

# RASPODJELA DOZNOG OPTEREĆENJA NA STANOVNIŠTVO U NAŠICAMA

---

Hrbak, Marijana

Master's thesis / Diplomski rad

2023

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:160:447925>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-10-18**



Repository / Repozitorij:

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



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU**

**ODJEL ZA FIZIKU**



**MARIJANA HRBAK**

**RASPODJELA DOZNOG OPTEREĆENJA NA  
STANOVNIŠTVO U NAŠICAMA**

**Diplomski rad**

**Osijek, 2023.**

**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU**

**ODJEL ZA FIZIKU**



**MARIJANA HRBAK**

**RASPODJELA DOZNOG OPTEREĆENJA NA  
STANOVNIŠTVO U NAŠICAMA**

**Diplomski rad**

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

**Osijek, 2023.**

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

*Zahvaljujem Institutu za medicinska istraživanja i medicinu rada i Jedinici za zaštitu od zračenja na dodjeli mjernih instrumenta na privremeno korištenje u svrhu prikupljanja mjernih podataka. Također, zahvaljujem mentoru izv. prof. dr. sc. Branku Petrincu te komentorici doc. dr. sc. Marini Poje Sovilj koji su svojim znanjima i iskustvom uvelike olakšali izradu ovog diplomskog rada svojim naputcima i savjetima.*

## Sadržaj

1. Uvod.....	1
2. Teorijska podloga.....	2
2.1. Radioaktivnost.....	2
2.2. Elektromagnetsko zračenje .....	2
2.3. Radionuklidi i radioaktivni raspadi .....	3
2.3.1. Zakon radioaktivnog raspada.....	3
2.3.2. Vrste radioaktivnog raspada .....	4
2.4. Ionizirajuće i neionizirajuće zračenje.....	5
2.4.1. Neionizirajuće zračenje .....	6
2.4.2. Ionizirajuće zračenje.....	6
2.4.3. Vrste ionizirajućega zračenja.....	7
2.5. Izvori ionizirajućeg zračenja .....	8
2.5.1. Prirodni izvori.....	9
2.5.2. Umjetni izvori.....	10
2.5.3. Utjecaj ionizirajućeg zračenja na čovjeka .....	10
2.6. Primjena ionizirajućeg zračenja .....	11
2.6.1. Primjena u medicini.....	11
2.6.2. Primjena u industriji .....	12
2.6.3. Nuklearne elektrane .....	13
2.6.4. Određivanje starosti metodom $^{14}\text{C}$ .....	14
2.7. Radioaktivni otpad .....	15
2.7.1. Prirodni radioaktivni materijali .....	15
2.8. Dozimetrijske veličine.....	16
2.8.1. Zaštitne dozimetrijske veličine.....	16
2.8.2. Operativne dozimetrijske veličine .....	18
2.9. Propisane granične vrijednosti primljene doze zračenja .....	20

2.10.Mjere zaštite od zračenja.....	21
3. Mjerenje brzine ambijentalnog doznog ekvivalenta u Našicama.....	23
3.1. Materijali i metode .....	24
3.2. Prikupljanje podataka .....	31
3.3. Obrada rezultata .....	36
3.4. Analiza i rasprava dobivenih rezultata .....	36
3.4.1. T-test.....	40
3.4.2. Rasprava rezultata.....	45
Zaključak.....	47
Literatura .....	48
Životopis.....	52

## **RASPODJELA DOZNOG OPTEREĆENJA NA STANOVNIŠTVO U NAŠICAMA**

**MARIJANA HRBAK**

### **Sažetak**

Prvi dio rada daje teorijsku podlogu i objašnjenje osnovnih pojmova vezanih za radioaktivnost, zračenje, utjecaj zračenja na organizam, izvore zračenja te dozimetrijske veličine. Drugi dio rada bavi se mjerenjem brzine ambijentalnog doznog ekvivalenta u Našicama. Istraživački dio ovog rada obuhvatio je mjerenje brzine ambijentalnog doznog ekvivalenta  $H^*(10)/t$  na području Našica, a cilj mjerenja bio je procjena mogućeg ozračenja stanovništva te identificiranje potencijalnih izvora ionizirajućeg zračenja te utjecaj rada cementare NEXE d.d. na ozračenje stanovništva. Na kraju su dobivenim podacima pridruženi odgovarajući položajni i atributni podaci te je napravljen grafički prikaz podataka. Mjerenja su izvršena pomoću uređaja RDS-31 i PM1605.

(52 stranice, 34 slika, 5 tablice, 59 literaturna navoda)

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

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

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

**Komentor:** doc. dr. sc. Marina Poje Sovilj

**Ocjenjivači:** doc. dr. sc. Denis Stanić; izv. prof. dr. sc. Branko Petrinec; doc. dr. sc. Marina Poje Sovilj; mr. sc. Slavko Petrinšak

**Rad prihvaćen:.**



**POPULATION DOSE DISTRIBUTION IN NAŠICE**  
**MARIJANA HRBAK**

**Abstract**

The first part of this master thesis provides a theoretical basis and an explanation of the basic terms related to radioactivity, radiation, the influence of radiation on the body, sources of radiation and dosimetric quantities. The second part of the paper deals with the measurement of the ambient dose equivalent rate in Našice. The research part of this master thesis included the measurement of the rate of the ambient dose equivalent  $H^*(10)/t$  around Našice, and the goal of the measurement was to assess the possible exposure of the population and identify potential sources of ionizing radiation and the impact of the operation of the NEXE d.d. cement factory to population irradiation. Corresponding positional and attribute data were associated with the obtained measurements, and a graphic representation of the measurements was made. Measurements were conducted using RDS-31 and RM1605 devices.

(52 pages, 34 figures, 5 tables, 59 references)

**Thesis deposited in Department of Physics library**

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

**Supervisors:** Associate Professor Branko Petrincec, PhD

**Co-Supervisor:** Assistant Professor Marina Poje Sovilj, PhD

**Reviewers:** Denis Stanić, PhD.; Branko Petrincec, PhD.; Marina Poje Sovilj, PhD.; Slavko Petrinšak, MSc.

**Thesis accepted:**

# 1. Uvod

Radioaktivnost, radionuklidi i ionizirajuće zračenje stalno su prisutni u našem životu. Podrijetlo radionuklida i ionizirajućeg zračenja može biti prirodno i umjetno. Većina nas nije svjesna potencijalnih izvora zračenja te posljedica kontaminacije. Izloženost zračenju možemo otkriti samo pomoću mjernih instrumenata jer čovjek nema razvijeno osjetilo na ionizirajuće zračenja. Stoga, postoji stalna potreba za ispitivanjem i praćenjem zastupljenosti različitih izvora zračenja prisutnih u našoj okolini.

U ovome radu bit će izmjerena brzina ambijentalnog doznog ekvivalenta u Našicama te izolirani potencijalni izvori zračenja. Jedan od mogućih izvora je cementara NEXE d.d. koja se nalazi na teritoriju Našica u blizini naselja Zoljan.

Prvi dio rada daje teorijsku podlogu i objašnjenje osnovnih pojmova vezanih za radioaktivnost, zračenje, utjecaj zračenja na organizam, izvore zračenja te dozimetrijske veličine. Drugi dio rada bavi se mjerenjem brzine ambijentalnog doznog ekvivalenta u Našicama. U njemu su opisani korišteni instrumenti i metode te prikazani rezultati mjerenja i zaključak.

## 2. Teorijska podloga

### 2.1. Radioaktivnost

Radioaktivnost je spontano emitiranje alfa-čestica i beta-čestica iz tvari često praćeno i emisijom gama-elektromagnetskih valova, pri ćemu se mijenjaju svojstva tvari, tj. kemijski elementi prelaze iz jednih u druge te se oslobađa energija u obliku kinetićke energije emitiranih ćestica ili energije elektromagnetskih valova. [1]

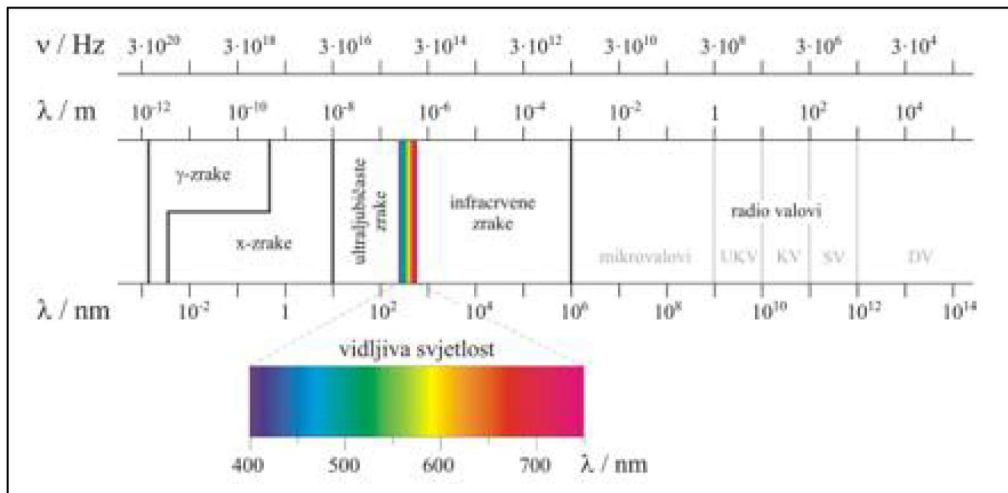
Godine 1896., Antoine Henri Becquerel otkrio je pojavu prirodne radioaktivnosti nakon što je uoćio da uranijeve soli emitiraju nevidljivo zraćenje koje djeluje na fotografsku ploću. Dvije godine kasnije, 1898. francuska kemićarka i fizićarka, Marie Curie-Skłodowska, shvatila je da se atomi spontano mogu pretvoriti u druge atome i pri tome emitiraju zraćenje na koje ne utjeće elektrićna struja, zagrijavanje ili kemijske reakcije. Ernest Rutherford je proućavao to zraćenje, tj. zraćenje radija i 1899. godine otkrio da se sastoji od dviju zraka. Zrake je nazvao  $\alpha$  i  $\beta$ . Henri Becquerel, Marie Curie-Skłodowska i njen suprug, Pierre Curie, zajedno su dobili Nobelovu nagradu za fiziku 1903. godine za svoja otkrića i doprinos znanosti. [2]

### 2.2. Elektromagnetsko zraćenje

Elektromagnetsko zraćenje je protok energije kroz vakuum ili neke tvari, tj. optićka sredstva, u obliku elektromagnetskih valova. Elektromagnetski val je pojava širenja (rasprostiranje, propagacija), tj. periodićnog titranja elektrićnoga i magnetskoga polja u prostoru. Promjena elektrićnog polja uzrokuje promjenu magnetskog polja i obrnuto, a ravnine titranja polja okomite su jedna na drugu i na smjer širenja vala pa su svi elektromagnetski valovi transverzalni. Elektromagnetsko zraćenje nalazimo u svemiru, ali i na Zemlji. Sunce je najveći izvor vidljive svjetlosti, zvijezde su izvor rendgenskog zraćenja i kozmićkog zraćenja, planeti emitiraju radiovalove. Zapravo, svako tijelo pri odrećenoj temperaturi emitira elektromagnetsku energiju. Osim navedenih prirodnih izvora elektromagnetskog zraćenja, postoje i umjetni izvori koje je uglavnom proizveo ćovjek. Na primjer, rendgenske zrake i gama zrake ( $\gamma$ ) koje koristimo u medicini, laseri, elektrićni urećdaji, elektrićni vodovi i dr. [55] Izvori elektromagnetskih valova su titrajni elektrićni strujni krugovi ili titranje atoma i molekula u tvarima. Elektromagnetski valovi nastaju pri iskrenjima u elektrićnim instalacijama, atmosferskim izbijanjima na Zemlji, eksplozijama na Suncu i dr. S obzirom na valnu duljinu, odnosno frekvenciju, moćemo ih podijeliti na:

- gama ( $\gamma$ ) zraćenje (valna duljina manja od 0,02 nm)
- rendgensko zraćenje (valna duljina izmeću 0,01 nm – 10 nm)
- ultraljubićasto (UV) zraćenje (valna duljina izmeću 10 nm – 400 nm)
- vidljiva svjetlost (valna duljina izmeću 390 nm – 750 nm)

- infracrveno (IR) zračenje (valna duljina između 750 nm – 1 mm)
- mikrovalno zračenje (valna duljina između 1 mm – 1 m)
- radiovalovi (valna duljina između 1 m – 100 000 km). [3]



Slika 1. Spektar elektromagnetskog zračenja [4]

## 2.3. Radionuklidi i radioaktivni raspadi

Osnovna gradivna jedinica tvari je atom. Atomi se sastoje od jezgre i elektronskog omotača. Svaki atom određen je svojim atomskim brojem, brojem protona u atomskoj jezgri. Atome istog kemijskog elementa, koji imaju isti broj protona, a različit broj neutrona, nazivamo izotopima. Izotop je stabilan ako je broj protona i neutrona jednak. Premalen ili prevelik broj neutrona može učiniti atom nestabilnim. [5]

Radionuklidi su nestabilne, radioaktivne jezgre atoma koje se spontano raspadaju i pri tome emitiraju radioaktivno zračenje. U prirodi postoji oko 1500 radionuklida. Umjetno je proizvedeno još 800, a tržišno ih je dostupno pedesetak. [6]

### 2.3.1. Zakon radioaktivnog raspada

Radioaktivni raspad jezgre ne ovisi o vanjskim utjecajima. Nemoguće je predvidjeti kad će pojedini atom izbaciti radioaktivnu česticu. Zakon radioaktivnoga raspada statistički opisuje koliko će se radioaktivnih atomskih jezgara raspasti u nekom uzorku radioaktivne tvari u određenom vremenskom intervalu. Broj raspadnutih jezgri ovisi o početnom broju radioaktivnih jezgara  $N_0$ , promatranom vremenu raspada  $t$  i vremenu poluraspada  $T_{\frac{1}{2}}$ . Zakon radioaktivnog raspada glasi:

$$N(t) = N_0 \cdot 2^{\frac{-t}{T_{\frac{1}{2}}}} \quad (1)$$

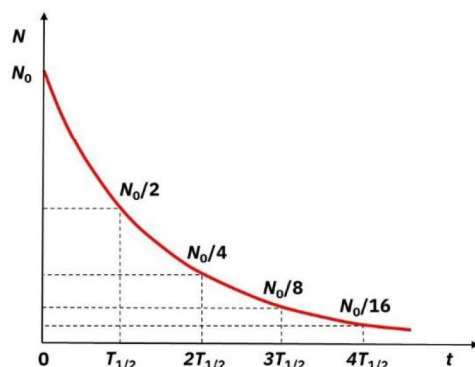
Izraz možemo zapisati i pomoću konstante radioaktivnog raspada  $\lambda$ , karakteristične za svaki pojedini element:

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

Jednadžba (2) predstavlja zakon radioaktivnog raspada u kojoj je  $N(t)$  broj neraspadnutih atoma iz početnog uzorka. [1]

Svakome radionuklidu možemo pripisati vrijeme poluraspada  $T_{1/2}$ . Vrijeme poluraspada je statistička veličina koju 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:

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



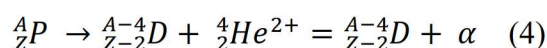
Slika 2. Zakon radioaktivnog raspada [9]

### 2.3.2. Vrste radioaktivnog raspada

Raspadom radionuklida emitira se alfa ( $\alpha$ ), beta ( $\beta$ ) ili gama ( $\gamma$ ) zračenje. Tri osnovne vrste radioaktivnog zračenja su alfa, beta i gama raspadi opisani u daljnjem tekstu.

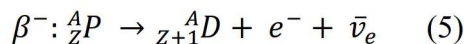
#### Alfa raspad

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  ${}^4\text{He}$ , raspadom se atomski broj ( $Z$ ) roditelja  $P$  smanjuje za dva, a njegov maseni broj ( $A$ ) za četiri [7]:

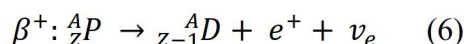


## Beta raspadi ( $\beta^-$ , $\beta^+$ )

$\beta^-$  raspad podrazumijeva proces u kojem neutron prelazi u proton uz emisiju  $\beta^-$  čestice (elektrona  $e^-$ ) i antineutrina  $\bar{\nu}_e$ . Atomski broj ( $Z$ ) se pritom povećava za jedan, dok se maseni broj ( $A$ ) ne mijenja:

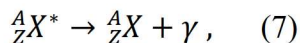


Tijekom  $\beta^+$  raspada, proton prelazi u neutron uz emisiju  $\beta^+$  čestice (pozitrona  $e^+$ ) i neutrina  $\nu_e$ . Atomski broj nastalog elementa je manji za jedan, dok maseni broj ostaje isti [7]:



## 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,") u nuklearnom reaktoru. [8] 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. [7]

## 2.4. Ionizirajuće i neionizirajuće zračenje

Elektromagnetsko zračenje, u ovisnosti o frekvenciji, možemo klasificirati kao neionizirajuće ili ionizirajuće. Ionizirajuće zračenje je pojava prijenosa energije u obliku fotona (kvanti elektromagnetskog zračenja) ili masenih čestica, a koje ima dovoljno energije da u međudjelovanju s kemijskom tvari ionizira tu tvar. Neionizirajuća zračenja su elektromagnetska polja i elektromagnetski valovi frekvencije niže od 3 000 000 GHz ili ultrazvuk frekvencije niže od 500 MHz, a koji u međudjelovanju s tvarima ne stvaraju ione. Ion je električki jednostruko ili višestruko nabijeni atom, atomska skupina ili molekula. Ion nastaje kada neutralni atom ili molekula izgube ili prime jedan elektron ili više njih. Gubitkom elektrona nastaje pozitivno nabijeni ion (kation), a primitkom nastaje negativno nabijeni ion (anion).

## 2.4.1. Neionizirajuće zračenje

Neionizirajuće zračenje u elektromagnetskom spektru obuhvaća područje velikih valnih duljina (>100 nm) i malih energija fotona (<12,4 eV).

U neionizirajuće zračenje ubrajamo:

- optičko zračenje - ultraljubičasto, infracrveno i vidljiv spektar
- radiovalno i mikrovalno zračenje
- zračenje ekstremno niskih frekvencija.

Tablica 1. Vrste neionizirajućeg zračenja

Vrste zračenja	Frekvencija [Hz]
Radiovalovi	$10^4 - 10^8$
Mikrovalovi	$10^8 - 10^{12}$
Infracrveno	$10^{12} - 3,75 \cdot 10^{14}$
Vidljivo zračenje	$3,75 \cdot 10^{14} - 7,5 \cdot 10^{14}$
Ultraljubičasto	$7,5 \cdot 10^{14} - 10^{16}$

Izvor neionizirajućih zračenja je svaki uređaj koji proizvodi jednu ili više vrsta neionizirajućih zračenja. Osim uređaja koji proizvode neionizirajuće zračenje, postoji i zračenje izazvano od prirodnih izvora. Prema tome, možemo reći da na nas djeluju “tehnička” i “prirodna” neionizirajuća zračenja. Ljudska osjetila mogu detektirati samo usko područje vidljive svjetlosti, a ostale vrste zračenja ne, osim ako mu je intenzitet toliko jak da se izražava u obliku topline. Biološki sustavi mogu apsorbirati neionizirajuće zračenje koje tada može prouzrokovati promjene u vibracijskim i rotacijskim energijama molekula tkiva, što dovodi do moguće disocijacije (razdvajanja) molekula ili, što je mnogo češće, do raspršenja energije u obliku fluorescencije ili topline. [11][12]

## 2.4.2. Ionizirajuće zračenje

Ionizirajuće zračenje je fotonsko (elektromagnetsko) ili čestično (korpuskulno) zračenje koje ima dovoljno energije da ionizira tvari. Popratna je pojava mnogih prirodnih događanja u mikrosvijetu i dio kozmičkoga zračenja (prirodno zračenje) te umjetno potaknutih procesa u nuklearnim reaktorima ili

nuklearnim eksplozijama (umjetno zračenje). Međudjelovanje ionizirajućega zračenja i tvari osobito je ovisno o nositeljima zračenja (fotoni ili čestice) i njihovoj energiji. [13]

### **2.4.3. Vrste ionizirajućega zračenja**

#### **Alfa zračenje ( $\alpha$ )**

Alfa zračenje se sastoji od alfa čestica koje se sastoje od dvaju protona i dvaju neutrona i koje nose dvostruki pozitivni naboj. Zbog relativno velike mase i naboja imaju izuzetno ograničenu sposobnost prodiranja u materiju. Alfa zračenje se može zaustaviti komadom papira ili vanjskim slojem kože. Posljedično, alfa zračenje, ako se nalazi izvan tijela, ne predstavlja opasnost od zračenja. Međutim, kada se nuklearne tvari koje emitiraju alfa-zračenje unesu u tijelo (primjerice, njihovim udisanjem ili gutanjem), energija alfa zračenja se potpuno apsorbira u tkivo i tada može ostaviti ozbiljne posljedice na unutrašnja tkiva i organe. Zbog toga je alfa zračenje samo opasno prilikom unutarnje kontaminacije. [5]

#### **Beta zračenja ( $\beta$ )**

Beta zračenje se sastoji od nabijenih čestica koje su izbačene iz jezgre atoma i koje su fizički identične elektronima. Beta čestice općenito imaju negativan naboj, vrlo su male i mogu prodrijeti dublje od alfa čestica. Međutim, većina beta zračenja može se zaustaviti tankim slojem štita, kao što su ploče od plastike, stakla ili metala. Kada je izvor zračenja izvan tijela, beta zračenje s dovoljno energije može prodrijeti kroz vanjski sloj kože tijela i pohraniti svoju energiju unutar aktivnih stanica kože. Međutim, beta zračenje ima vrlo ograničenu sposobnost prodiranja u dublja tkiva i organa u tijelu. Nuklearne tvari koje emitiraju beta-zračenje također mogu biti opasne ako se unesu u tijelo. [5]

#### **Fotonsko zračenje ( $\gamma$ i rendgenske zrake)**

Fotonsko zračenje je elektromagnetsko zračenje. Postoje dvije vrste fotonskog zračenja - gama zračenje ( $\gamma$ ) i rendgensko zračenje. Gama zračenje su elektromagnetski valovi vrlo visoke frekvencije i energije, koji nastaju prilikom kvantnih prijelaza atomskih jezgri s pobuđenih stanja, u procesu kočnoga zračenja brzih elektrona prilikom sudara s atomskim jezgrama, pri nuklearnim procesima u zvijezdama i u procesima pretvorbi subatomskih čestica. [56] Rendgensko zračenje su elektromagnetski valovi valnih duljina 0,001 do 10 nm. Nastaje u rendgenskoj cijevi kada brzi elektroni udaraju u metalnu anodu ili u drugim uređajima (npr. betatronu i sinkrotronu) ili prirodnim procesima u svemiru i obično imaju manju energiju od gama zračenja. [57]

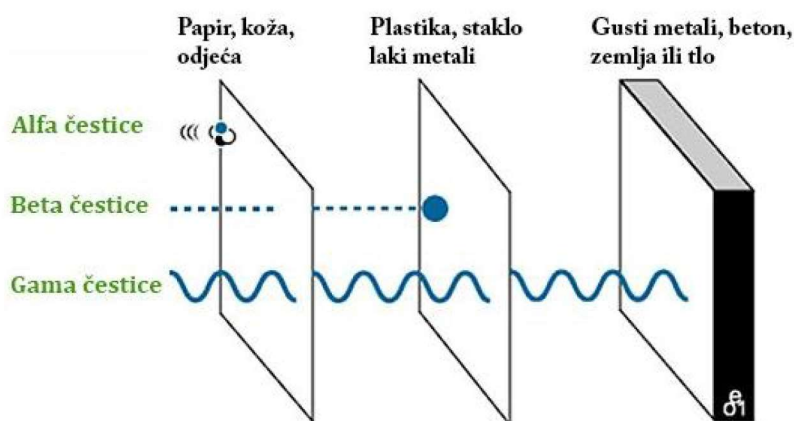
Gama zračenje može prodrijeti vrlo duboko, a intenzitet može smanjiti samo pomoću materijala koji su prilično gusti, poput olova ili čelika. Općenito, gama zračenje može prijeći mnogo veće udaljenosti od



alfa ili beta zračenja te može prodrijeti u tjelesna tkiva i organe kada je izvor zračenja izvan tijela. [5]  
Rendgenske zrake imaju manju energiju i stoga su manje prodrone 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. [14]

### Neutronska zračenje (n)

Osim kozmičkog zračenja, spontana fisija je jedini prirodni izvor neutrona (n). Uobičajeni izvor neutrona je nuklearni reaktor u kojem dolazi do cijepanja jezgre uranija ili plutonija popraćeno emisijom neutrona. Neutroni emitirani iz jednog događaja fisije mogu pogoditi jezgri susjednog atoma i izazvati još jedan događaj fisije, izazivajući lančanu reakciju. Proizvodnja nuklearne energije temelji se na ovom principu. Svi drugi izvori neutrona ovise o reakcijama u kojima je jezgra bombardirana određenom vrstom zračenja (kao što je fotonsko zračenje ili alfa zračenje) i gdje je rezultat emisija neutrona. Neutroni mogu prodrijeti u tkiva i organe ljudskog tijela kada je izvor zračenja izvan tijela. Neutroni, također, mogu biti opasni ako se unutar tijela talože nuklearne tvari koje emitiraju neutrone. Kao zaštita se obično koristi voda u nuklearnim reaktorima i debeli sloj betona i parafina u akceleratorima čestica jer su interakcije s jezgrama vodika vrlo učinkovite u redukciji energije neutrona. [5]

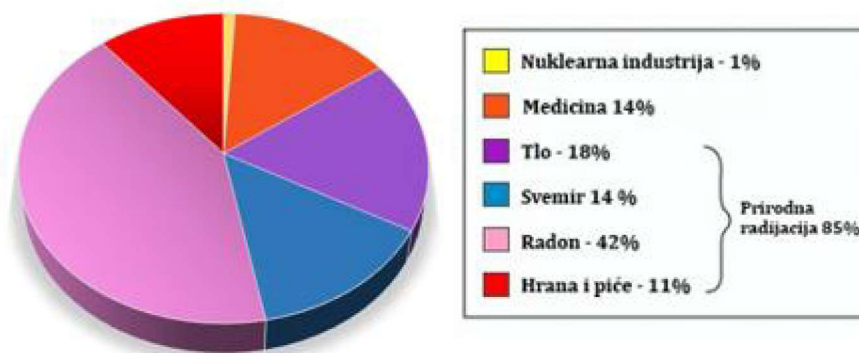


Slika 3. Prodornost alfa, beta i gama-zračenja [15]

## 2.5. Izvori ionizirajućeg zračenja

Radioaktivnost i ionizirajuće zračenje su sastavni dio našeg okoliša. To je jedan od okolišnih uvjeta na koje smo mi kao biološka bića prilagođeni. Radioaktivnost, kojoj smo svakodnevno izloženi, izvor ima u kozmičkim zrakama, zatim radioaktivnost iz tla (i zraka), građevinskih materijala, pa čak iz svih onih tvari koje unosimo u organizam (jelo i piće). Postoji oko 60 radionuklida koji su glavni izvori prirodne radioaktivnosti. [15]

Izvori zračenja mogu se podijeliti u dvije osnovne skupine - prirodno radioaktivne atome i umjetne izvore koji nastaju ubrzavanjem i/ili usporavanjem nabijenih čestica. [16]



Slika 4. Izvori radijacije [15]

### 2.5.1. Prirodni izvori

Ljudi su prvenstveno izloženi prirodnom zračenju Sunca, kozmičkih zraka i prirodnih radioaktivnih elementa koji se nalaze u zemljinoj kori. Kozmičke zrake dolaze iz svemira i uključuju protone, elektrone, gama zrake i rendgenske zrake. Plin radon, koji potječe iz zemlje, raspadom radija, koji se nalazi u prirodi, predstavlja glavni izvor izloženosti zračenju za čovjeka. Primarni radioaktivni elementi koji se nalaze u zemlji kori su uranij, torij i kalij te njihovi produkti radioaktivnog raspada. Ovi elementi emitiraju alfa, beta i gama zračenje. [14]

Po tome kako su nastali prirodni izvori zračenja dijele se na:

- izvori koji su oduvijek prisutni na Zemlji – prirodno postoje samo produkti triju radioaktivnih nizova. Radioaktivni nizovi nose naziv po svojim rodonačelnicima: uranijev, torijev, aktinijev i neptunijev. Na Zemlji postoje produkti samo prvih triju radioaktivnih nizova: uranijevog, torijevog, aktinijevog, s obzirom na to da su se svi članovi neptunijevog niza odavno raspali zbog relativno kratkoga perioda poluraspada. Potječu iz vremena formiranja Zemlje, a karakterizira ih vrlo dugo vrijeme poluraspada, čak i do milijardu godina (iznimka je plin radon, čije je vrijeme poluraspada 3,8 dana).
- izvori nastaju kao posljedica djelovanja kozmičkih zraka (izvor im je uglavnom izvan našeg Sunčevog sustava, a sastoji se od raznih oblika zračenja: od vrlo brzih teških čestica pa do visokoenergijskih fotona i miona ( ugljik  $^{14}C$ , tricij  $^3H$ , berilij  $^7Be$  i drugi). [15]

## Radon

Radon je prirodni radioaktivni plin bez mirisa i okusa. U prirodi postoje tri izotopa radona (radon –  $^{222}\text{Rn}$ , toron –  $^{220}\text{Rn}$ , aktinon –  $^{219}\text{Rn}$ ) koji su članovi radioaktivnih nizova  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{235}\text{U}$ . Zbog kratkih vremena poluraspada, vrijednosti torona i aktinona se uglavnom zanemaruju. Radon nastaje radioaktivnim raspadom radija koji se nalazi u tlu i stijenama, a nalazimo ga posvuda u Zemljinoj kori. Vođen različitim transportnim mehanizmima, lako izlazi iz tla u zrak. Koncentracija radona u zraku koji udišemo na otvorenom je malena (između 5 i 15 Bq/m<sup>3</sup>) i općenito ne predstavlja zdravstveni problem, ali može biti visoka unutar zatvorenog prostora u kojem živimo i/ili radimo (od deset do više tisuća Bq/m<sup>3</sup>, a u ekstremnim vrijednostima i do milijun Bq/m<sup>3</sup>). Disanjem, radioaktivni elementi ulaze u dišni sustav gdje radioaktivnim raspadom mogu oštetiti DNA i potencijalno uzrokovati karcinom pluća. [17]. Koncentracije radona su najviše na područjima nalazišta uranijevih i torijevih ruda te granita. Radon se primarno upotrebljava u istraživanju - nema značajnu industrijsku namjenu.

### 2.5.2. Umjetni izvori

Uz prirodne izvore ionizirajućeg zračenja, postoje i mnogi umjetni izvori nastali kao posljedica ljudske tehnologije, razvojem nuklearnih reaktora i testiranjem nuklearnog oružja (stroncij  $^{90}\text{Sr}$ , jod  $^{129}\text{I}$ , jod  $^{131}\text{I}$ , cezij  $^{137}\text{Cs}$ , plutonij  $^{239}\text{Pu}$  itd). [15]

Umjetno zračenje je zračenje proizvedeno u uređajima kao što su rendgenski uređaji i umjetno proizvedeni radioizotopi napravljeni u reaktoru ili akceleratoru. Ova vrsta zračenja koristi se u medicini i industriji. Glavni korisnici umjetnih zračenja uključuju: medicinske ustanove, kao što su bolnice i farmaceutske ustanove, istraživačke i obrazovne ustanove, nuklearni reaktori i njihova prateća postrojenja te objekti uključeni u proizvodnju nuklearnog oružja. Mnoga od tih postrojenja stvaraju određenu količinu radioaktivnog otpada, a neka ispuštaju ograničenu količinu zračenja u okoliš. Radioaktivni materijali također se koriste u proizvodnji nekih proizvoda, kao što su detektori dima. [14]

### 2.5.3. Utjecaj ionizirajućeg zračenja na čovjeka

Ubrzo nakon otkrića rendgenskih zraka, opaženi su prvi slučajevi oštećenja tkiva kao posljedica ovog zračenja. Najveći broj podataka o biološkom djelovanju ionizirajućeg zračenja dobiven je iz triju glavnih izvora:

- iz epidemioloških podataka nakon eksplozija atomskih bombi
- proučavanja ozračenih osoba nakon nesreće u nuklearnim laboratorijima
- proučavanjem posljedica ozračivanja u terapijske i profesionalne svrhe.

Oštećenja nastala utjecajem ionizirajućeg zračenja mogu biti slučajna, profesionalna, terapijska i namjerna.

Zračenje može izazvati promjene na svakom dijelu mehanizma stanice. Rezultat promjene može biti nemogućnost diobe stanice, oštećenja funkcije stanice ili smrt stanice, što onda ima negativne posljedice na čitav organizam. Učinci koji za rezultat imaju smrt stanice nazivaju se determinističkim učincima i klinički su primjetni na pojedincu samo ako 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. Moguće je da ta neletalna transformacija stanice rezultira pojavom karcinoma kod izloženog pojedinca.

Razlikujemo oštećenja dviju kategorija stanica - onih koje su povezane s održavanjem integriteta jedinice (npr. stanice koštane srži, krvi, jetre i druge) i one koje su u vezi s održavanjem i integritetom genetske informacije koja se prenosi s generacije na generaciju (reproduktivne stanice). Zato govorimo o tjelesnim i genetskim oštećenjima. Tjelesna oštećenja su ograničena na sam organizam, mogu biti opća i lokalna, a po trajanju akutna i kronična. Ako se čitavo tijelo ozrači kratkotrajno velikom dozom, znakovi i simptomi združeni s takvim izlaganjem poznati su kao akutna radijacijska bolest. Nadalje, ako se doza koja bi uzrokovala smrt nakon zračenja cijelog tijela podjeli u male doze koje se daju kroz nekoliko mjeseci ili godina u intervalima, ne dolazi do neposredne smrti, nego do znakova kroničnog oštećenja. Genetska oštećenja utječu na potomstvo. Izlaganje zračenju dovodi do porasta rijetkih nasljednih promjena. Ove promjene poznate su kao mutacije. Mutacije gena somatskih stanica dovode do razvoja defekata i bolesti. Najčešće dolazi do smrti ili gubitka sposobnosti produkcije potomaka, skraćenje života ili pojave malignih bolesti. Smatra se da svaka, pa i najmanja doza, zračenja može inducirati mutacije. Mutacije su linearna funkcija doze zračenja, tj. veća doza zračenja izaziva veći broj mutacija. [18]

## **2.6. Primjena ionizirajućeg zračenja**

Ionizirajuće zračenje je sastavni dio našeg života te ima široku primjenu. Neke od primjena su navedene u daljnjem tekstu.

### **2.6.1. Primjena u medicini**

Ionizirajuće zračenje se primjenjuje u medicinskoj dijagnostici, ali i kao terapija.

U dijagnostičke svrhe koriste se uređaji koji proizvode ionizirajuće zračenje kao i radioaktivni izvori. Pod uređajima koji proizvode ionizirajuće zračenje podrazumijevaju se rendgenski uređaji i ostali uređaji koji služe za dobivanje slikovnog prikaza određenih struktura unutar tijela (kompjuterizirana tomografija

– CT, denzitometar te mamograf). Ova se tehnika zasniva na nejednolikoj apsorpciji ionizirajućeg zračenja različitih organa ili sustava ljudskog tijela te mogućnosti da se na osnovi toga konstruira njihova slika ili prikaz u stvarnom vremenu. U slučaju korištenja radioaktivnih izvora, u pravilu se koriste otvoreni radioaktivni izvori zbog činjenice da se radioaktivni izotop istog kemijskog elementa ponaša kemijski jednako kao i stabilni pa se na taj način može obilježiti biološki uzorak ili se radioaktivni izotop može ugraditi u radiofarmak koji se aplicira pacijentu. Takav kemijski spoj prati iste fiziološke putove u organizmu, a zbog emisije ionizirajućeg zračenja koristi se kao obilježivač. U dijagnostičkim pretragama upotrebljavaju se minimalne aktivnosti radiofarmaka koje su dovoljne za detekciju zračenja s ciljem da se neželjene posljedice zračenja svedu na najmanju moguću mjeru. Neki od radionuklida koji se primjenjuju u području medicinske dijagnostike su  $^{131}\text{I}$ ,  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{192}\text{Ir}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  i drugi. Doza zračenja određuje se prema fizikalnim svojstvima radionuklida (vrijeme poluraspada, energija zračenja), fizikalno-kemijskim i biološkim svojstvima radiofarmaka (kemijska stabilnost, *in vivo* razdioba i metabolički put u organizmu uz brzinu izlučivanja iz organizma) te količini radioaktivnosti primijenjenoga pripravka. U terapijske svrhe koristi se biološko djelovanje ionizirajućeg zračenja, budući da u interakciji sa stanicama živih organizama može izazvati promjene u njihovoj funkciji, poremećaje u dijeljenju, promjene na genima i, u konačnici, smrt same stanice. Najšira uporaba ionizirajućeg zračenja u terapiji je u području onkologije. Apsorbirane doze ionizirajućeg zračenja trebaju biti dostatne za uništenje većine stanica unutar ciljanog volumena tumora. U terapiji ionizirajućim zračenjem ne može se, nažalost, izbjeći izlaganje zračenju zdravih stanica pa, osim tumorskih, stradavaju i zdrave. Pri planiranju terapije zračenjem uvijek je cilj ovaj efekt smanjiti na minimum. [19] [6]

## 2.6.2. Primjena u industriji

Osim u medicini, ionizirajuće zračenje se koristi i u raznim industrijama. Neke od primjena u industriji su industrijska radiografija, detektori dima, sterilizacija te pri izradi nekih instrumenata za mjerenje ili praćenje određenih aktivnosti.

Industrijska radiografija je tehnika snimanja pomoću ionizirajućeg zračenja kako bi dobili pregled unutrašnjeg oblika nekog objekta. Slične tehnike koriste se i na zračnim lukama za pregled prtljage i tijela. Snop rendgenskih zraka projicira se prema objektu. Objekt apsorbira određenu količinu rendgenskih zraka, ovisno o gustoći i strukturnom sastavu. Rendgenske zrake koje prolaze kroz objekt snimaju se pomoću detektora. Na ovaj način stvaramo dvodimenzionalnu sliku. Ova tehnika naziva se projekcijska radiografija. Industrijska radiografija ili postupak nedestruktivnog testiranja koristi se za kontrolu i nadzor, tj. dobivanje slike unutrašnjosti cijevi, zidova i mnoštvo drugih objekata u potrazi za mogućim nepravilnostima i propustima. Kao izvor koristit se izvor radioaktivnog materijala ( $^{192}\text{Ir}$ ) ili

rendgenski uređaj. [20] [21]

Određeni mjerni instrumenti u sebi sadrže radioaktivne materijale koji emitiraju gama zračenje ili neutrone. Ovi uređaji, koji mogu biti prijenosni ili postavljeni u fiksni položaj, mogu pratiti protok tekućina; mogu mjeriti i kontrolirati debljinu metala, filmova, papira i plastike. Također, mogu pratiti gustoću materijala. Neki se uređaji za mjerenje također koriste za određivanje sadržaja materijala, kao u slučaju mjerača gustoće vlage koji se često koristi za određivanje sadržaja vode u tlu. Mjerni uređaji predstavljaju najširu upotrebu ionizirajućeg zračenja u industriji. [22]

Neki uređaji za zračenje koriste se za sterilizaciju potrošačkih proizvoda. Uređaji koji se koriste za to sadrže zatvoreni izvor ili izvore koji emitiraju gama zračenje. Ovi uređaji emitiraju vrlo velike količine zračenja i zahtijevaju značajnu zaštitu prilikom rukovanja. Procesom se uništavaju bakterije na proizvodu. [23]

Najčešći detektori dima sadrže male količine radioaktivnog izotopa  $^{241}\text{Am}$ , koji se proizvede nuklearnim reakcijama. Alfa-čestica, koja se emitira u raspadom, ionizira zrak i stvori malu struju naboja koja se mjeri osjetljivim uređajem. Kada dim uđe u detektor, ioni se uhvate na česticama dima, što umanjuje struju naboja u detektoru. Ako se to dogodi, alarm se uključi. Kako je prevaljena udaljenost alfa-čestica izuzetno mala u zraku, ne postoji rizik zračenja od ovakvih detektora. Nakon svoje uporabe, ovi se detektori moraju prikladno odlagati kao radioaktivni otpad. [24]

### **2.6.3. Nuklearne elektrane**

Nuklearne elektrane proizvode toplinsku energiju u nuklearnom reaktoru kontroliranom fisijom uranija ili plutonija koju pretvaraju u električnu energiju. Unutar Europske unije, 13 zemalja posjeduje nuklearne elektrane (Belgija, Bugarska, Češka, Finska, Francuska, Mađarska, Njemačka, Nizozemska, Rumunjska, Slovačka, Slovenija, Španjolska i Švedska) i proizvele su oko 24,6% ukupne električne energije proizvedene u EU-u 2020. godine. Najviše energije je proizvela Francuska. [25]

Osim po izvoru topline, nuklearne elektrane vrlo su slične elektranama na ugljen. Međutim, one zahtijevaju različite sigurnosne mjere budući da uporaba nuklearnog goriva ima znatno drugačija svojstva od ugljena ili drugih fosilnih goriva. Svoju toplinsku snagu dobivaju cijepanjem jezgri atoma u jezgri svog reaktora, pri čemu je uranij dominantan izbor goriva. Torij se također može koristiti u proizvodnji nuklearne energije, no trenutno se ne koristi. [26]

#### **Nuklearna elektrana Krško**

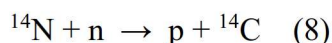
Hrvatska na svom području nema nuklearnu elektranu, ali je vlasnik 50 % NE Krško smještene u Sloveniji, 38 km zračne linije od Zagreba. Elektrana svojom proizvodnjom pokriva oko 20 % potreba

Slovenije za električnom energijom i 16 % potreba Hrvatske. S komercijalnom proizvodnjom je započela 1. siječnja 1983. godine. [27]

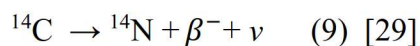
## 2.6.4. Određivanje starosti metodom $^{14}\text{C}$

Određivanje starosti metodom radioaktivnog izotopa ugljika,  $^{14}\text{C}$  je vrlo pogodna metoda za apsolutno datiranje materijala organskog porijekla starosti do oko 60 000 godina. U živim bićima uspostavljena je ravnoteža između gubitka  $^{14}\text{C}$  uslijed radioaktivnog raspada i nadoknađivanja iz atmosfere. Nakon smrti organizma prestaje i izmjena tvari pa se koncentracija  $^{14}\text{C}$  smanjuje radioaktivnim raspadom te je moguće odrediti koliko je vremena proteklo od smrti organizma. [29]

Ugljik se u prirodi nalazi u obliku triju izotopa,  $^{12}\text{C}$  (98,9 %),  $^{13}\text{C}$  (1,1 %) i  $^{14}\text{C}$  ( $10^{-10}$  %), od kojih je jedino  $^{14}\text{C}$  radioaktivan.  $^{14}\text{C}$  nastaje u atmosferi međudjelovanjem neutrona iz kozmičkog zračenja i jezgara dušika.



Nastali  $^{14}\text{C}$  atomi oksidiraju u  $^{14}\text{CO}_2$ , koji se s oksidima drugih ugljikovih izotopa jednoliko raspodjeljuje po cijeloj atmosferi, hidrosferi i biosferi te tako ulazi u životni ciklus biljaka, životinja i ljudi. Jezgra izotopa  $^{14}\text{C}$  raspada se  $\beta$ -raspadom, pri čemu se emitira elektron maksimalne energije 156 keV, a dio energije odnosi antineutrino:



Radioaktivni ugljik  $^{14}\text{C}$  se, vezan u ugljikovu dioksidu ( $\text{CO}_2$ ), brzo i ravnomjerno širi cijelom biosferom. Njegova se količina u atmosferi nije mijenjala kroz dugo razdoblje - zapravo, bila je konstantna sve do 1950-ih, kada je testiranjem termonuklearnog oružja u velikim količinama bio proizveden i raspršen u okoliš. Iz atmosfere  $^{14}\text{C}$  prelazi izravno u biljke i neizravno, preko hranidbenoga lanca, u druge žive organizme. Zbog toga je u živim bićima omjer  $^{12}\text{C}$  i  $^{14}\text{C}$  konstantan. Kada se smrću prekine izmjena tvari između organizma i atmosfere, radioaktivni raspad ne zaustavlja se i organska tvar počinje gubiti  $^{14}\text{C}$ . Određivanjem preostalog  $^{14}\text{C}$  u nekom uzorku nežive tvari može se izračunati koliko je vremena prošlo od trenutka smrti. Vrijeme poluraspada ugljika  $^{14}\text{C}$  iznosi 5730 god. Ustanovi li se, npr., da neki komad drveta ili drvenog ugljena sadrži upola manje ugljika  $^{14}\text{C}$  nego živo stablo, zaključuje se da je taj komad drveta ili ugljena star 5730 god. Ako sadrži samo četvrtinu količine  $^{14}\text{C}$  koju je imao dok je drvo bilo živo, star je 11 460 god. itd. Geiger-Müllerovim brojiлом mogu se odrediti i ekstremno male količine tog izotopa. U živom drvetu od jednoga bilijuna atoma ugljika samo je jedan radioaktivan, u jednom gramu svježeg uzorka ugljika dogodi se približno 13,5 raspada u minuti. Danas se može odrediti starost organske tvari: pergamenta, odjeće, fosila, ljudskih i životinjskih kostiju itd., od 500 do 50 000 god. Metoda se primjenjuje u arheologiji, antropologiji, geologiji, geofizici. [57]

## 2.7. Radioaktivni otpad

Radioaktivni otpad je materijal koji sadrži prirodne radioaktivne nuklide kao i nuklearnim reakcijama umjetno stvorene radionuklide u udjelima većima od prirodnih, a nema praktičnu primjenu. Potencijalno je opasan za okoliš i zdravlje stanovništva pa ga valja tretirati na prikladan način. Radioaktivni otpad nastaje procesiranjem tvari (npr. ugljen, nafta, plin, minerali) koje sadrže radionuklide prirodnih uranijevih i torijevih nizova. Također, nastaje korištenjem radionuklida u dijagnostičke i terapijske svrhe u medicinskim ustanovama, njihovim korištenjem u industriji te znanstvenoistraživačkim ustanovama, ali u manjim količinama. Najveće količine nastaju kao posljedica aktivnosti nuklearnih elektrana. [30]

Radioaktivni otpad dijeli se prema sadržaju radionuklida te njihovom vremenu poluraspada. Međunarodno su prihvaćene sljedeće kategorije radioaktivnog otpada: vrlo nisko, nisko, srednje i visoko radioaktivan otpad.

**Vrlo nisko radioaktivni otpad (VNRAO)** – sadrži zanemarivu specifičnu aktivnost pa nije opasan za okoliš i zdravlje pučanstva i može se zbrinjavati na isti način kao i standardni komunalni otpad.

**Nisko radioaktivni otpad (NRAO)** – sadrži radionuklide s kratkim vremenom poluraspada, male specifične aktivnosti i zanemariv udjel radionuklida s dugim vremenom poluraspada, a zbrinjava se u površinskim odlagalištima.

**Srednje radioaktivni otpad (SRAO)** – nastaje u pogonu nuklearnih reaktora i pri razgradnji nuklearnih elektrana. Otpad se prvo solidificira u betonu ili bitumenu, a konačno zbrinjavanje ovisi o vremenu poluraspada prisutnih radionuklida. Otpad koji sadrži radionuklide s kratkim vremenom poluraspada zbrinjava se u površinskom odlagalištu, dok se otpad s radionuklidima s dugim vremenom poluraspada zbrinjava u dubokim podzemnim odlagalištima.

**Visoko radioaktivni otpad** – sadrži velik udjel radionuklida u obliku fisijjskih produkata i transuranijskih (dugoživućih) elemenata koji se stvaraju u jezgri reaktora, a zbrinjava se u dubokim podzemnim odlagalištima. Taj otpad stvara i značajnu količinu topline, tako da se prije konačnoga zbrinjavanja treba godinama hladiti. [31] [30]

### 2.7.1. Prirodni radioaktivni materijali

Na trima lokacijama u RH nalaze se prirodni radioaktivni materijali koji moraju biti pod regulatornim nadzorom. To su lokacije Plomin, Kaštel Sućurac i Kutina. U prvim dvama slučajevima radi se o pepelu i šljaci koji su nastali izgaranjem ugljena s povišenim koncentracijama uranija i radija. U slučaju lokacije u Kutini, radi se o fosfogipsu koji nastaje preradom fosfatne rude u gnojivo, a u kojem je povišena koncentracija radija koji je nastao raspadom uranija.



Na lokaciji Plomin nalazi se deponij pepela i šljake koji predstavljaju produkt sagorijevanja ugljena u TE Plomin 1 i TE Plomin 2. Procijenjeno je kako je od 1970. do 2001. godine na lokaciji deponirano oko 900.000 m<sup>3</sup> pepela i šljake nastale radom TE Plomin 1, koja je koristila lokalne ugljene s visokim koncentracijama uranija i radija. Godine 2000. uređen je deponij tako da se na najmanju moguću mjeru smanjio radiološki utjecaj odloženog materijala na ljude i okoliš. Od početka rada TE Plomin 2 obje elektrane koriste uvozni ugljen niske koncentracije prirodnih radionuklida pa pepeo i šljaka, koji nastaju nakon 2000. godine, nisu pod regulatornim nadzorom Zavoda te se dijelom koriste u tehnološkim procesima proizvodnje cementa. [32]

## 2.8. Dozimetrijske veličine

Dozimetrija je mjerenje i računanje energije koju zračenje predaje tvari, proučavanje utjecaja različitih vrsta ionizirajućega zračenja na tvari, tkiva i organe i mjerenje brzine raspadanja radioaktivne tvari. [33]

### 2.8.1. Zaštitne dozimetrijske veličine

#### Apsorbirana doza

Apsorbirana doza, znak  $D$ , dozimetrijska veličina koja opisuje povećanje unutrašnje energije (fizičke i kemijske učinke) u tvari izloženoj ionizirajućem zračenju. [34]

Apsorbirana doza  $D$  je omjer srednje vrijednosti energije ionizirajućeg zračenja predane materijalu mase  $dm$ . Osnovna fizikalna mjerna jedinica apsorbaranje doze je grej, znak Gy ili J/kg. Doza u nekoj točki računa se prema sljedećoj formuli:

$$D = \frac{d\bar{\epsilon}}{dm} \quad (9)$$

gdje je  $d\bar{\epsilon}$  srednja vrijednost energije koju je apsorbirala tvar mase  $dm$ . Treba naglasiti da  $D$  predstavlja energiju po jedinici mase koja će ostati u promatranoj točki i proizvesti efekte povezane sa zračenjem. Neki od tih efekata su proporcionalni s  $D$ , a neki ovise o dozi na kompliciranije načine. [35]

#### Ekvivalentna doza

Ekvivalentna doza, znak  $H$ , je dozimetrijska veličina koja opisuje biološki učinak određenog ionizirajućega zračenja u određenom tkivu. Definirana je kao umnožak apsorbarane doze i težinskih faktora. [36]

Ekvivalentna doza  $H_T$  za tkivo ili organ  $T$ , jednaka je produktu težinskog faktora zračenja  $w_R$ , za vrstu zračenja  $R$ , i apsorbarane doze za tkivo ili organ  $D_T$ .

$$H_T = w_R \cdot D_T \quad (10)$$

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

$$H_T = \sum w_R \cdot D_{T,R} \quad (11)$$

Težinski faktor zračenja ( $w_R$ ) koristi se za izjednačavanje različitih vrste zračenja za različite biološke učinke. Ekvivalentna doza izražava se u mjernoj jedinici sivert (Sv) ili J/kg. To znači da će 1 Sv alfa zračenja imati isti biološki učinak kao 1 Sv beta zračenja. Drugim riječima, ekvivalentna doza daje jednu jedinicu koja predstavlja stupanj štete koju bi različite vrste zračenja prouzročile istom tkivu. [5]

**Tablica 2.** Težinski faktor zračenja [37]

Tip zračenja	Težinski faktor zračenja ( $w_R$ ) <sup>1</sup>
Fotoni, elektroni i mioni	1
Protoni i pioni s nabojem	2
Alfa čestice, fragmenti fisije, teški ioni/teške jezgre	20
Neutroni, $E_n < 1 \text{ MeV}$	$2,5 + 18,2 e^{-[\ln(E_n)]^2/6}$
Neutroni, $1 \text{ MeV} \leq E_n \leq 50 \text{ MeV}$	$5,0 + 17,0 e^{-[\ln(2 E_n)]^2/6}$
Neutroni, $E_n > 50 \text{ MeV}$	$2,5 + 3,25 e^{-[\ln(0.04 E_n)]^2/6}$

### Efektivna doza

Različita tkiva su različito osjetljivi na zračenje. Naprimjer, koštana srž je osjetljivija na zračenje od mišića. Zato koristimo efektivnu dozu koja uzima u obzir učinak zračenja na organe. Efektivna doza, znak E, dozimetrijska veličina koja opisuje učinak ionizirajućega zračenja na cijelo ljudsko tijelo. Ona je zbroj ekvivalentnih doza u pojedinim dijelovima tijela pomnoženih empirijski određenim modifikacijskim faktorima ozračenosti. [38]

Efektivna doza E jednaka je sumi (po svim organima i tkivima T) produkata ekvivalentne doze  $H_T$  i odgovarajućeg težinskog faktora tkiva  $w_T$ :

$$H_T = \sum_T w_T \cdot H_T \quad (12)$$

<sup>1</sup> Sve vrijednosti odnose se na vanjsko upadno zračenje na tijelo ili u slučaju unutarnjih izvora zračenja, iz radionuklida koji su ugrađeni u tijelo.

Težinski faktor tkiva  $w_T$ , za organ ili tkivo T, predstavlja relativni doprinos tog organa ili tkiva ukupnoj šteti koja proizlazi iz stohastički efekta za ravnomjerno ozračivanje cijelog tijela. Mjerna jedinica za efektivnu dozu je joule po kilogramu (J/kg), odnosno sievert (Sv). [39]

**Tablica 3.** Težinski faktor tkiva [37]

Tkivo	Težinski faktor tkiva ( $w_T$ )
<b>Koštana srž (crvena), debelo crijevo, pluća, želudac, grudi</b>	0,12
<b>Spolne žlijezde</b>	0,08
<b>Mjehur, jednjak, jetra, štitna žlijezda</b>	0,04
<b>Površina kostiju, mozak, žlijezde slinovnice, koža</b>	0,01
<b>Ostala tkiva<sup>2</sup></b>	0,12

## 2.8.2. Operativne dozimetrijske veličine

Zaštitne dozimetrijske veličine ne mogu se direktno mjeriti pa se zbog toga koriste operativne veličine. Operativne veličine se koriste za procjenu gornjih granica vrijednosti zaštitnih veličina koje su vezane za izlaganje ionizirajućem zračenju. Za doze u blizini ili iznad graničnih doza potrebno je imati dodatne informacije o karakteristikama zračenja na radnom mjestu i karakteristikama odziva dozimetra u cilju potvrđivanja prikladnosti korištenja operativnih veličina za određivanje efektivne doze, ekvivalentne doze za lokalno područje kože ili ekvivalentne doze za leću ili ekstremitete.

Operativne dozimetrijske veličine možemo podijeliti na one namijenjene nadzoru prostora i za osobni nadzor.

Za nadzor prostora koriste se:

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

Ovi dozni ekvivalenti definirani su kao dozni ekvivalenti na dubinama 10 mm i 0,07 mm sfere radijusa 30 cm sačinjene od ICRU četveroelementnog tkiva. Ambijentalni dozni ekvivalent  $H^*(10)$  je veličina koja je povezana sa efektivnom dozom i općenito se koristi za buduće procjene, kategorizaciju radnih prostora, provjeru učinkovitosti debljine zaštite i slično.  $H'(0,07)$  se koristi za nadzor prostora pri

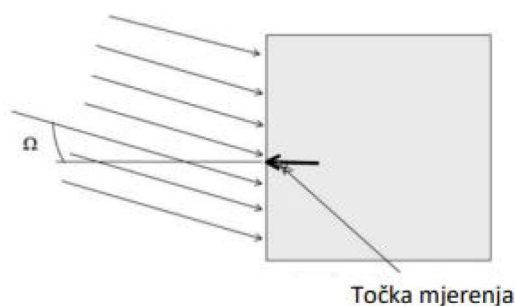
<sup>2</sup> Ostala tkiva su: nadbubrežne žlijezde, ekstratorakalno područje (ET), žučna vrećica, srce, bubrezi, limfni čvorovi, mišići, sluznica usne šupljine, gušterača, prostata (muškarci), tanko crijevo, slezena, prsna žlijezda, maternica/grlič maternice (žene).

određivanju doze za kožu i ostala površinska tkiva.

Za osobni nadzor koriste se **osobni dozni ekvivalenti**:

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

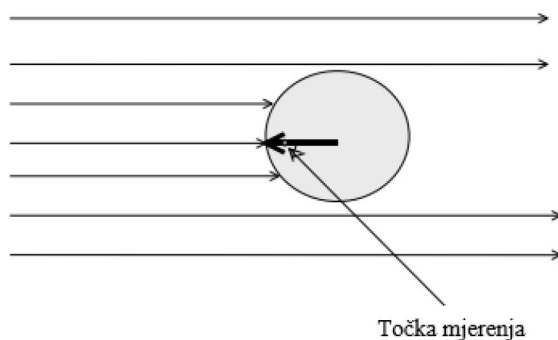
Osobni dozni ekvivalenti definirani su kao dozni ekvivalenti za meko tkivo na dubinama od 10 mm, 3 mm i 0,07 mm, unutar tijela ispod definirane točke na površini tijela. Za  $H_p(10)$  ta točka podudara se s položajem dozimetra na tijelu. [41] [35]



**Slika 5.** Definicija osobnog doznog ekvivalenta pomoću ICRU ploče [43]

### Ambijentalni dozni ekvivalent - $H^*(10)$

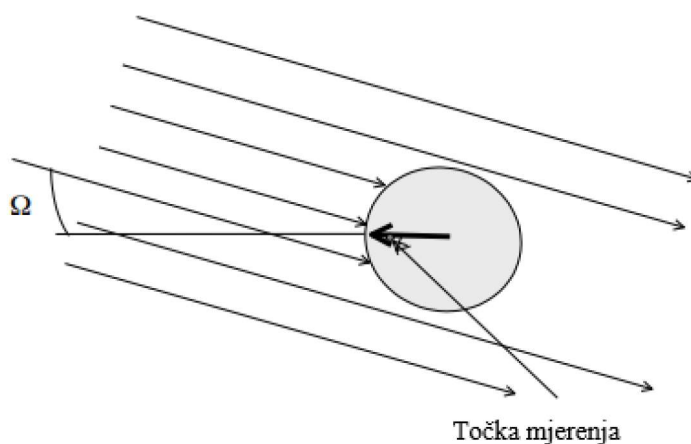
Ambijentalni dozni ekvivalent u točki radijacijskog polja  $H^*(10)$  definira se kao dozni ekvivalent koji bi proizvelo usmjereno i prošireno polje u ICRU sferi na dubini  $d$ , koja je definirana na radijvektoru suprotne orijentacije od vektora usmjerenog polja. ICRU sfera je teoretska sfera "ekvivalent tkiva" promjera 30 cm koja se sastoji od materijala gustoće  $1 \text{ gcm}^{-3}$  i maseni sastav od 76,2 % kisika, 11,1 % ugljika, 10,1 % vodika i 2,6 % dušika. Ovaj materijal je najbliži ljudskom tkivu po svojim apsorpcijskim svojstvima. Kod vrlo prodornog zračenja, uzima se dubina 10 mm. Jedinica za ambijentalni dozni ekvivalent je sivert (Sv). [42][43]



**Slika 6.** Definicija ambijentalnog doznog ekvivalenta [43]

### Dozni ekvivalent smjera - $H'(0,07)$

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 0,07 mm. Jedinica za dozni ekvivalent smjera je sivert (Sv).



Slika 7. Definicija doznog ekvivalenta smjera

## 2.9. Propisane granične vrijednosti primljene doze zračenja

Izloženost pojedinca ionizirajućem zračenju mora biti ograničena prema Zakonu o radiološkoj i nuklearnoj sigurnosti. Granice primjene doza zračenja propisane su Pravilnikom o granicama ozračenja, preporučenom doznom ograničenju i procjenjivanju osobnog ozračenja. U Pravilniku su navedene granice ozračenja za pojedinog stanovnika i za radnike izložene ionizirajućem zračenju tijekom svog rada bilo na izravan ili neizravan način. Pravilnikom su također utvrđene i granice ozračenja određenih ljudskih tkiva i organa. [37]

### Granice ozračenja za izložene radnike

Efektivna doza izloženog radnika ne smije biti viša od 20 mSv u jednoj godini.

Uz prethodni uvjet, primjenjuju se sljedeće granice za ekvivalentnu dozu izloženih radnika:

1. ekvivalentna doza za leću oka izloženog radnika ne smije biti viša od 20 mSv u jednoj godini ili od 100 mSv u bilo kojih pet uzastopnih godina, pri čemu maksimalna ekvivalentna doza za leću oka u jednoj godini petogodišnjeg razdoblja ne smije biti viša od 50 mSv

2. ekvivalentna doza za kožu izloženog radnika ne smije biti viša od 500 mSv u jednoj godini usrednjena preko 1 cm<sup>2</sup> površine bilo kojeg dijela kože, neovisno o površini koja je ozračena
3. ekvivalentna doza za ekstremitete izloženog radnika ne smije biti viša od 500 mSv u jednoj godini. [37]

**Granice ozračenja pripravnika i studenata, u dobi od 16 do 18 godina,** koji u sklopu svoje obuke ili obrazovanja imaju obvezu raditi s izvorima zračenja ne smiju biti više od:

1. 6 mSv u jednoj godini za efektivnu dozu
2. 15 mSv u jednoj godini za ekvivalentnu dozu za leću oka
3. 150 mSv u jednoj godini za ekvivalentnu dozu za kožu, usrednjenu preko 1 cm<sup>2</sup> površine bilo kojeg dijela kože, neovisno o površini koja je ozračena
4. 150 mSv u jednoj godini za ekvivalentnu dozu za ekstremitete. [37]

**Granica ozračenja za pojedinog stanovnika:**

1. Efektivna doza pojedinog stanovnika ne smije biti veća od 1 mSv u jednoj godini.
2. Ekvivalentna doza za leću oka pojedinog stanovnika ne smije biti veća od 15 mSv u jednoj godini.
3. Ekvivalentna doza za kožu, usrednjena preko 1 cm<sup>2</sup> površine bilo kojeg dijela kože neovisno o površini koja je ozračena, pojedinog stanovnika ne smije biti veća od 50 mSv u jednoj godini. [37]

## **2.10. Mjere zaštite od zračenja**

Zakon o radiološkoj i nuklearnoj sigurnosti navodi da je cilj mjera koje se odnose na zaštitu od zračenja izbjegavanje nepotrebne izloženosti zračenju, točnije dodatne kontaminacije.

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. Radi se o, tzv. ALARA (As Low As Reasonably Achievable) principu. [44]

Najvažniji čimbenici koji utječu na primljenu dozu zračenja su:

- udaljenost osobe od izvora zračenja - primljena doza zračenja je to manja što je veća udaljenost

od izvora zračenja (intenzitet zračenja opada s kvadratom udaljenosti od izvora)

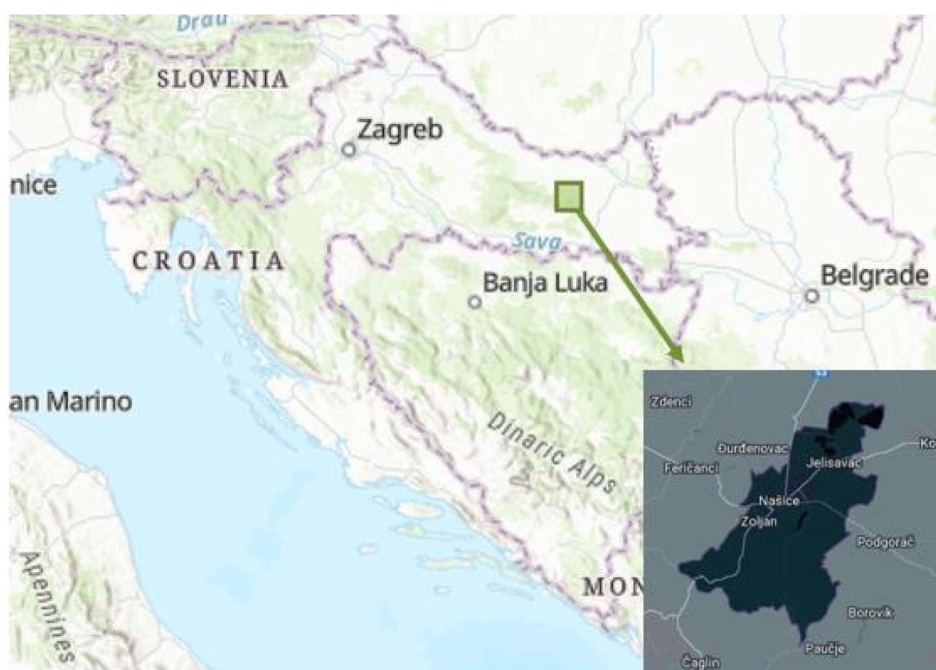
- vrijeme izloženosti osobe zračenju – što je vrijeme izloženosti zračenju manje, doza primljenog zračenja je manja
- štitovi – barijere od olova, betona ili vode pružaju zaštitu od prodiranja gama zraka i rendgenskih zraka. To je razlog zašto se određeni radioaktivni materijali skladište pod vodom ili u betonskim ili olovnim prostorijama i zašto stomatolozi stavljaju olovni pokrivač na pacijente koji primaju rendgenske snimke svojih zuba. Stoga će umetanje odgovarajućeg štita između osobe i izvora zračenja uvelike smanjiti ili eliminirati dozu koju osoba prima.

Udaljenost i vrijeme imaju najbolji učinak na kontrolu razine izloženosti ionizirajućem zračenju. U slučaju izvanrednog događaja, bitno je da se odmah napusti kontaminirano područje. [45]

### 3. Mjerenje brzine ambijentalnog doznog ekvivalenta u Našicama

Našice su grad u Slavoniji, 50 km zapadno od Osijeka, a nalazi se na 154 metara nadmorske visine (središte grada), gdje sjeverni obronci Krndije prelaze u nizinu istočno hrvatske ravnice. Gradu Našicama pripada i administrativno područje od 16 naselja (stanje 2006.), a to su: Brezik Našički, Ceremošnjak, Gradac Našički, Granice, Jelisavac, Lađanska, Lila, Londžica, Makloševac, Markovac Našički, Martin, Našice, Ribnjak, Velimirovac, Vukojevci i Zoljan. Najbliža je mjerna postaja Zoljan kod Našica koja kao cilj mjerenja ima praćenje onečišćenja zraka uzrokovano radom cementare NEXE d.d. Prema Godišnjem izvješću o rezultatima praćenja kvalitete zraka na automatskoj postaji za praćenje kvalitete zraka Zoljan u 2021. godini, zrak na području Našica za 2021. godinu klasificiran je kao zrak I kategorije<sup>3</sup> u odnosu na NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> i lebdeće čestice PM<sub>10</sub><sup>4</sup> s obzirom na zaštitu zdravlja ljudi. [46]

Istraživački dio ovog rada obuhvatio je mjerenje brzine ambijentalnog doznog ekvivalenta  $H^*(10)$  na području Našica, a cilj mjerenja bio je procjena mogućeg ozračenja stanovništva te identificiranje potencijalnih izvora ionizirajućeg zračenja kao i utjecaj rada cementare NEXE d.d. na ozračenje stanovništva. Na kraju su dobivenim podacima pridruženi odgovarajući položajni i atributni podatci te je napravljen grafički prikaz podataka.



Slika 8. Našice (karta i smještaj u Republici Hrvatskoj)

<sup>3</sup> čisti ili neznatno onečišćen zrak - nisu prekoračene granične vrijednosti kakvoće zraka (GV) niti za jednu onečišćujuću tvar  
<sup>4</sup> PM<sub>10</sub> ili grube čestice su one koje imaju promjer manji od 10 mikrometara (μm), primjerice prašina ili pelud



### 3.1. Materijali i metode

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. Mjerni instrument PM1605 (Personal radiation monitor/dosimeter)
4. Konfiguracijski softver za PM1605
5. ArcGIS
6. OruxMaps GP.

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

RDS-31 mali je ručni mjerni instrument na baterije koji koristi GM cijev kao primarni detektor. Ima širok raspon primjene u civilnoj obrani, vatrogastvu, sustavu za spašavanje, industriji, u laboratorijima itd. zbog svoje svestrane primjene i robusne konstrukcije. Uz prateći konfiguracijski softver, jednostavno se može optimizirati rad ovog mjernog instrumenta da bi se zadovoljili različiti uvjeti primjene. Funkcije izbornika koje su dostupne korisniku su raznolike. Može se odabrati između najnužnijih (svjetlosna aktivacija) do funkcije koje omogućuju postavljanje ograničenja alarma, ponovno postavljanje doze i konfiguracije funkcija histograma. Uz upotrebu odgovarajućih vanjskih sondi, koristi se i za detekciju alfa i beta zračenja.

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. 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. 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. [47] [48]

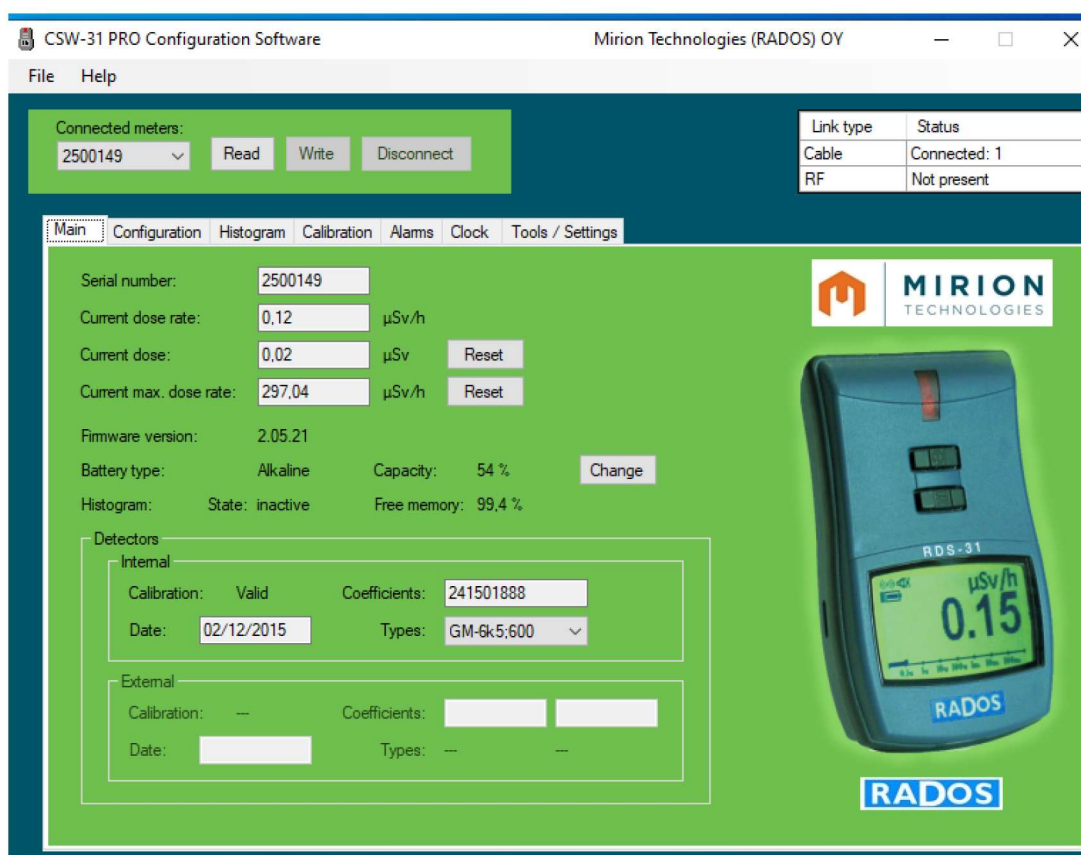


**Slika 9.** RDS-31 S/R Multi-Purpose Survey Meter [47]

## Konfiguracijski softver CSW-31 za uređaj RDS-31

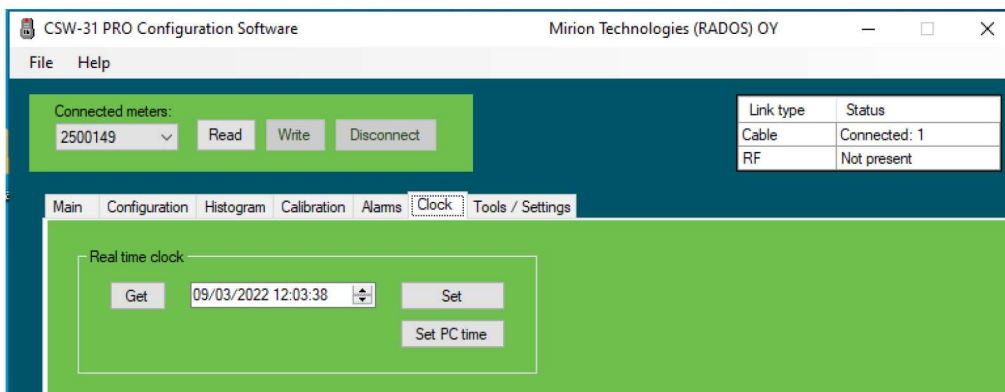
CSW-31 konfiguracijski je softver za RDS-31, a temeljna mu je zadaća povezivanje mjernog instrumenta i računala putem RF ili USB komunikacijske veze. Softver daje mogućnost izmjene postavki i funkcija mjernog instrumenta, ali i postavljanje različitih parametara koji olakšavaju provedbu pojedinih mjerenja, kao što su alarmi i izvoz mjernih podataka iz histograma. [49]

Prije spajanja uređaja i računala, na računalu je potrebno instalirati računalni program CSW-31. Program u sebi sadrži sedam kartica: Main, Configuration, Histogram, Calibration, Alarms, Clock i Tools/Settings. Unutar kartice Main (slika 10.) nalaze se opći podaci: serijski broj uređaja, trenutna brzina doze, iznos trenutne doze, maksimalna brzina doze, vrsta baterije, stanje baterije te stanje memorije histograma. Također, na toj kartici vidimo i status povezanosti uređaja i računala. Kada je uspostavljena komunikacijska veza između uređaja i konfiguracijskog softvera, u tablici Link type-Status za status veze će pisati Connected: 1.



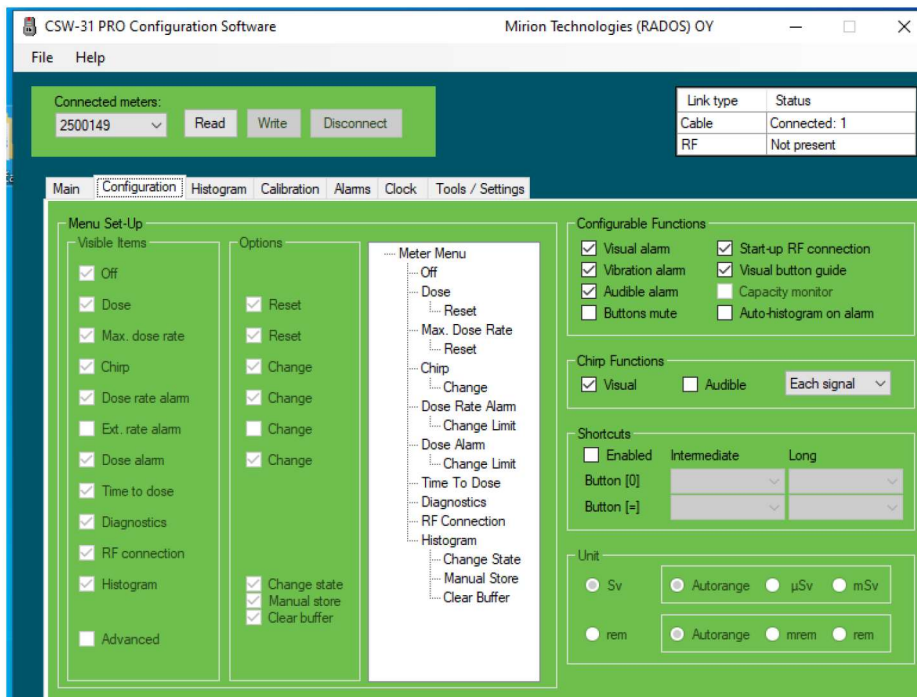
Slika 10. Kartica Main

Na kartici Clock postavljamo sistemski sat uređaja (slika 11.). Podatak o trenutnom datumu/vremenu možemo preuzeti od računala klikom na gumb Set PC time ili ga možemo ručno postaviti klikom na gumb Set. Važno je provjeriti je li sistemski sat uređaja usklađen s trenutnim datumom/vremenom, a to je provjereno klikom na tipku Get.



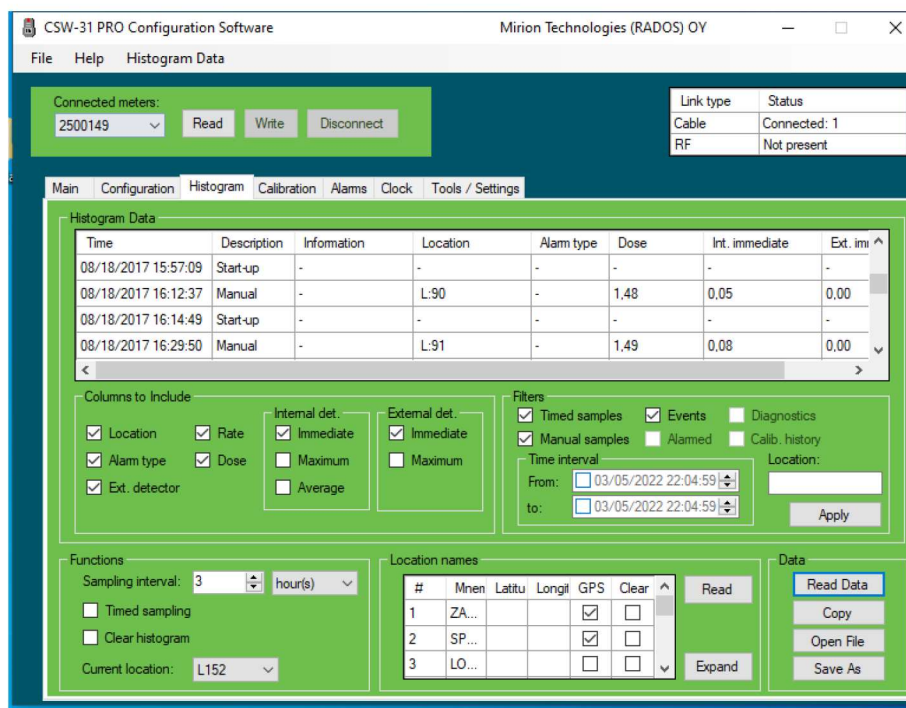
**Slika 11. Kartica Clock**

Na kartici Configuration (slika 12.) odabiremo opcije koje želimo da nam budu vidljive i dostupne u izborniku uređaja. Za svrhu ovog rada uključili smo opciju Manual store za histogram, kako bismo mogli ručno pohraniti podatke o mjerenju.



**Slika 12. Kartica Configuration**

Kartica Histogram (slika 13.) nam omogućuje da dobijemo uvid u dobivene podatke mjerenja s uređaja, klikom na gumb Read Data. Također, ovdje možemo specificirati koje točno podatke, odnosno parametre želimo uključiti u naša mjerenja te imamo mogućnost bilježenja lokacije mjerenja.



Slika 13. Kartica Histogram

### PM1605 (Personal radiation monitor/dosimeter)

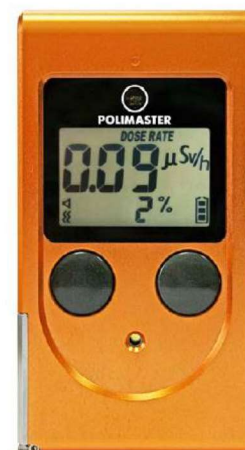
Instrument je dizajniran za mjerenje brzine ambijentalnog doznog ekvivalenta  $H^*(10)$  gama zračenja i rendgenskih zraka (fotonsko zračenje), pretraživanje, otkrivanje i lociranje radioaktivne tvari te prijenos prikupljenih informacija i pohranjenih u trajnoj memoriji instrumenta na osobno računalo (PC).

Instrument mogu koristiti hitne službe, radiološki i izotopni laboratoriji, carinske i granične službe, postrojenja nuklearne industrije itd., za kontrolu ionizirajućeg zračenja i sprječavanje ilegalnog prijenosa radioaktivnih tvari.

Mjerenje zračenja omogućeno je ugrađenim detektorom koji se temelji na Geiger-Mullerovom brojaču. Brojač pretvara kvante fotonskog zračenja u električne impulse.

Algoritam rada instrumenta omogućuje:

- kontinuirano mjerenje
- statističku obradu rezultata mjerenja
- brzu prilagodbu varijaciji intenziteta zračenja (algoritam postavlja vrijeme mjerenja obrnuto intenzitetu zračenja)



Slika 14. PM1605

- online prikaz informacija.

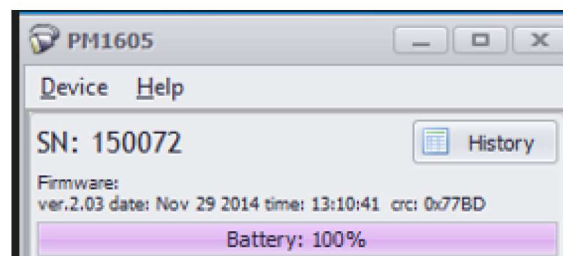
Tipkovnica instrumenta s dvjema tipkama omogućuje korisniku odabir načina rada. Rezultati mjerenja i načini rada prikazani su na LCD ekranu instrumenta. Instrument ima ugrađene svjetlosne, zvučne i vibracijske alarme. Napaja jednom baterijom (tip AA). Instrument se puni kada je spojen na računalo putem USB kabela. Prikupljene informacije pohranjuju se u trajnu memoriju instrumenta. [53]

### Konfiguracijski softver za PM1605

Konfiguracijski softver za PM1605 je sastavni dio instrumenta. Softver omogućava:

- očitavanje informacija o događajima (povijest instrumenta) iz trajne memorije instrumenta
- provođenje *online* mjerenja u stvarnom vremenu i prikaz rezultata na digitalan način
- očitavanje i spremanje postavki rada povezanog instrumenta: granične vrijednosti zračenja, interval spremanja/snimanja povijesti, mjerne jedinice, postavke različitih vrsta alarma
- spremanje povijesti mjerenja na PC (izvoz povijesti). [54]

Prije spajanja uređaja i računala, na računalu je potrebno instalirati računalni program. Softver će uspostaviti vezu s instrumentom i prikazati serijski broj i verziju softvera instrumenta na vrhu glavnog prozora programa (slika 15.)

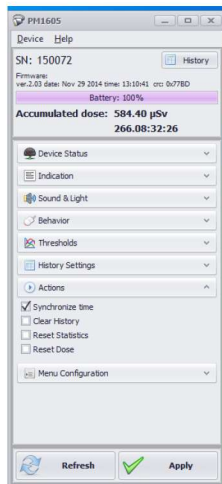


**Slika 15.** Konfiguracijski softver za PM1605

Jednostavno grafičko sučelje glavnog prozora programa predstavlja skup naredbi i alata za interakciju korisnika osobnog računala s povezanim instrumentom i rad s rezultatima mjerenja (slika 16.).

Glavni prozor programa sastoji se od:

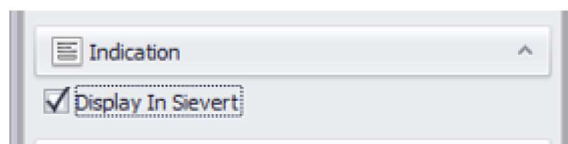
- izbornika glavnog prozora programa (Uređaj, Pomoć)
- polja za prikaz serijskog broja uređaja
- gumba Povijest desno od serijskog broja
- indikatorske trake napunjenosti baterije ispod gumba Povijest
- polja za prikaz akumulirane doze i vremena akumulacije doze nalazi se ispod trake indikacije napunjenosti baterije



**Slika 16.** Glavni prozor programa

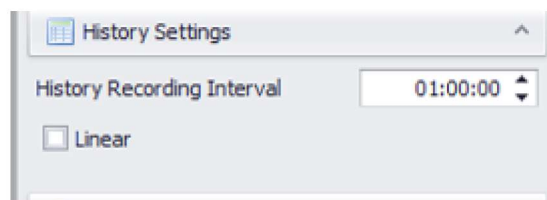
- alatne trake glavnog prozora programa. Alatna traka nalazi se ispod trake s indikatorom napunjenosti baterije. Gumbi alatne trake odgovaraju parametrima postavki instrumenta: status uređaja, pokazivanje, zvuk i svjetlo, ponašanje, pragovi, postavke povijesti, radnje i konfiguracija izbornika.
- gumbi Osvježi i Primijeni nalaze se ispod alatne trake.

Pomoću alatne trake Indication možemo odabrati u kojoj mjernoj jedinici želimo da se prikazuju mjerenja (slika 17.).



**Slika 17.** Alatna traka **Indication**

Pomoću alatne trake History možemo instrument podesiti da samostalno bilježi rezultate mjerenja u određenim intervalima (slika 18.).

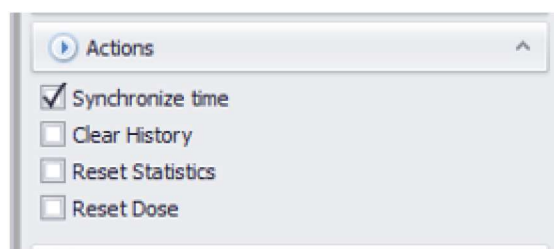


**Slika 18.** Alatna traka **History**

Pomoću alatne trake Actions (slika 19.) možemo:

- sinkronizirati vrijeme – ako je ovaj okvir označen, obavlja se sinkronizacija vremena između instrumenta i računala
- očistiti povijest – ova stavka omogućuje brisanje povijesti instrumenta
- poništiti statistiku – ova stavka omogućuje poništavanje međuspremnik podataka mjerenja koje je akumulirao instrument i mjerenje će započeti iznova

- resetirati dozu – ako je odabran ovaj okvir za potvrdu, provodi se resetiranje ekvivalente doze akumulirane instrumentom, kao i resetiranje vremena akumuliranja doze.



**Slika 19.** Alatna traka **Actions**

Nakon postavljenih postavki, pomoću gumba Primijeni prenosimo odabrane postavke na uređaj. Kartica Gumb History desno od serijskog broja nam omogućuje da dobijemo uvid u dobivene podatke mjerenja te iste prenesemo na računalo (slika 20.).

Time	Event	Dose Rate	Dose	Accuracy
20/03/2021 12:54:43	Measurement Dose Rate and Dose	0.10 µSv/h	265.95 µSv	27%
20/03/2021 13:02:45	Turn On			
20/03/2021 13:02:45	Turn On			
20/03/2021 13:12:45	Turn On			
20/03/2021 13:12:45	Turn On			
20/03/2021 13:12:45	Turn On			
20/03/2021 13:12:45	Turn On			
20/03/2021 13:12:45	Turn On			
20/03/2021 14:12:45	Measurement Dose Rate and Dose	0.10 µSv/h	266.06 µSv	12%
20/03/2021 15:12:45	Measurement Dose Rate and Dose	0.10 µSv/h	266.16 µSv	9%
20/03/2021 16:12:45	Measurement Dose Rate and Dose	0.10 µSv/h	266.26 µSv	7%
20/03/2021 17:12:45	Measurement Dose Rate and Dose	0.10 µSv/h	266.36 µSv	6%
20/03/2021 18:12:45	Measurement Dose Rate and Dose	0.10 µSv/h	266.46 µSv	6%
20/03/2021 19:12:45	Measurement Dose Rate and Dose	0.10 µSv/h	266.55 µSv	5%
20/03/2021 20:12:45	Measurement Dose Rate and Dose	0.09 µSv/h	266.65 µSv	23%
20/03/2021 21:12:45	Measurement Dose Rate and Dose	0.09 µSv/h	266.74 µSv	11%
20/03/2021 22:12:45	Measurement Dose Rate and Dose	0.09 µSv/h	266.84 µSv	8%
20/03/2021 23:12:45	Measurement Dose Rate and Dose	0.09 µSv/h	266.93 µSv	7%
21/03/2021 00:12:45	Measurement Dose Rate and Dose	0.09 µSv/h	267.02 µSv	6%
21/03/2021 01:12:45	Measurement Dose Rate and Dose	0.09 µSv/h	267.12 µSv	6%
21/03/2021 02:12:45	Measurement Dose Rate and Dose	0.10 µSv/h	267.21 µSv	5%

**Slika 20.** Gumb History

## ArcGIS

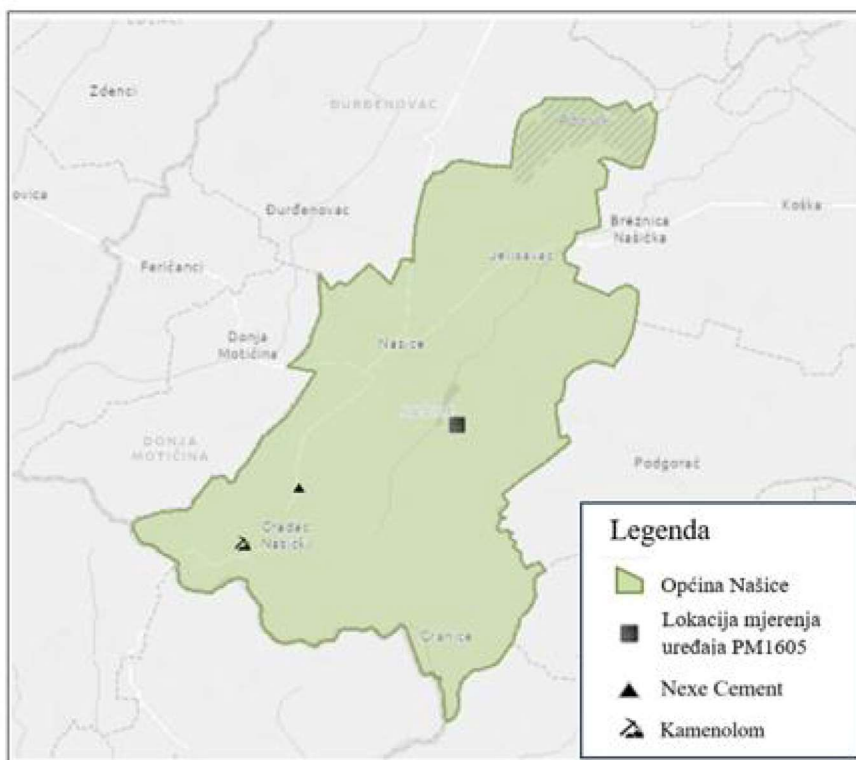
ArcGIS je geoprostorni softver za pregled, uređivanje, upravljanje i analizu geografskih podataka. Razvila ga je tvrtka Esri za stvaranje mapa na stolnom računalu, mobilnom uređaju i *webu*. ArcGis se sastoji od: ArcMap, ArcCatalog, ArcGIS Pro, ArcScene, ArcGlobe te ArcGIS Online. [50][51]

## OruxMaps GP

OruxMaps GP je jednostavna GPS aplikacija za Android mobilne uređaje koja može snimati i pratiti tragove. Također, nudi i mogućnost bilježenja interesnih točaka s dodatnim informacijama (kao što je npr. nadmorska visina, GPS koordinate, vrijeme itd.). Može koristiti izvan mrežne vektorske karte te prikazivati *online* karte ili karte unaprijed preuzete iz raznih izvora ili prethodno napravljene u nekoj drugoj mobilnoj aplikaciji ili programu na računalu. [52]

## 3.2. Prikupljanje podataka

Pomoću uređaja PM1605 prikupljeni su podaci na jednoj lokaciji u razdoblju od 20. 3. 2021. do 4. 8. 2021. Uređaj se nalazio na otvorenom prostoru na visini od 1 m od tla i pod nadstrešnicom (kako mjerni instrument ne bi bio izravno na suncu ili da po njemu ne bi padala kiša).



**Slika 21.** Karta Našica s prikazom lokacije mjerenja uređaja PM1605

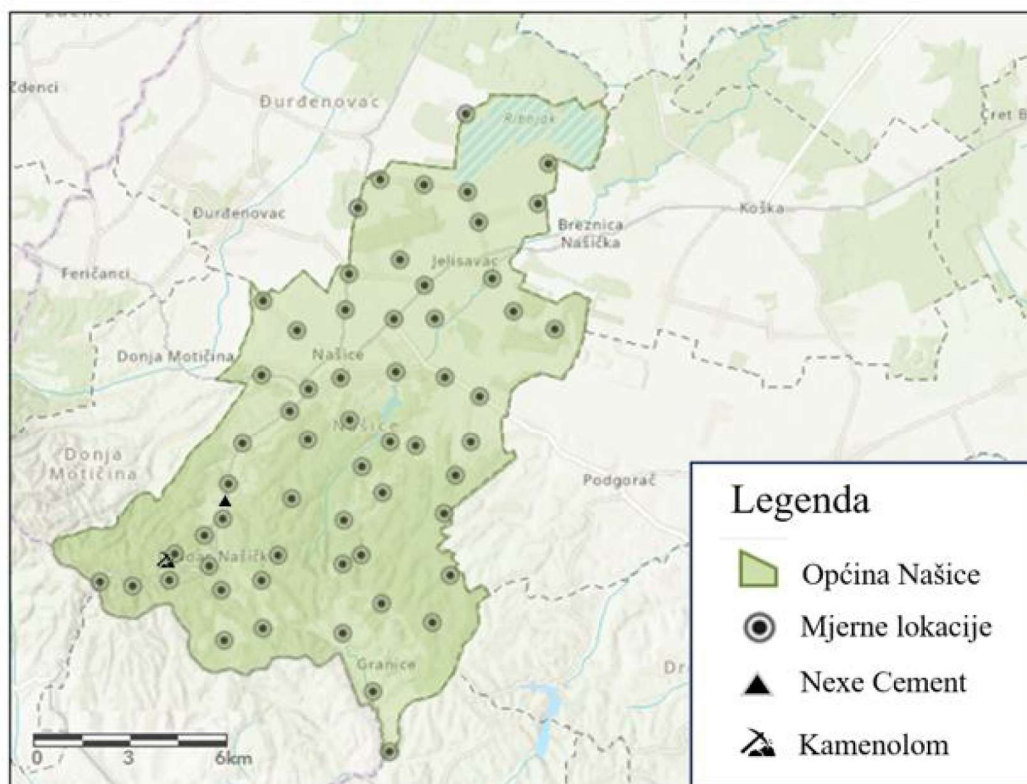
Pomoću uređaja RDS-31 izvršena su mjerenja na 59 različitih lokacija na području Našica. Lokacije se nalaze na naseljenom i nenaseljenom području, industrijskoj zoni te poljoprivrednim i šumskim površinama Našica. Prije početka mjerenja, određene su privremene lokacije programskim putem kako bismo dobili što pravilniji raspored lokacija, a na samom terenu su zatim izvršene prilagodbe.

Prilikom izvođenja mjerenja u obzir su se uzeli sljedeći faktori:

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



Uređaj je postavljen na jednu lokaciju na vrijeme trajanja od otprilike 15 minuta, na visinu od 1 m iznad neobrađene travnate površine. Uređajem su praćene i bilježene vrijednosti ( $H^*(10)$ ) izražene u nSv/h tijekom ožujka i travnja 2022. godine. Pomoću aplikacije OruxMaps GP, bilježene su mjerne točke i pripadne GPS koordinate. Meteorološki podaci za period izvođenja mjerenja 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 minimalne.



**Slika 22.** Prikaz mjernih točaka unutar programa ArcGIS

Rezultati mjerenja uređajem RDS-31 prikazani su u tablici ispod.

**Tablica 4.** Rezultati mjerenja uređajem RDS-31

Oznaka lokacije	Koordinate	Vrijeme	H*(10)/t [nSv/h]	Temperatura zraka [°C]	Tlak zraka [hPa]	Relativna vlažnost zraka [%]	Smjer vjetra [°]	Brzina vjetra [m/s]
LOK 01	45,469905°N 18,115669°E	6.3.2022. 14:52:43	100	2,8	1017,9	90,5	60	2,0
LOK 02	45,444523°N 18,094355°E	6.3.2022. 15:23:13	100	2,8	1017,6	90,5	30	3,0
LOK 03	45,417606°N 18,111665°E	6.3.2022. 15:47:51	110	2,8	1017,6	90,5	60	3,0
LOK 04	45,389210°N 18,107720°E	6.3.2022. 16:06:20	90	2,8	1017,6	90,5	60	3,0
LOK 05	45,492691°N 18,118231°E	6.3.2022. 17:02:22	80	3,6	1018,5	86,0	20	1,0
LOK 06	45,484767°N 18,156877°E	6.3.2022. 17:22:49	90	3,6	1018,5	86,0	20	1,0
LOK 07	45,491642°N 18,056446°E	8.3.2022. 15:26:03	100	6,6	1020,7	40,0	30	2,0
LOK 08	45,487156°N 18,078041°E	8.3.2022. 15:49:48	90	6,6	1020,7	40,0	30	2,0
LOK 09	45,515645°N 18,057177°E	9.3.2022. 15:29:22	70	6,5	1022,4	41,5	260	4,0
LOK 10	45,524288°N 18,096690°E	9.3.2022. 15:57:10	100	6,5	1022,3	41,5	240	3,0
LOK 11	45,520636°N 18,131498°E	9.3.2022. 16:19:28	100	6,5	1022,3	41,5	240	3,0
LOK 12	45,469418°N 18,047657°E	11.3.2022. 15:45:27	80	4,9	1030,2	4,5	100	2,0
LOK 13	45,444574°N 18,038581°E	11.3.2022. 16:06:00	90	4,9	1030,2	4,5	100	2,0
LOK 14	45,425159°N 18,013977°E	11.3.2022. 16:29:46	80	4,9	1030,2	4,5	100	2,0
LOK 15	45,533224°N 18,063987°E	11.3.2022. 16:58:19	110	4,3	1030,7	4,5	20	1,0
LOK 16	45,490746°N 18,092876°E	19.3.2022. 10:50:16	70	9,3	1037,9	38,5	60	3,0
LOK 17	45,506095°N 18,072763°E	19.3.2022. 11:11:49	90	9,3	1037,9	38,5	60	3,0
LOK 18	45,512754°N 18,095049°E	19.3.2022. 11:34:23	100	9,3	1037,9	38,5	60	3,0
LOK 19	45,545517°N 18,100856°E	19.3.2022. 11:55:40	70	9,3	1037,9	38,5	60	3,0

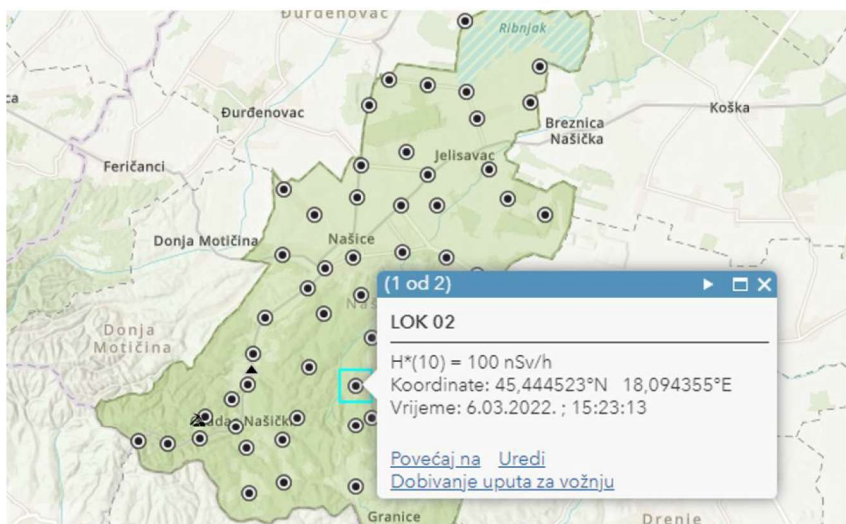
LOK 20	45,554691°N 18,111056°E	19.3.2022. 12:14:42	90	11,0	1036,9	28	110	2,0
LOK 21	45,553066°N 18,131257°E	19.3.2022. 12:32:47	110	11,0	1036,9	28	110	2,0
LOK 22	45,550681°N 18,151312°E	19.3.2022. 12:52:44	120	11,0	1036,9	28	110	2,0
LOK 23	45,540930°N 18,156509°E	19.3.2022. 13:09:39	110	9,9	1036,2	35	60	3,0
LOK 24	45,546922°N 18,183772°E	19.3.2022. 13:31:22	130	9,9	1036,2	35	60	3,0
LOK 25	45,559820°N 18,188546°E	19.3.2022. 13:59:05	120	9,9	1036,2	35	60	3,0
LOK 26	45,575835°N 18,150615°E	19.3.2022. 14:54:59	90	10,0	1035,1	26,5	70	3,0
LOK 27	45,509761°N 18,117388°E	19.3.2022. 15:25:55	100	10,0	1035,1	26,5	70	3,0
LOK 28	45,522811°N 18,162679°E	19.3.2022. 15:48:58	110	10,0	1035,1	26,5	70	3,0
LOK 29	45,512217°N 18,172483°E	19.3.2022. 16:22:06	100	10,3	1034,7	25,5	60	5,0
LOK 30	45,506535°N 18,191482°E	19.3.2022. 16:43:27	120	10,3	1034,7	25,5	60	5,0
LOK 31	45,528880°N 18,120173°E	19.3.2022. 17:22:28	120	10,3	1034,7	25,5	60	5,0
LOK 32	45,509895°N 18,136249°E	19.3.2022. 17:49:34	110	10,3	1034,7	25,5	60	5,0
LOK 33	45,468605°N 18,127419°E	26.3.2022. 10:52:27	120	17,6	1028,1	11,5	150	1,0
LOK 34	45,491001°N 18,140894°E	26.3.2022. 11:19:43	90	17,6	1028,1	11,5	150	1,0
LOK 35	45,469901°N 18,152810°E	26.3.2022. 11:37:31	110	17,6	1028,1	11,5	150	1,0
LOK 36	45,459063°N 18,145738°E	26.3.2022. 11:59:47	110	17,6	1028,1	11,5	150	1,0
LOK 37	45,446611°N 18,141501°E	26.3.2022. 12:22:09	100	18,9	1027,5	11,5	210	2,0
LOK 38	45,426772°N 18,143332°E	26.3.2022. 12:48:33	100	18,9	1027,5	11,5	210	2,0
LOK 39	45,411538°N 18,135077°E	26.3.2022. 13:10:24	110	20,0	1026,5	11,5	110	2,0
LOK 40	45,369767°N 18,115310°E	26.3.2022. 13:49:48	100	20,0	1026,5	11,5	110	2,0
LOK 41	45,408068°N 18,093830°E	26.3.2022. 14:20:06	110	20,1	1025,5	11,5	170	2,0
LOK 42	45,430427°N 18,093791°E	26.3.2022. 14:37:55	110	20,1	1025,5	11,5	170	2,0

LOK 43	45,433311°N 18,102309°E	26.3.2022. 15:00:35	120	20,6	1025,0	11,5	170	2,0
LOK 44	45,461846°N 18,102657°E	26.3.2022. 15:23:55	100	20,6	1025,0	11,5	170	2,0
LOK 45	45,453448°N 18,112159°E	26.3.2022. 15:53:08	120	20,6	1025,0	11,5	170	2,0
LOK 46	45,477227°N 18,096992°E	26.3.2022. 16:43:41	100	19,7	1025,0	11,5	20	1,0
LOK 47	45,451522°N 18,070303°E	26.3.2022. 17:16:07	80	19,7	1025,0	11,5	20	1,0
LOK 48	45,470631°N 18,077795°E	26.3.2022. 17:36:11	120	19,7	1025,0	11,5	20	1,0
LOK 49	45,480043°N 18,069407°E	2.4.2022. 14:25:08	80	4,2	1004,9	100	260	5,0
LOK 50	45,456244°N 18,041202°E	2.4.2022. 14:58:46	120	4,2	1004,9	100	260	5,0
LOK 51	45,439625°N 18,030092°E	2.4.2022. 15:25:18	110	4,0	1004,9	100	260	5,0
LOK 52	45,429778°N 18,032307°E	2.4.2022. 15:47:39	90	4,0	1004,9	100	260	5,0
LOK 53	45,433680°N 18,016448°E	2.4.2022. 16:11:18	150	5,0	1005,1	99	260	3,0
LOK 54	45,423298°N 17,997052°E	2.4.2022. 16:42:05	70	5,0	1005,1	99	260	3,0
LOK 55	45,424674°N 17,982034°E	2.4.2022. 17:05:42	100	5,2	1005,1	99	260	3,0
LOK 56	45,425084°N 18,056433°E	2.4.2022. 17:34:24	100	5,2	1005,1	99	270	2,0
LOK 57	45,405736°N 18,039233°E	2.4.2022. 18:00:21	50	5,0	1005,9	96,5	30	1,0
LOK 58	45,421962°N 18,037877°E	2.4.2022. 18:19:16	110	5,0	1005,9	96,5	30	1,0
LOK 59	45,409627°N 18,057025°E	2.4.2022. 18:41:12	70	5,0	1005,9	96,5	30	1,0

$\overline{H^*(10)}/t$	100
------------------------	-----

### 3.3. Obrada rezultata

Nakon prikupljenih podataka, podaci su objedinjeni i uneseni u programu ArcGIS radi daljnje obrade. Mjerenja su pridružena svojim lokacijama i grafički prikazana unutar programa. Svakoj točki mjerenja uz mjerenje su pridruženi i podaci o koordinatama i vremenu uzrokovanja. Nakon unosa svih potrebnih podataka, dobivena je mogućnost kreiranja upita i analize podataka.



Slika 23. Prikaz atributnih podataka za određenu točku

Također, iz dobivenih rezultata smo izračunali prosječnu vrijednost za brzinu ambijentalnog doznog ekvivalenta za mjerenja izvedena uređajem RDS-31 i PM1605.

### 3.4. Analiza i rasprava dobivenih rezultata

Izravnim mjerenjima uređajem PM1605 na jednoj lokaciji dobivena je prosječna vrijednost za brzinu ambijentalnog doznog ekvivalenta od

$$H^*(10)/t = (100 \pm 50) \text{ nSv/h.} \quad (13)$$

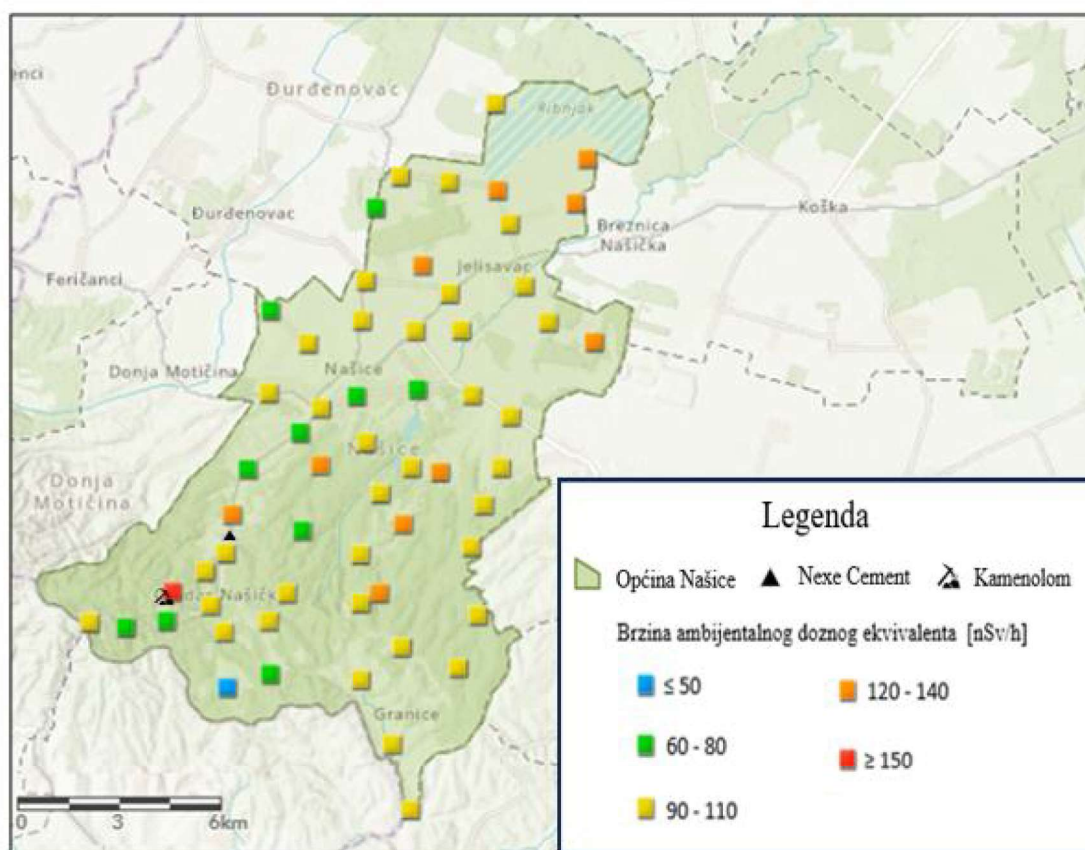
Ukupno je zabilježeno 3289 mjerenja. Najmanja zabilježena vrijednost je 50 nSv/h (vrijeme mjerenja: 25.5.2021., 2:08:54), a najveća 130 nSv/h (zabilježena 8 puta).

Prosječna vrijednost brzine ambijentalnog doznog ekvivalenta mjerena uređajem RDS-31 na 59 lokacija u Našicama iznosi

$$H^*(10)/t = (100 \pm 50) \text{ nSv/h.} \quad (14)$$

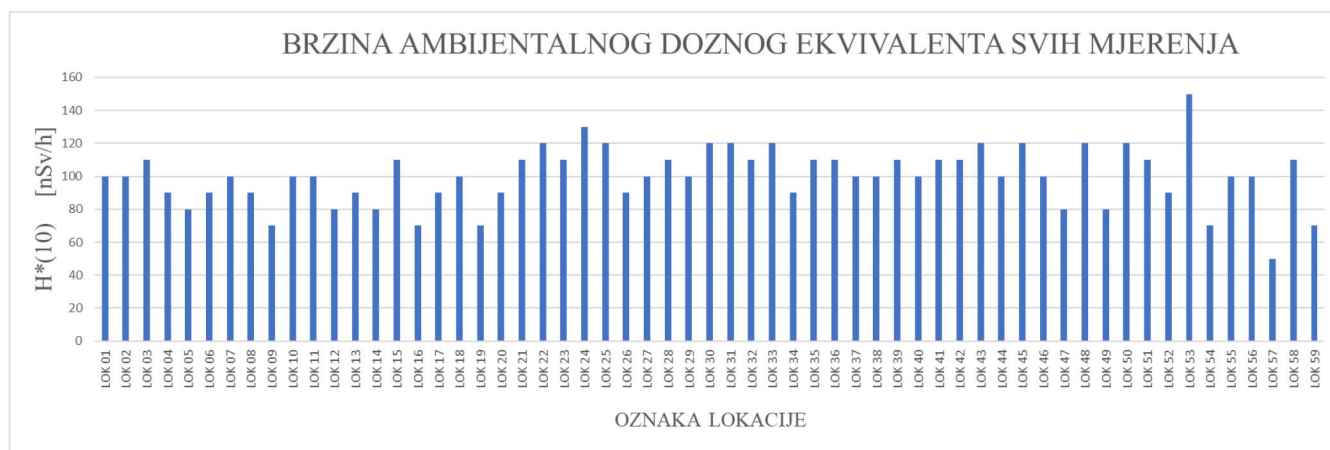
Najmanja zabilježena vrijednost je 50 nSv/h (lokacija 57, koordinate: 45,405736°N; 18,039233°E), a najveća 150 nSv/h (lokacija 53, koordinate: 45,433680°N; 18,016448°E).

Prikaz mjernih lokacija s naznačenim izmjerenim vrijednostima vidljiv je na slici 24.



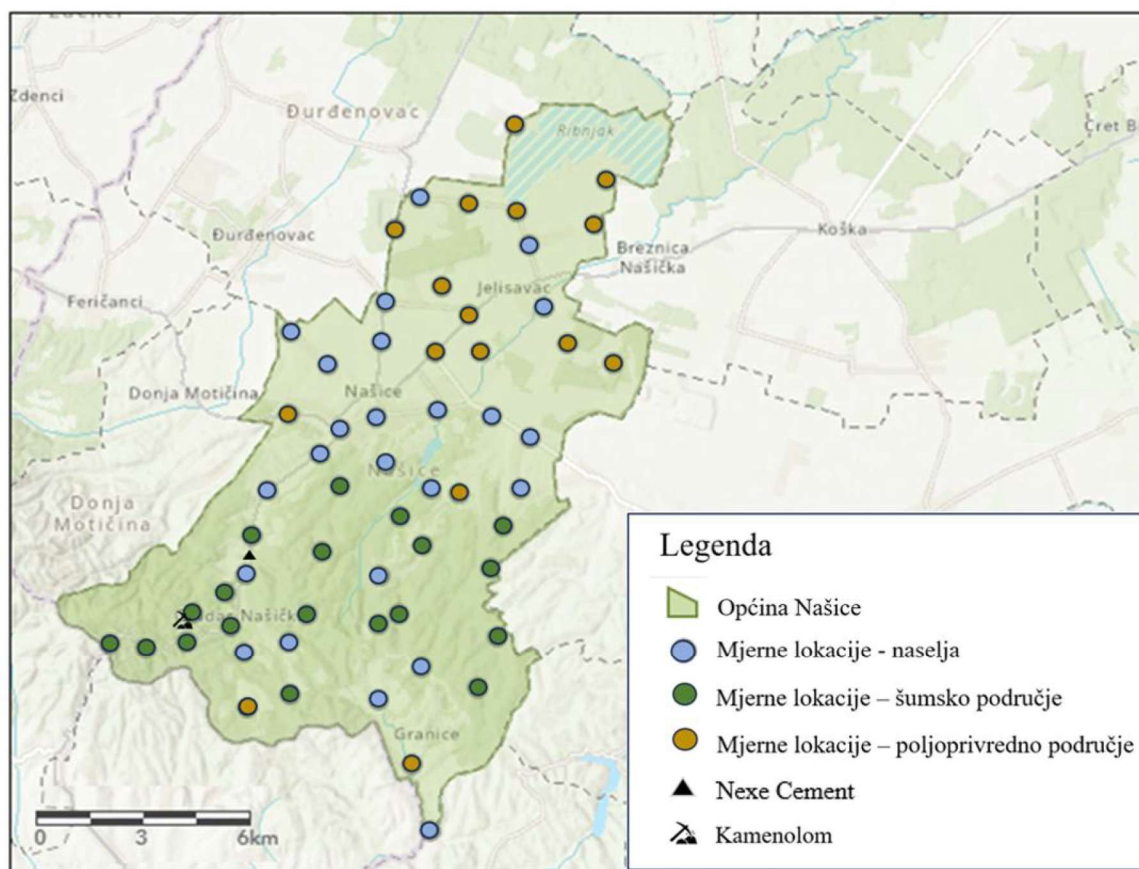
Slika 24. Prikaz mjernih lokacija s naznačenim izmjerenim vrijednostima zračenja

Na slici 25. možemo vidjeti grafički prikaz svih mjerenja.



Slika 25. Graf brzine ambijentalnog doznog ekvivalenta svih mjerenja

S obzirom na to da područje općine Našice čine pretežno naselja, poljoprivredna područja i šume, lokacije mjerenja smo podijelili u tri kategorije: naselja, poljoprivredno područje i šumsko područje, kako bismo uvidjeli postoje li razlike u izmjenjenim vrijednostima u pojedinim kategorijama.

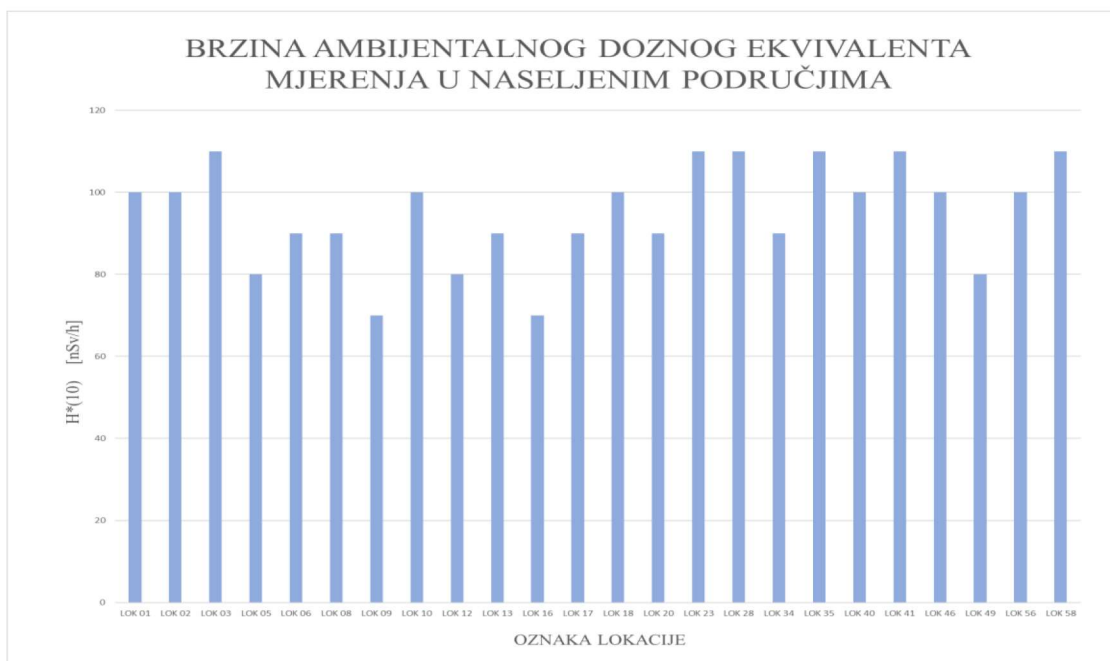


**Slika 26.** Prikaz podjele lokacija mjerenja prema kategorijama

Prosječna vrijednost brzine ambijentalnog doznog ekvivalenta u naseljima iznosi:

$$H^*(10)/t = (95,0 \pm 25,0) \text{ nSv/h.} \quad (15)$$

Najviša izmjerena vrijednost je (110 nSv/h), a najniža izmjerena vrijednost iznosi 70 nSv/h. Na slici 27. možemo vidjeti graf koji prikazuje sva mjerenja.

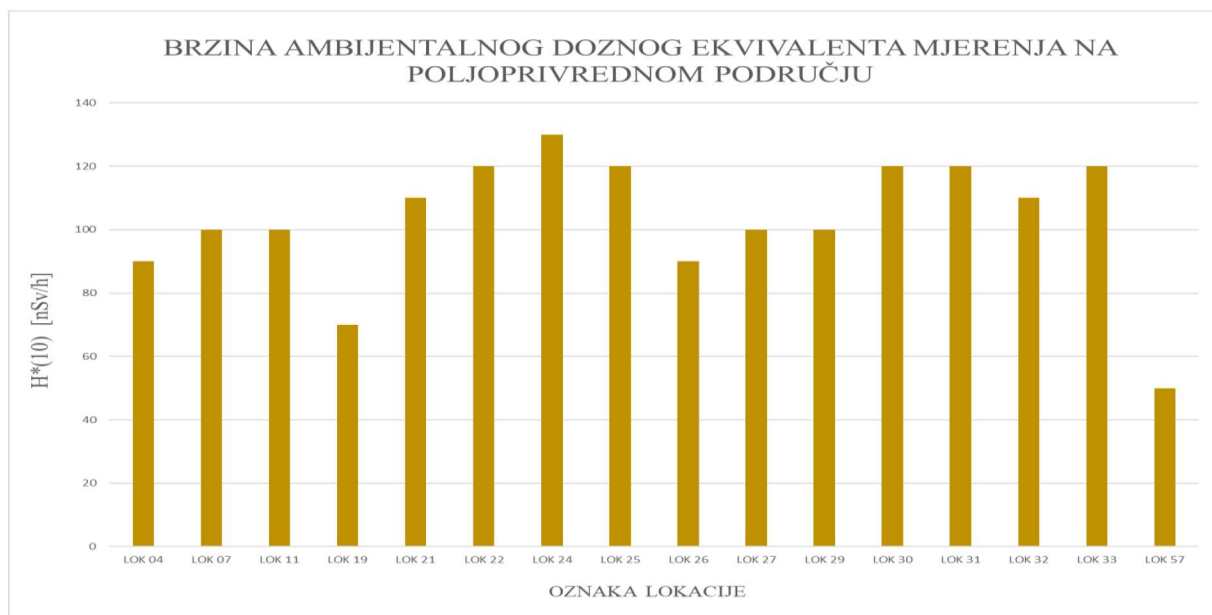


**Slika 27.** Graf brzine ambijentalnog doznog ekvivalenta u naseljima

Prosječna vrijednost brzine ambijentalnog doznog ekvivalenta na poljoprivrednom području iznosi:

$$H^*(10)/t = (103 \pm 53) \text{ nSv/h.} \quad (16)$$

Najviša izmjerena vrijednost je (130 nSv/h), a najniža izmjerena vrijednost iznosi 50 nSv/h. Na slici 28. možemo vidjeti graf koji prikazuje sva mjerenja.



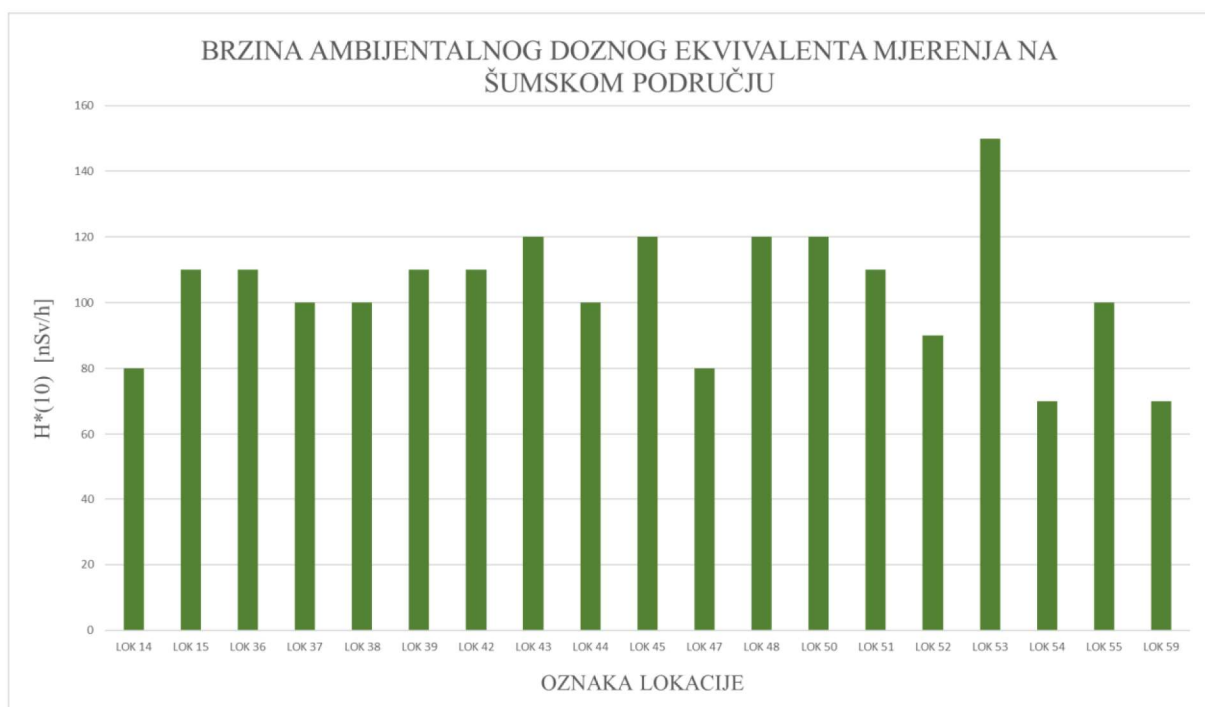
**Slika 28.** Graf brzine ambijentalnog doznog ekvivalenta na poljoprivrednom području



Prosječna vrijednost brzine ambijentalnog doznog ekvivalenta na šumskom području iznosi:

$$H^*(10)/t = (104 \pm 46) \text{ nSv/h.} \quad (17)$$

Najviša izmjerena vrijednost je (150 nSv/h), a najniža izmjerena vrijednost iznosi 70 nSv/h. Na slici 29. možemo vidjeti graf koji prikazuje sva mjerenja.



**Slika 29.** Graf brzine ambijentalnog doznog ekvivalenta na poljoprivrednom području

### 3.4.1. T-test

T-test je statistički postupak za testiranje značajnosti razlike između dvaju uzorka gdje uspoređujemo njihove aritmetičke sredine. Ispituje se postoji li statistički značajna razlika između dvaju uzoraka. Služi za provjeru nul-hipoteze koju postavljamo na početku testiranja. Ako t-test pokaže da razlika između aritmetičkih sredina nije statistički značajna, onda smo potvrdili nul-hipotezu, a ako je razlika statistički značajna, odbacili smo nul-hipotezu i prihvatili alternativnu. Tipovi t-testa koji se koriste su: razlike između aritmetičkih sredina dvaju malih nezavisnih uzoraka, razlike između aritmetičkih sredina dvaju malih zavisnih uzoraka, razlike između aritmetičkih sredina dvaju velikih nezavisnih uzoraka, razlike između aritmetičkih sredina dvaju velikih zavisnih uzoraka, t-test razlike između aritmetičke sredine osnovnog skupa i uzorka i t-test proporcije. [58]

Ako kažemo da je neka razlika statistički značajna, onda smo zapravo ustvrdili da razlika, koja je nađena, bez obzira na veličinu razlike, nije slučajna, već da razlika vrlo vjerojatno postoji i u populaciji. Naprotiv, ako tvrdimo da neka razlika nije statistički značajna, to znači da razlika, koju smo prilikom našeg mjerenja dobili, može biti i slučajna posljedica variranja uzoraka, a da među populacijama, kojima ti uzorci pripadaju, možda i nema nikakve razlike.

T-test promatra odnos razlike između dviju aritmetičkih sredina i pogreške (ili standardne pogreške) te razlike. Što je razlika više puta veća od svoje pogreške, to joj „više vjerujemo“.

$$t = \frac{\text{razlika}}{\text{standardna – pogreška – razlike}}$$

Kada odredimo koliki je t, potrebno je izračunati stupnjeve slobode te pronaći granične vrijednosti t-testa u tablici. Prikaz zaključaka ovisno o veličini dobivene t vrijednosti prikazan je tablici 4. [59]

**Tablica 5.** Prikaz zaključaka ovisno o veličini dobivene t vrijednosti

dobiveni $t < t_{\text{granični}}(5\%)$ $p > 0,05$	Razlika nije statistički značajna
dobiveni $t = t_{\text{granični}}(5\%)$ $p = 0,05$	Razlika je statistički značajna
$t_{\text{granični}}(5\%) < \text{dobiveni } t$ $p < 0,05$	Razlika je statistički značajna

Pomoću t-testa provjerili smo postoji li statistički značajna razlika između aritmetičke sredine brzine ambijentalnog doznog ekvivalenta pojedinih tipova područja. Proveli smo tri statistička testa kako bismo usporedili sva mjerenja.

Na slici 30. nalazi se rezultat t-testa koji smo računali u programu IBM SPSS Statistics 26. Prikazani rezultati se odnose na usporedbu vrijednosti mjerenih u naselju i poljoprivrednom području. Pomoću gornje tablice, možemo vidjeti broj lokacija u naselju (24 lokacije) i broj lokacija na poljoprivrednom području (16 lokacija) te njihove pripadne aritmetičke sredine. Iz rezultata testa zaključujemo da na razini značajnosti od 5 % ne postoji statistički značajna razlika između izmjerenih vrijednosti brzine ambijentalnog doznog ekvivalenta u naselju i na poljoprivrednom području ( $t = 1,541$ ;  $df = 38$ ;  $p = 0,132$ ).

Razlika u aritmetičkim sredinama smatra se slučajnom, odnosno nije dokazana statistička značajnost. Pogreška mjerenja p, Sig. (2-tailed) u tablici, veća je od 0,05 ( $p = 0,132$ ), a t je manji od graničnog koji za stupanj slobode od 38 prema t-tablici iznosi  $t_{granični}(5\%)=2,202$ .

Group Statistics										
Tip lokacije		N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean					
H*(10) [nSw/h]	naselja	24	95.0000	12.51086	2.55377					
	poljoprivredno_područje	16	103.1250	20.88660	5.22165					

Independent Samples Test										
		Levene's Test for Equality of Variances			t-test for Equality of Means				95% Confidence Interval of the Difference	
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	Lower	Upper
H*(10) [nSw/h]	Equal variances assumed	2.724	.107	-1.541	38	.132	-8.12500	5.27317	-18.79998	2.54998
	Equal variances not assumed			-1.398	22.205	.176	-8.12500	5.81269	-20.17332	3.92332

**Slika 30.** Rezultati t testa provedenih na rezultatima mjerenja u naseljenom i poljoprivrednom području

Na slici 31. nalazi se rezultat t-testa koji se odnosi na usporedbu vrijednosti mjerenih u naselju i šumskom području. Broj lokacija u naselju je 24, a broj lokacija na šumskom području je 19. Iz rezultata testa zaključujemo da na razini značajnosti od 5 % ne postoji statistički značajna razlika između izmjerenih vrijednosti brzine ambijentalnog doznog ekvivalenta u naselju i na šumskom području ( $t = 1,755$ ;  $df=41$ ;  $p=0,087$ ). Razlika u aritmetičkim sredinama smatra se slučajnom, odnosno nije dokazana statistička značajnost. Pogreška mjerenja p, Sig. (2-tailed) u tablici, veća je od 0,05 ( $p = 0,087$ ), a t je manji od graničnog koji za stupanj slobode od 41 prema t-tablici iznosi  $t_{granični}(5\%)=2,02$ .

Group Statistics										
Tip lokacije		N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean					
H*(10) [nSw/h]	naselja	24	95.0000	12.51086	2.55377					
	šumsko_područje	19	103.6842	19.77949	4.53773					

Independent Samples Test										
		Levene's Test for Equality of Variances			t-test for Equality of Means				95% Confidence Interval of the Difference	
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	Lower	Upper
H*(10) [nSw/h]	Equal variances assumed	2.528	.120	-1.755	41	.087	-8.68421	4.94736	-18.67561	1.30719
	Equal variances not assumed			-1.668	28.936	.106	-8.68421	5.20698	-19.33471	1.96629

**Slika 31.** Rezultati t testa provedenih na rezultatima mjerenja u naseljenom i šumskom području

Na slici 32. nalazi se rezultat t-testa koji se odnosi na usporedbu vrijednosti mjerenih na poljoprivrednom i šumskom području. Broj lokacija na poljoprivrednom području je 16, a broj lokacija na šumskom području je 19. Iz rezultata testa zaključujemo da na razini značajnosti od 5 % ne postoji statistički značajna razlika između izmjerenih vrijednosti brzine ambijentalnog doznog ekvivalenta u naselju i na šumskom području ( $t=0,081$ ;  $df=31$ ;  $p=0,936$ ). Razlika u aritmetičkim sredinama smatra se slučajnom, odnosno nije dokazana statistička značajnost. Pogreška mjerenja p, Sig. (2-tailed) u tablici, veća je od 0,05 ( $p = 0,936$ ), a t je manji od graničnog koji za stupanj slobode od 31 prema t-tablici iznosi  $t_{granični(5\%)}=2,04$ .

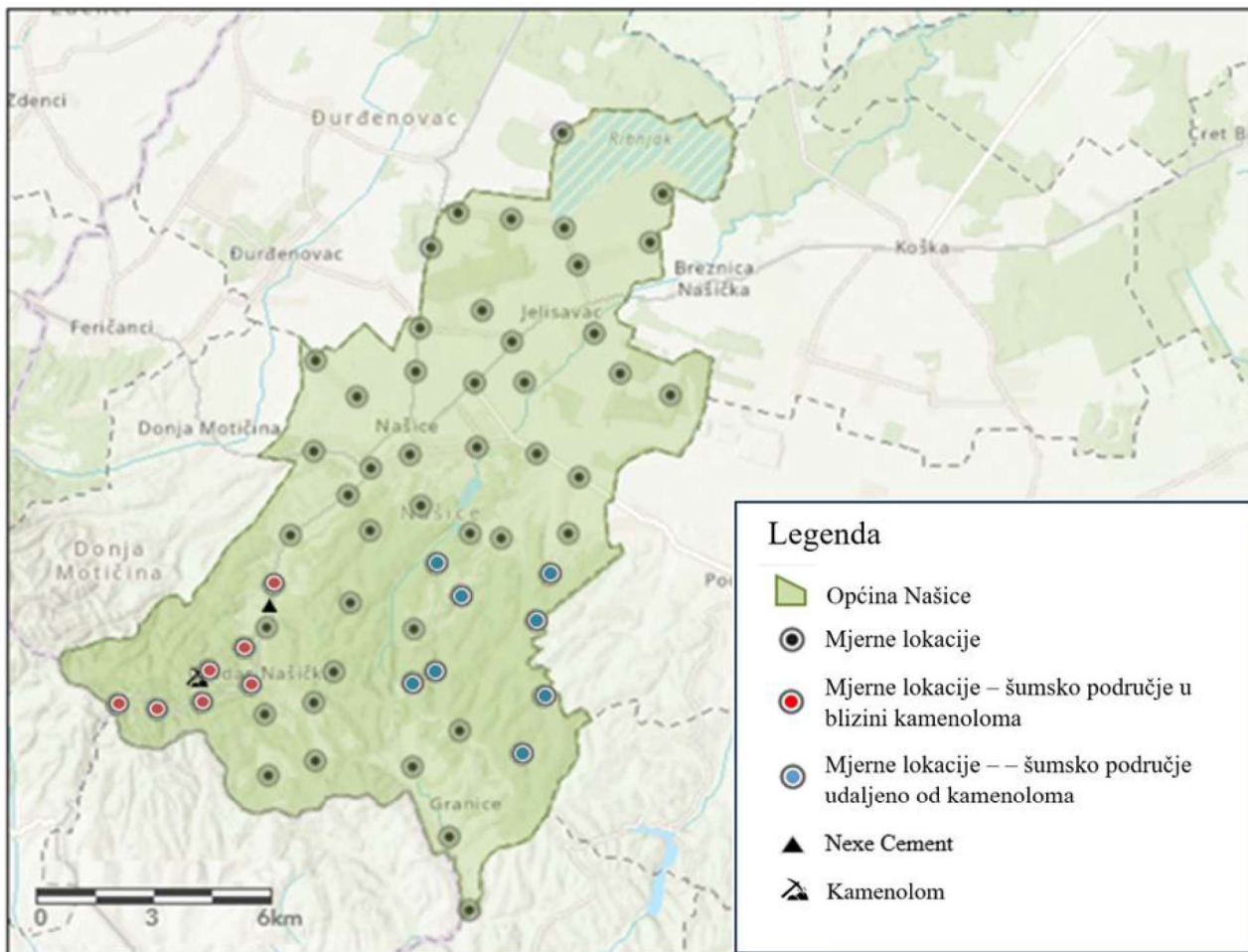
Group Statistics										
Tip lokacije		N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean					
H*(10) [nSv/h]	šumsko_područje	19	103.6842	19.77949	4.53773					
	poljoprivredno_područje	16	103.1250	20.88660	5.22165					

Independent Samples Test										
		Levene's Test for Equality of Variances			t-test for Equality of Means					
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
H*(10) [nSv/h]	Equal variances assumed	.017	.899	.081	33	.936	.55921	6.88468	-13.44778	14.56620
	Equal variances not assumed			.081	31.324	.936	.55921	6.91784	-13.54392	14.66234

**Slika 32.** Rezultati t testa provedenih na rezultatima mjerenja na poljoprivrednom i šumskom području

Najveća zabilježena vrijednost uređajem RDS-31 je na lokaciji 53 koja se nalazi na šumskom području u blizini kamenoloma i iznosi 150 nSv/h. Kako bismo uvidjeli postoji li razlika u prosječnim vrijednostima brzine ambijentalnog doznog ekvivalenta u šumskom području u blizini kamenoloma i udaljenom od kamenoloma, izdvojili smo sedam šumskih lokacija u blizini kamenoloma i osam šumskih lokacija koje se nalaze udaljene od kamenoloma. Za izdvojene lokacije izračunali smo aritmetičku sredinu te napravili t-test kako bismo uvidjeli postoji li statistički značajna razlika između izdvojenih mjerenja. Prikaz izdvojenih lokacija se nalazi na slici 33.



**Slika 33.** Prikaz izdvojenih mjernih lokacija

Prosječna vrijednost brzine ambijentalnog doznog ekvivalenta na šumskom području u blizini kamenoloma iznosi:

$$H^*(10)/t = (103 \pm 47) \text{ nSv/h.} \quad (18)$$

Najviša izmjerena vrijednost je (150 nSv/h), a najniža izmjerena vrijednost iznosi 70 nSv/h.

Prosječna vrijednost brzine ambijentalnog doznog ekvivalenta na šumskom području udaljenom od kamenoloma iznosi:

$$H^*(10)/t = (109 \pm 11) \text{ nSv/h.} \quad (19)$$

Najviša izmjerena vrijednost je (120 nSv/h), a najniža izmjerena vrijednost iznosi 100 nSv/h.

Na slici 34. nalazi se rezultat t-testa koji se odnosi na usporedbu vrijednosti mjerenih na šumskom području u blizini kamenoloma i šumskom području udaljenom od kameleona. Broj lokacija u blizini kamenoloma je 7, a broj lokacija na šumskom području udaljenom od kameleona je 8. Iz rezultata testa zaključujemo da na razini značajnosti od 5 % ne postoji statistički značajna razlika između izmjerenih vrijednosti brzine ambijentalnog doznog ekvivalenta ( $t=0,557$ ;  $df=7$ ;  $p=0,595$ ). Razlika u aritmetičkim sredinama smatra se slučajnom, odnosno nije dokazana statistička značajnost. Pogreška mjerenja p, Sig. (2-tailed) u tablici, veća je od 0,05 ( $p = 0,595$ ), a t je manji od graničnog koji za stupanj slobode od 7 prema t-tablici iznosi  $t_{granični(5\%)}=2,36$ .

Group Statistics					
Tip lokacije		N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
H*(10) [nSv/h]	Kamenolom	7	102.857	26.9037	10.1686
	Usporedno_šumsko_po područje	8	108.750	8.3452	2.9505

Independent Samples Test										
		Levene's Test for Equality of Variances			t-test for Equality of Means					
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
H*(10) [nSv/h]	Equal variances assumed	5.925	.030	-.591	13	.565	-5.8929	9.9763	-27.4453	15.6596
	Equal variances not assumed			-.557	7.010	.595	-5.8929	10.5880	-30.9222	19.1365

**Slika 34.** Rezultati t testa provedenih na rezultatima mjerenja na šumskom području u blizini kamenoloma

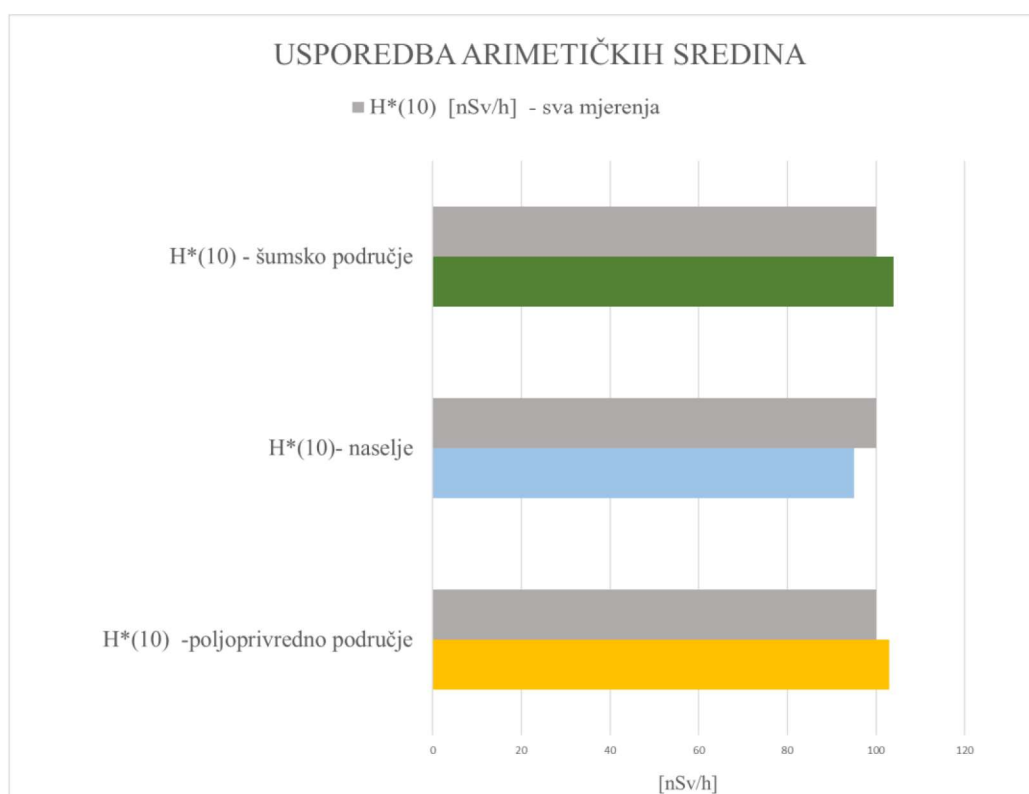
### 3.4.2. Rasprava rezultata

Izmjerene vrijednosti za brzinu ambijentalnog doznog ekvivalenta u Našicama su u okviru prosječnih vrijednosti za Republiku Hrvatsku. Mjerenjima izvršenim na jednoj lokaciji i mjerenjima izvršenim na više različitih lokacija dobili smo isti podatak.

Najviša izmjerena vrijednost je 150 nSv/h i nalazi se neposredno u blizini mjesta iskapanja kamenja za potrebe kamenoloma Gradac d.d. Pomoću t-testa usporedili smo šumske mjerne lokacije u blizini kamenoloma i mjerne lokacije udaljene od kamenoloma. Iz rezultata t-testa možemo zaključiti da ne postoji statistički značajna razlika između mjerenja. Razlika koju smo prilikom našeg mjerenja dobili može biti slučajna posljedica variranja uzoraka. Uzroci nastalih odstupanja mogu biti promjenjivi

vremenski uvjeti (oborine, vjetar). Dobivena odstupanja na nekim mjestima mogu biti i rezultat povećanog zračenja zbog utjecaja prirodnih radionuklida koji se nalaze na tom području. Ipak, kako bismo ovo mogli potvrditi sa sigurnošću, morali bismo provesti dodatna mjerenja.

Lokacije mjerenja podijelili smo u tri kategorije: naselja, poljoprivredna područja i šumsko područje. Izračunom aritmetičke sredine brzine ambijentalnog doznog zračenja za svaku od kategorija možemo uočiti da je vrijednost izmjerena u naseljima niža od vrijednosti izmjerene na lokacijama na poljoprivrednom i šumskom području. Provedbom t-testa utvrdili smo da ne postoji statistički značajna razlika između naših uzoraka na razini značajnosti od 5 % te da su dobivene razlike slučajne. Dobivene razlike mogu biti posljedica vremenskih uvjeta prilikom mjerenja ili utjecaja prirodnih radionuklida koji se nalaze na tom području. Također, neke lokacije se nalaze na puno većim nadmorskim visinama (razlika do nekoliko stotina metara) te se između lokacije priječe reljefne uzvisine.



**Slika 32.** Grafički prikaz usporedbe aritmetičkih sredina

U blizini tvornice cementa NEXE d.d. nisu uočena značajna povećanja vrijednosti brzine ambijentalnog doznog ekvivalenta. Sukladno dobivenim rezultatima, možemo zaključiti da rad cementare ne utječe na ozračenje stanovništva.

## Zaključak

Izloženost ionizirajućem zračenju je svakodnevna pojava. Izloženi smo pozadinskom zračenju koje dolazi od kozmičkih i terestrijalnih izvora. Također, doprinos izloženosti zračenju daju i industrijska postrojenja. Utjecaj ionizirajućeg zračenja na ljudski organizam je danas poznat te je stoga potrebno pratiti kontaminaciju okoliša i otkriti izvore zračenja kojima stanovništvo može biti izloženo.

U ovom radu mjerili smo brzinu ambijentalnog doznog ekvivalenta u Našicama kako bismo identificirali potencijalne izvore ionizirajućeg zračenja, kao na primjer cementara i kamenolom koji su smješteni u blizini grada Našica. Rezultatu mjerenja pokazali su da je brzina ambijentalnog doznog ekvivalenta u okviru prosječnih vrijednosti za Republiku Hrvatsku. Također, u blizini tvornice cementa NEXE d.d. nisu uočena značajna povećanja vrijednosti. Možemo zaključiti da većinski doprinos  $H^*(10)$  na tom području dolazi od radionuklida koji su prirodno prisutni u tlu. Ipak, kako bismo ovo mogli potvrditi sa sigurnošću, morali bismo provoditi ova mjerenja kroz znatno dulji vremenski period te pritom razmotriti te uzeti u obzir i druge čimbenike koji mogu utjecati na dobivene rezultate. Veći broj mjerenja dao bi bolji uvid u stvarno stanje, ali i ova mjerenja i rezultati upućuju na to da potrebe za zabrinutošću nema te kako je područje na kojemu su rađena mjerenja potpuno sigurno.



## Literatura

- [1] Radioaktivnost. Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2021. (21. 4. 2022) <
- [2] URL: <https://edutorij.e-skole.hr/share/proxy/alfresco-noauth/edutorij/api/proxy-guest/0066d3fa-a0c5-404b-9a0c-736126545176/radioaktivno-zracenje.html> (21. 4.2022.)
- [3] Elektromagnetski valovi. Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2021. (21. 4. 2022) <<http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=17633>>.
- [4] URL: <https://glossary.periodni.com/glosar.php?hr=infracrveno+zra%C4%8Denje> (21. 4.2022.)
- [5] Canadian Nuclear Safety Commission (CNSC). Introduction to Radiation, CNSC, 2012.
- [6] Radionuklidi. Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2021. (30. 5. 2022.) <<http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=51501>>
- [7] International Atomic Energy Agency (IAEA). Nuclear Medicine Physics: A Handbook for Teachers and Students. 2014.
- [8] Tišma, Isabela. "Raspodjela ambijentalnog doznog ekvivalenta u Slavanskom Brodu." Diplomski rad, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Odjel za fiziku, 2017.  
<https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:160:147897>
- [9] URL: <https://edutorij.e-skole.hr/share/proxy/alfresco-noauth/edutorij/api/proxy-guest/eb63acab-6d0c-4a0a-84b8-345fddcdcec2/zakon-radioaktivnog-raspada.html> (12. 6.2022.)
- [10] URL:<http://www.splung.com/content/sid/5/page/radioactivity> (12. 6.2022.)
- [11] Goldini J., Zaštita od neionizirajućeg zračenja u medicini, Zagreb, 1993.
- [12] Vujnovac V., Utjecaj neionizirajućeg zračenja na zdravlje ljudi, Osijek, 2012.
- [13] Ionizirajuće zračenje. Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2021. (31.8.2022.) <<http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=27754>>
- [14] United States Environmental Protection Agency, Ionizing Radiation. 2007.
- [15] URL: <https://www.fond-nek.hr/radioaktivnost/> (31. 8. 2022.)
- [16] Bolf N., Ionizirajuće zračenje, OSVJEŽIMO ZNANJE, Kem. Ind. 67 (7-8) (2018), 331–332 str.
- [17] URL: <http://radon.civilna-zastita.hr/o-radonu/> (31. 8. 2022.)
- [18] Habazin-Novak V., Izloženost čovjeka ionizirajućem zračenju, Institut za medicinska istraživanja i medicinu rada, Zagreb, 1977.
- [19] URL: <https://civilna-zastita.gov.hr/podrucja-djelovanja/radioloska-i-nuklearna-sigurnost/sluzba-za-radiolosku-sigurnost/medicinsko-ozracenje/138> (31. 8. 2022.)

- [20] URL: <https://www.epa.gov/radtown/industrial-radiography> (14. 9. 2023.)
- [21] URL: <https://www.radiationanswers.org/radiation-sources-uses.html> (31. 8. 2022.)
- [22] URL: <https://www.radiationanswers.org/radiation-sources-uses/industrial-uses/gauging-devices.html> (31. 8. 2022.)
- [23] URL: <https://www.radiationanswers.org/radiation-sources-uses/industrial-uses/sterilization.html> (31. 8. 2022.)
- [24] URL: <https://www.radiationanswers.org/radiation-sources-uses/household-products.html> (14. 9. 2023.)
- [25] Nuklearna elektrana. Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2021. (31. 8. 2022.) <<http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=44374>>
- [26] URL: [https://energyeducation.ca/encyclopedia/Nuclear\\_power\\_plant](https://energyeducation.ca/encyclopedia/Nuclear_power_plant) (31. 8. 2022.)
- [27] URL: <https://www.nek.si/hr/o-nama/o-nek-u> (31. 8. 2022.)
- [28] URL: <https://www.nrc.gov/about-nrc/radiation/around-us/uses-radiation.html> (31. 8. 2022.)
- [29] URL: <https://www.irb.hr/Zavodi/Zavod-za-eksperimentalnu-fiziku/Laboratorij-za-mjerenje-niskih-radioaktivnosti/Usluge/Odredivanje-starosti-metodom-14C> (31. 8. 2022.)
- [30] Radioaktivni otpad. Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2021. (31. 8. 2022.) <<http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=51471>>.
- [31] URL: [https://www.radioaktivniotpad.org/hrvatski/klasifikacija-radioaktivnog-otpada\\_11/](https://www.radioaktivniotpad.org/hrvatski/klasifikacija-radioaktivnog-otpada_11/) (31. 8. 2022.)
- [32] Strategija zbrinjavanja radioaktivnog otpada, iskorištenih izvora i istrošenog nuklearnog goriva; Hrvatski sabor, NN 125/2014, 2382 <</eli/sluzbeni/2014/125/2382>>
- [33] Dozimetrija. Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2021.(31. 8. 2022.) <<http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=16088>>
- [34] Apsorbirana doza. Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2021. (31. 8. 2022.) <<http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=3443>>.
- [35] Surić Mihić, Marija, Ivica Prlić, Jerko Šiško i Tomislav Meštrović. "Koncept osobne dozimetrije i osnovne fizikalne veličine u osobnoj dozimetriji." HDKBR INFO Magazin 3, br. 4 (2013): 13-23. <<https://hrcak.srce.hr/148773> >
- [36] Ekvivalentna doza. Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2021. (31. 8. 2022.) <<http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=17513>>
- [37] Pravilnik o granicama ozračenja, preporučenom doznom ograničenju i procjenjivanju osobnog ozračenja; Hrvatski sabor, NN 8/2022-74 <[https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2022\\_01\\_8\\_74.html](https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2022_01_8_74.html)>

- [38] Efektivna doza. Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2021. (31. 8. 2022.) <<http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=17106>>
- [39] International Atomic Energy Agency (IAEA). Dosimetry in Diagnostic Radiology: An International Code of Practice. 2007.
- [40] Franić, Z.. "Ekvivalentna doza ili dozni ekvivalent?." Arhiv za higijenu rada i toksikologiju 45, br. 1 (1994): 39-54. < <https://hrcak.srce.hr/147122> >
- [41] Surić Mihić, Marija. "Vremenski razlučiva osobna dozimetrija rendgenskog zračenja vrlo niskih doza." Disertacija, Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet, 2012. <<https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:217:515679> >
- [42] URL: <https://www.radiation-dosimetry.org/what-is-ambient-dose-equivalent-h10-definition/> (31. 8. 2022.)
- [43] Alvarez, J. L. Measurement of External Effective Dose. Jacksonville, 2001.
- [44] Zakon o radiološkoj i nuklearnoj sigurnosti; Hrvatski sabor; NN 141/13, 39/15, 130/17, 118/18, 21/22
- [45] URL: <https://www.epa.gov/radiation/protecting-yourself-radiation#timedistanceshielding> (31. 8. 2022.)
- [46] Godišnje izvješće o rezultatima praćenja kvalitete zraka na automatskoj postaji za praćenje kvalitete zraka Zoljan u 2021. godini; Zagreb, veljača 2022.
- [47] RDS-31 S/R Multi-purpose Survey Meter User's Manual, 2011.
- [48] RDS31 Multi-Purpose Survey Meter < [https://mirionprodstorage.blob.core.windows.net/prod-20220822/cms4\\_mirion/files/pdf/spec-sheets/20996078\\_rds31\\_en\\_f.pdf?1560783263](https://mirionprodstorage.blob.core.windows.net/prod-20220822/cms4_mirion/files/pdf/spec-sheets/20996078_rds31_en_f.pdf?1560783263) > (31. 8. 2022.)
- [49] CSW-31 Configuration Software for RDS-31, User Manual, 2014.
- [50] URL: <https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-online/overview> (31. 8. 2022.)
- [51] URL: <https://gisgeography.com/what-is-arcgis/> (31. 8. 2022.)
- [52] URL: [https://www.oruxmaps.com/OruxMapsManual-9.0\\_en.pdf](https://www.oruxmaps.com/OruxMapsManual-9.0_en.pdf) (14. 9. 2023.)
- [53] Personal radiation monitor/dosimeter PM1605; Operation manual
- [54] Software for the instrument PM1605; Software guide, 2015.
- [55] Sabbatini RME (ed.) Non-Ionizing Electromagnetic Radiation in the Radiofrequency Spectrum and its Effects on Human Health. Scientific Review. Latin American Experts Committee on High Frequency Electromagnetic Fields and Human Health; 2010.
- [56] Gama-zračenje. Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2021. Pristupljeno 15. 6. 2023. <<http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=21168>>

[56] Rendgensko zračenje. Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2021. Pristupljeno 15. 6. 2023. <<http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=52438>>.

[57] Radioizotopno datiranje. Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2021. Pristupljeno 15. 6. 2023. <<http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=51486>>.

[58] URL: [https://ldap.zvu.hr/~oliverap/VjezbeIzStatistike/7\\_T-test%20vje%C5%BEbe.pdf](https://ldap.zvu.hr/~oliverap/VjezbeIzStatistike/7_T-test%20vje%C5%BEbe.pdf) (31. 8. 2023.)

[59] URL: [https://ldap.zvu.hr/~oliverap/MetodeIstrazivanjaFT/9\\_t-test.pdf](https://ldap.zvu.hr/~oliverap/MetodeIstrazivanjaFT/9_t-test.pdf) (6. 9. 2023.)

## **Životopis**

Marijana Hrbak rođena je u Našicama 9. 1. 1996. godine. Pohađala je OŠ Dore Pejačević u Našicama. Po završetku osnovne škole upisuje SŠ Isidora Kršnjavog u Našicama, smjer prirodoslovno-matematička gimnazija. Nakon završene srednje škole, upisuje preddiplomski studij fizike na Odjelu za fiziku koji završava 2018. godine nakon kojeg upisuje diplomski studij fizike i informatike.