation Sources*. Vienna, 1995.
- [6] [http://www.nuclear-power.net/wp-content/uploads/2014/12/nuclide\\_chart.jpg?ee9de4](http://www.nuclear-power.net/wp-content/uploads/2014/12/nuclide_chart.jpg?ee9de4) (05.11.2016.)
- [7] [https://upload.wikimedia.org/wikibooks/en/7/73/Fhsst\\_atomnucl3.png](https://upload.wikimedia.org/wikibooks/en/7/73/Fhsst_atomnucl3.png) (05.11.2016.)
- [8] International Atomic Energy Agency (IAEA). *Nuclear Medicine Physics: A Handbook for Teachers and Students*. 2014.
- [9] <http://struna.ihjj.hr/naziv/neutronska-uhvat/20837/> (07.11.2016.)
- [10] <http://www.nuclear-power.net/nuclear-power/reactor-physics/atomic-nuclear-physics/> (09.11.2016.)
- [11] United States Environmental Protection Agency, *Ionizing Radiation*. 2007.
- [12] Environmental Science Division (EVS) of Argonne National Laboratory. *Radiological and Chemical Fact Sheets to Support Health Risk Analyses for Contaminated Areas*. 2007.
- [13] [http://www.radioactivity.eu.com/site/pages/Potassium\\_40.htm](http://www.radioactivity.eu.com/site/pages/Potassium_40.htm) (09.05.2017.)
- [14] <https://webwiser.nlm.nih.gov//getSubstanceData.do?substanceId=411&displaySubstanceName=Cesium%20Radioactive&STCCID=&UNNAID=&selectedDataMenuItemID=44> (09.05.2017.)
- [15] <https://emergency.cdc.gov/radiation/isotopes/iodine.asp> (16.05.2017.)
- [16] National Toxicology Program. *Report on Carcinogens*. U.S. Department of Health and Human Services. 2016.
- [17] MIT Department of Physics. *X-Ray Physics*. Cambridge, 2014.
- [18] <http://hjp.znanje.hr/index.php?show=search> (07.11.2016.)

- [19] International Atomic Energy Agency (IAEA). *Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards*. 2014.
- [20] National Aeronautics and Space Administration (NASA). *The Cosmic Ray Telescope for the Effects of Radiation*. 2011.
- [21] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). *Sources and Effects of Ionizing Radiation*. 2008.
- [22] World Health Organization (WHO). *Radon and health*. 2016.
- [23] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). *Sources and effects of ionizing radiation*. United Nations, New York, 2000.
- [24] International Atomic Energy Agency (IAEA). *Radiation, People and the Environment*.
- [25] <http://radfys.gu.se/eng/radiation-safety> (09.11.2016.)
- [26] <https://www.iaea.org/topics/environment> (12.11.2016.)
- [27] <https://www.healthcare.siemens.com/molecular-imaging/spect-and-spect-ct/symbia-e> (15.11.2016.)
- [28] International Atomic Energy Agency (IAEA). *Identification of Radioactive Sources and Devices*. 2007.
- [29] U.S. Nuclear Regulatory Commission. *Natural and Man-Made Radiation Sources*.
- [30] Državni zavod za radiološku i nuklearnu sigurnost (DZRNS). *Pravilnik o uvjetima i mjerama zaštite od ionizirajućih zračenja za obavljanje djelatnosti s električnim uređajima koji proizvode ionizirajuće zračenje*. Narodne novine, Zagreb, 2013.
- [31] European Directorate for the Quality of Medicines & HealthCare. *Guide to the preparation, use and quality assurance of blood components*. European Directorate for the Quality of Medicines & HealthCare, 2015.
- [32] Grgičević D., Vuk T. *Imunohematologija i transfuzijska medicina*. Medicinska naklada, Zagreb, 2000.
- [33] <http://www.radiationanswers.org/radiation-sources-uses/industrial-uses/industrial-radiography.html> (16.11.2016.)
- [34] <http://www.radiationanswers.org/radiation-sources-uses/industrial-uses/gauging-devices.html> (16.11.2016.)
- [35] <http://www.world-nuclear.org/information-library/non-power-nuclear-applications/radioisotopes-research/smoke-detectors-and-americiium.aspx> (17.11.2016.)
- [36] <http://www.nrc.gov/about-nrc/radiation/around-us/uses-radiation.html> (19.11.2016.)

- [37] <http://www.nei.org/Knowledge-Center/Other-Nuclear-Energy-Applications/Space-Exploration> (15.11.2016).
- [38] <http://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-wastes/radioactive-waste-management.aspx> (20.11.2016.)
- [39] Hrvatsko nuklearno društvo (HND). *Nuklearne zanimljivosti*. Hrvatsko nuklearno društvo & Nuklearna elektrana Krško, 2014.
- [40] <http://nuklearno-drustvo.hr/naslovnica/161-info/236-fukushima-dvije-godine-poslije-who-procjena-rizika.html> (09.05.2017.)
- [41] <http://chernobylgallery.com/chernobyl-disaster/what-is-chernobyl/> (21.11.2016.)
- [42] International Atomic Energy Agency (IAEA). *Dosimetry in Diagnostic Radiology: An International Code of Practice*. 2007.
- [43] International Atomic Energy Agency (IAEA). *Radiation Oncology Physics: A Handbook for Teachers and Students*. 2005.
- [44] <https://radiopaedia.org/articles/tissue-weighting-factor> (05.01.2017.)
- [45] Alvarez, J. L. *Measurement of External Effective Dose*. Jacksonville, 2001.
- [46] <https://www.iaea.org/ns/tutorials/regcontrol/intro/glossaryi.htm> (08.01.2017.)
- [47] Hrvatski sabor. *Zakon o radiološkoj i nuklearnoj sigurnosti*. Narodne novine, Zagreb, 2013.
- [48] Državni zavod za radiološku i nuklearnu sigurnost (DZRNS). *Pravilnik o granicama ozračenja*. Narodne novine, Zagreb, 2013.
- [49] <https://www.epa.gov/radiation/protecting-yourself-radiation> (22.11.2016.)
- [50] Upravni odjel za graditeljstvo, prostorno uređenje i zaštitu okoliša. *Izješće o razinama onečišćenosti i ocjeni kvalitete zraka u Slavonskom Brodu za 2016. godinu*. Slavonski Brod, 2017.
- [51] <https://mirion.app.box.com/s/gawpdx0cwvizlx95pmhw> (12.01.2017.)
- [52] <https://mirion.app.box.com/s/18choqibn5f3xmdw6dfe> (12.01.2017.)
- [53] <https://qgis.org/api/> (12.01.2017.)
- [54] Državni zavod za radiološku i nuklearnu sigurnost (DZRNS). *Pravilnik o praćenju stanja radioaktivnosti u okolišu*. Narodne novine, Zagreb, 2013.
- [55] Harley JJ. HASL Procedures Manual. USAEC Report HASL-300; 1970.

- [56] International Atomic Energy Agency (IAEA). *Measurement of Radionuclides in Food and the Environment*. Technical Reports Series No. 295. IAEA, Vienna, 1989.
- [57] International Atomic Energy Agency (IAEA). *The use of gamma ray data to define the natural radiation environment*. IAEA-TECDOC-566. IAEA, Vienna, 1990.
- [58] <http://listovi.dgu.hr/> (11.01.2017.)
- [59] <http://www.propisi.hr/print.php?id=2754> (11.01.2017.)
- [60] Beretka J., Mathew P.J. *Natural radioactivity of Australian building materials, industrial wastes and by-products*. Health Phys. 48, 87–95., 1985.
- [61] Saito K. and Jakob P. *Gamma ray fields in the air due to sources in the ground*. Radiat. Prot. Dosim. 58, 29-45., 1995.
- [62] Lemercier M., Gurriaran P., Bousset P. and Cagnat X. *Specific activity to  $H^*(10)$  conversion coefficients for in situ gamma spectrometry*, Radiat. Prot. Dosim. 128, 83-89., 2008.
- [63] Barbosa A., Ginjaume M., Ortega X. *Influence of the PMMA and the ISO Slab Phantom for Calibrating Personal Dosemeters*. 2000.

# Prilozi

## Prilog 1: Rezultati mjerenja

Datum i vrijeme	Oznaka lokacije	$\dot{H}^*(10)$ [nSv/h]	Temperatura zraka [°C]	Tlak zraka [hPa]	Relativna vlažnost zraka [%]	Smjer vjetra [00-32]	Brzina vjetra [m/s]
26.7.2016. 14:30:17	LOC.001	70	26,6	1005,4	58	18	0,6
26.7.2016. 14:51:46	LOC.002	80	26,6	1005,4	58	18	0,6
26.7.2016. 15:12:31	LOC.003	100	28,4	1005,0	55	16	0,8
26.7.2016. 15:40:28	LOC.004	60	28,4	1005,0	55	16	0,8
26.7.2016. 16:00:26	LOC.005	70	27,7	1004,6	54	14	0,8
26.7.2016. 16:20:29	LOC.006	60	27,7	1004,6	54	14	0,8
26.7.2016. 16:40:38	LOC.007	80	27,7	1004,6	54	14	0,8
26.7.2016. 17:04:16	LOC.008	70	27,2	1004,5	55	22	0,7
26.7.2016. 17:25:14	LOC.009	80	27,2	1004,5	55	22	0,7
26.7.2016. 17:49:40	LOC.010	70	27,2	1004,5	55	22	0,7
26.7.2016. 18:11:38	LOC.011	90	27,2	1004,5	66	24	0,5
26.7.2016. 18:31:15	LOC.012	70	27,2	1004,5	66	24	0,5
27.7.2016. 11:41:04	LOC.013	110	27,5	1005,8	64	16	1,1
27.7.2016. 11:59:38	LOC.014	60	27,5	1005,8	64	16	1,1
27.7.2016. 12:17:47	LOC.015	80	29,2	1005,3	59	16	1,2
27.7.2016. 12:37:28	LOC.016	60	29,2	1005,3	59	16	1,2
27.7.2016. 13:02:41	LOC.017	70	29,1	1004,7	54	14	1,2
27.7.2016. 13:20:34	LOC.018	60	29,1	1004,7	54	14	1,2
27.7.2016. 16:28:28	LOC.019	90	30,5	1003,1	51	14	1,1
27.7.2016. 16:47:28	LOC.020	80	30,5	1003,1	51	14	1,1
27.7.2016. 17:05:41	LOC.021	90	30,1	1002,6	56	12	0,7

27.7.2016. 17:23:24	LOC.022	60	30,1	1002,6	56	12	0,7
27.7.2016. 17:41:28	LOC.023	80	30,1	1002,6	56	12	0,7
27.7.2016. 18:00:31	LOC.024	110	29,0	1002,7	59	10	0,4
27.7.2016. 18:19:41	LOC.025	100	29,0	1002,7	59	10	0,4
27.7.2016. 18:40:36	LOC.026	90	29,0	1002,7	59	10	0,4
29.7.2016. 10:46:51	LOC.027	80	24,0	1005,5	81	20	0,8
29.7.2016. 11:07:11	LOC.028	80	26,6	1005,2	71	22	0,7
29.7.2016. 11:27:15	LOC.029	80	26,6	1005,2	71	22	0,7
29.7.2016. 11:46:20	LOC.030	80	26,6	1005,2	71	22	0,7
29.7.2016. 12:07:41	LOC.031	80	27,4	1004,7	64	30	0,6
29.7.2016. 12:34:21	LOC.032	70	27,4	1004,7	64	30	0,6
29.7.2016. 13:27:14	LOC.033	90	28,7	1004,3	62	14	1,2
29.7.2016. 13:47:59	LOC.034	80	28,7	1004,3	62	14	1,2
29.7.2016. 14:07:12	LOC.035	60	27,0	1004,1	63	22	1,7
14.8.2016. 17:40:28	LOC.036	80	26,5	1011,3	46	14	1,0
14.8.2016. 18:00:32	LOC.037	70	25,1	1011,1	49	12	0,5
14.8.2016. 18:22:32	LOC.038	80	25,1	1011,1	49	12	0,5
14.8.2016. 18:41:26	LOC.039	50	25,1	1011,1	49	12	0,5
14.8.2016. 19:00:27	LOC.040	70	23,0	1011,1	58	04	0,4
15.8.2016. 13:18:30	LOC.041	90	28,0	1008,9	45	16	1,2
15.8.2016. 13:39:19	LOC.042	90	28,0	1008,9	45	16	1,2
15.8.2016. 14:01:36	LOC.043	50	28,0	1008,3	45	14	1,2
15.8.2016. 14:19:16	LOC.044	100	28,0	1008,3	45	14	1,2
15.8.2016. 14:42:20	LOC.045	70	28,0	1008,3	45	14	1,2
16.8.2016. 17:36:36	LOC.046	70	28,5	1003,3	45	04	0,8
16.8.2016. 17:55:37	LOC.047	100	28,5	1003,3	45	04	0,8

16.8.2016. 18:15:19	LOC.048	70	27,0	1003,3	52	12	0,4
16.8.2016. 18:36:28	LOC.049	90	27,0	1003,3	52	12	0,4
16.8.2016. 18:58:47	LOC.050	90	27,0	1003,3	52	12	0,4
16.8.2016. 19:21:53	LOC.051	60	25,0	1003,4	62	02	0,2
16.8.2016. 19:47:27	LOC.052	60	25,0	1003,4	62	02	0,2
18.8.2016. 15:44:55	LOC.053	100	25,5	1001,0	61	14	1,2
18.8.2016. 16:07:48	LOC.054	110	25,4	1000,6	63	14	1,2
18.8.2016. 16:29:39	LOC.055	80	25,4	1000,6	63	14	1,2
18.8.2016. 16:49:33	LOC.056	90	25,4	1000,6	63	14	1,2
18.8.2016. 17:09:41	LOC.057	90	25,3	1000,5	62	14	0,7
18.8.2016. 18:09:34	LOC.058	90	24,5	1000,6	66	12	0,4
18.8.2016. 18:27:31	LOC.059	110	24,5	1000,6	66	12	0,4
18.8.2016. 18:45:21	LOC.060	90	24,5	1000,6	66	12	0,4
18.8.2016. 19:03:24	LOC.061	80	23,3	1000,7	72	02	0,2
18.8.2016. 19:26:47	LOC.062	90	23,3	1000,7	72	02	0,2
18.8.2016. 19:46:36	LOC.063	90	23,3	1000,7	72	02	0,2
19.8.2016. 11:18:18	LOC.064	100	25,8	1002,5	63	22	1,1
19.8.2016. 11:38:36	LOC.065	90	25,8	1002,5	63	22	1,1
19.8.2016. 12:02:26	LOC.066	70	26,5	1002,2	62	24	1,3
19.8.2016. 12:28:39	LOC.067	80	26,5	1002,2	62	24	1,3
19.8.2016. 12:49:46	LOC.068	100	26,5	1002,2	62	24	1,3
19.8.2016. 13:09:17	LOC.069	100	27,1	1002,0	63	22	2,5
19.8.2016. 13:28:24	LOC.070	70	27,1	1002,0	63	22	2,5
19.8.2016. 13:47:52	LOC.071	100	27,1	1002,0	63	22	2,5
19.8.2016. 14:07:45	LOC.072	100	26,8	1002,3	61	20	1,6
19.8.2016. 16:55:33	LOC.073	80	26,7	1001,7	57	32	2,2

19.8.2016. 17:15:29	LOC.074	80	25,9	1001,9	59	04	1,4
19.8.2016. 17:35:22	LOC.075	100	25,9	1001,9	59	04	1,4
19.8.2016. 18:04:43	LOC.076	60	24,6	1002,5	62	06	0,4
19.8.2016. 18:28:45	LOC.077	70	24,6	1002,5	62	06	0,4
19.8.2016. 18:46:07	LOC.078	90	24,6	1002,5	62	06	0,4
19.8.2016. 19:04:36	LOC.079	90	22,9	1003,1	72	14	0,3
19.8.2016. 19:25:34	LOC.080	100	22,9	1003,1	72	14	0,3
20.8.2016. 14:50:43	LOC.081	100	28,4	1005,8	54	06	1,5
20.8.2016. 15:10:17	LOC.082	100	28,6	1005,7	54	14	1,3
20.8.2016. 15:29:43	LOC.083	100	28,6	1005,7	54	14	1,3
20.8.2016. 15:49:24	LOC.084	90	28,6	1005,7	54	14	1,3
20.8.2016. 16:09:27	LOC.085	90	28,9	1005,5	51	04	1,0
20.8.2016. 16:29:17	LOC.086	100	28,9	1005,5	51	04	1,0
20.8.2016. 16:48:25	LOC.087	90	28,9	1005,5	51	04	1,0
20.8.2016. 17:07:33	LOC.088	90	28,9	1005,3	54	06	1,1
20.8.2016. 17:28:28	LOC.089	90	28,9	1005,3	54	06	1,1
24.8.2016. 13:10:38	LOC.090	70	26,6	1012,0	49	32	3,1
24.8.2016. 13:30:03	LOC.091	80	26,6	1012,0	49	32	3,1
24.8.2016. 13:49:11	LOC.092	80	26,6	1012,0	49	32	3,1
24.8.2016. 14:11:52	LOC.093	100	27,2	1011,7	45	32	3,1
24.8.2016. 14:34:57	LOC.094	60	27,2	1011,7	45	32	3,1
24.8.2016. 14:55:22	LOC.095	80	27,2	1011,7	45	32	3,1
24.8.2016. 15:14:17	LOC.096	90	27,4	1011,6	46	32	2,6
24.8.2016. 15:35:17	LOC.097	90	27,4	1011,6	46	32	2,6
24.8.2016. 15:54:47	LOC.098	90	27,4	1011,6	46	32	2,6
24.8.2016. 16:15:27	LOC.099	110	26,8	1011,4	47	32	2,4



24.8.2016. 16:40:23	LOC.100	90	26,8	1011,4	47	32	2,4
24.8.2016. 17:00:04	LOC.101	90	26,3	1011,4	50	30	2,1
25.8.2016. 13:09:50	LOC.102	110	26,7	1010,7	45	04	2,0
25.8.2016. 13:27:19	LOC.103	60	26,7	1010,7	45	04	2,0
25.8.2016. 13:48:29	LOC.104	90	26,7	1010,7	45	04	2,0
25.8.2016. 14:06:43	LOC.105	80	27,2	1010,3	44	06	2,1
25.8.2016. 14:25:13	LOC.106	80	27,2	1010,3	44	06	2,1
25.8.2016. 14:43:34	LOC.107	60	27,2	1010,3	44	06	2,1
25.8.2016. 15:08:14	LOC.108	60	27,5	1010,0	42	32	2,3
25.8.2016. 15:25:30	LOC.109	60	27,5	1010,0	42	32	2,3
25.8.2016. 15:59:09	LOC.110	60	27,5	1010,0	42	32	2,3
25.8.2016. 16:22:11	LOC.111	80	27,8	1009,7	44	02	2,1
25.8.2016. 16:51:41	LOC.112	80	27,8	1009,7	44	02	2,1
25.8.2016. 17:14:53	LOC.113	80	27,1	1009,8	42	02	1,3
25.8.2016. 17:33:47	LOC.114	60	27,1	1009,8	42	02	1,3
25.8.2016. 17:59:20	LOC.115	70	27,1	1009,8	42	02	1,3
25.8.2016. 18:17:54	LOC.116	70	25,7	1009,8	49	32	0,6
26.8.2016. 16:42:32	LOC.117	60	29,2	1009,9	44	14	0,9
26.8.2016. 17:00:22	LOC.118	60	29,4	1009,7	46	06	0,5
26.8.2016. 17:27:12	LOC.119	60	29,4	1009,7	46	06	0,5
26.8.2016. 17:45:11	LOC.120	50	29,4	1009,7	46	06	0,5
26.8.2016. 18:03:12	LOC.121	70	27,5	1009,7	50	04	0,6
26.8.2016. 18:20:15	LOC.122	70	27,5	1009,7	50	04	0,6
26.8.2016. 18:37:58	LOC.123	90	27,5	1009,7	50	04	0,6
26.8.2016. 18:55:29	LOC.124	70	27,5	1009,7	50	04	0,6
26.8.2016. 19:15:00	LOC.125	70	25,3	1010,0	60	02	0,3

26.8.2016. 19:33:21	LOC.126	70	25,3	1010,0	60	02	0,3
26.8.2016. 19:54:51	LOC.127	50	25,3	1010,0	60	02	0,3
26.8.2016. 20:13:21	LOC.128	90	21,0	1010,6	79	04	0,2
27.8.2016. 12:53:14	LOC.129	60	28,9	1011,2	43	08	1,4
27.8.2016. 13:26:15	LOC.130	90	29,8	1010,8	43	14	1,4
27.8.2016. 13:45:02	LOC.131	70	29,8	1010,8	43	14	1,4
27.8.2016. 14:02:22	LOC.132	70	29,7	1010,3	40	06	1,5
27.8.2016. 14:20:36	LOC.133	70	29,7	1010,3	40	06	1,5
27.8.2016. 14:39:30	LOC.134	90	29,7	1010,3	40	06	1,5
27.8.2016. 14:58:23	LOC.135	120	29,7	1010,3	40	06	1,5
27.8.2016. 15:21:07	LOC.136	90	29,4	1009,9	37	06	1,5
27.8.2016. 15:38:29	LOC.137	100	29,4	1009,9	37	06	1,5
27.8.2016. 16:03:01	LOC.138	50	29,2	1009,8	37	14	1,0
27.8.2016. 16:26:05	LOC.139	90	29,2	1009,8	37	14	1,0
27.8.2016. 16:51:28	LOC.140	70	29,2	1009,8	37	14	1,0
27.8.2016. 17:08:34	LOC.141	70	29,2	1009,5	41	12	0,6
27.8.2016. 17:25:54	LOC.142	50	29,2	1009,5	41	12	0,6
27.8.2016. 17:47:01	LOC.143	70	29,2	1009,5	41	12	0,6
27.8.2016. 18:05:03	LOC.144	90	26,7	1009,6	45	06	0,5
27.8.2016. 18:22:25	LOC.145	80	26,7	1009,6	45	06	0,5
27.8.2016. 18:40:19	LOC.146	50	26,7	1009,6	45	06	0,5
27.8.2016. 19:23:03	LOC.147	70	24,7	1009,7	53	04	0,3
27.8.2016. 19:40:51	LOC.148	70	24,7	1009,7	53	04	0,3
27.8.2016. 19:59:13	LOC.149	70	24,7	1009,7	53	04	0,3
27.8.2016. 20:18:41	LOC.150	90	20,3	1010,1	71	04	0,1

$$\dot{H}^*(10) = 80 \text{ nSv/h}$$