

UNIVERZITET CRNE GORE
PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET

Ilda Softić

DOZE TERESTRIJALNOG GAMA ZRAČENJA U PODGORICI

MAGISTARSKI RAD

PODGORICA, 2017.

UNIVERZITET CRNE GORE
PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET

Ilda Softić

DOZE TERESTRIJALNOG GAMA ZRAČENJA U PODGORICI

MAGISTARSKI RAD

PODGORICA, 2017.

PODACI I INFORMACIJE O MAGISTRANDU

Ime i prezime: **Ilda Softić**

Datum i mjesto rođenja: **14. 04. 1992, Bijelo Polje**

Naziv završenog osnovnog studijskog programa i godina završetka studija: **FIZIKA, 2015.**

INFORMACIJE O MAGISTARSKOM RADU

Naziv postdiplomskog studija: **Akadske magistarske studije FIZIKE**

Naslov rada: **Doze terestrijalnog gama zračenja u Podgorici**

Fakultet/Akademija na kojem je rad odbranjen: **Prirodno-matematički fakultet**

UDK, OCJENA I ODBRANA MAGISTARSKOG RADA

Datum prijave magistarskog rada: **23. 11. 2016. godine**

Datum sjednice Vijeća na kojoj je prihvaćena tema: **09. 02. 2017. godine**

Komisija za ocjenu teme i podobnosti magistranda: **prof. dr Nevenka Antović
prof. dr Nataša Raičević
prof. dr Perko Vukotić**

Mentor: **prof. dr Nevenka Antović**

Komisija za ocjenu rada: **prof. dr Nevenka Antović
prof. dr Nataša Raičević
prof. dr Perko Vukotić**

Komisija za odbranu rada: **prof. dr Nevenka Antović
prof. dr Nataša Raičević
prof. dr Perko Vukotić**

Lektor: **prof. Vehbo Agović**

Datum odbrane: **24. 05. 2017. godine**

Datum promocije:

Predgovor

Ovaj magistarski rad predstavlja nastavak istraživanja koje je sprovedeno tokom izrade specijalističkog rada *Personalne i ambijentalne doze zračenja u trima laboratorijama za fiziku na Univerzitetu Crne Gore*, koji je na Prirodno-matematičkom fakultetu odbranjen 08. 07. 2015. godine. Njegov cilj je procjena nivoa izloženosti stanovništva spoljašnjem terestrijalnom gama zračenju napolju (*outdoors*), tj. procjena doze koju odrasli stanovnik Podgorice godišnje prima od ovog zračenja.

Pored uvoda, zaključka i popisa korišćene literature, rad čini pet cjelina koje sadrže i rezultate eksperimentalnih istraživanja i njihova poređenja sa literaturnim podacima.

Mjerenja su vršena i na terenu i u laboratoriji. Rezultati su dobijeni pomoću dva mjerna uređaja. Za mjerenje doze korišćen je Canberra INSPECTOR 1000, a za mjerenje koncentracija aktivnosti prirodnih radionuklida i vještačkog ^{137}Cs u uzorcima zemljišta, na osnovu kojih su urađeni proračuni doza, korišćen je ORTEC HPGe spektrometrijski sistem.

Dio eksperimentalnih istraživanja i analiza rezultata je urađen u okviru projekta *Nuklearna spektrometrija i njen značaj za zaštitu životne sredine* (Ministarstvo nauke, Centar za ekotoksikološka ispitivanja), a značajnu pomoć i podršku pružili su Ranko Zekić i dr Nikola Svrkota iz *Centra za ekotoksikološka ispitivanja* u Podgorici, na čemu im srdačno zahvaljujem.

Ilda Softić, spec. fizike

U Podgorici, 20. II 2017. godine

Izvod rada

U radu su predstavljeni rezultati istraživanja fona gama zračenja terestrijalnog porijekla u Podgorici. Direktna mjerenja doza izvršena su uređajem Canberra INSPECTOR 1000 na 11 lokacija, javnih površina na gradskom području Podgorice, dok su mjerenja zemljišta uzorkovanog na istim lokacijama izvršena pomoću ORTEC HPGe spektrometara. Godišnja efektivna doza, koju odrasle osobe koje žive na ispitivanom području primaju zbog spoljašnjeg izlaganja terestrijalnom zračenju napolju (*outdoors*), procijenjena je na osnovu jačina apsorbovanih doza u vazduhu, na 1 m visine iznad tla. Procjene su urađene koristeći i izmjerene jačine apsorbovanih doza i jačine doza koje su izračunate na osnovu koncentracija aktivnosti ^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th i ^{137}Cs u uzorcima zemljišta.

Srednje vrijednosti koncentracija aktivnosti radionuklida u površinskom sloju zemljišta su: ^{40}K – 416 Bq/kg, ^{226}Ra – 49.8 Bq/kg, ^{228}Th – 47.8 Bq/kg i ^{137}Cs – 38.7 Bq/kg. Izmjerene jačine apsorbovanih doza imaju srednju vrijednost 70 nGy/h, a izračunate – 74 nGy/h. Odnos izračunatih i izmjerenih jačina doza je u opsegu (0.6-1.5). Prirodni radionuklidi daju srednju jačinu apsorbovane doze blizu 70 nGy/h i srednju godišnju efektivnu dozu 0.085 mSv, a ^{137}Cs – 4.8 nGy/h i 0.006 mSv, respektivno. Ukupno, srednja godišnja efektivna doza od spoljašnjeg terestrijalnog zračenja *outdoors* u Podgorici iznosi 0.086 mSv – na osnovu direktnih mjerenja, i 0.091 mSv – na osnovu proračuna apsorbovane doze.

Dobijeni rezultati su upoređeni sa prethodnim rezultatima koji se odnose na Podgoricu i Crnu Goru, kao i sa podacima na svjetskom nivou, uključujući i pojedine zemlje južne Evrope.

Abstract

The results of research on background terrestrial gamma radiation in Podgorica are presented in this work. Dose rates were measured directly by the Canberra INSPECTOR 1000 at 11 locations, public areas in the town of Podgorica, while measurements of soil sampled on the same locations were realized by the ORTEC HPGe spectrometer. Annual effective dose received by adults living in the study area, from the external terrestrial radiation *outdoors*, was estimated from the absorbed dose rate in air, 1 m above the ground. The estimations are done using both absorbed dose rates – measured and inferred from activity concentrations of ^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th and ^{137}Cs in soil samples.

Average activity concentrations of the radionuclides in surface soil layer are: ^{40}K – 416 Bq/kg, ^{226}Ra – 49.8 Bq/kg, ^{228}Th – 47.8 Bq/kg and ^{137}Cs – 38.7 Bq/kg. Measured absorbed dose rates have an average of 70 nGy/h, as calculated – 74 nGy/h. Ratio of measured and calculated dose rates is in the range (0.6-1.5). An average absorbed dose rate from natural radionuclides is close to 70 nGy/h with corresponding annual effective dose of 0.085 mSv, and ^{137}Cs – 4.8 nGy/h and 0.006 mSv, respectively. In total, an average annual effective dose due to external terrestrial radiation *outdoors* in Podgorica is 0.086 mSv – from direct measurements, and 0.091 mSv – from absorbed dose calculations.

Obtained results are compared with previous results related to Podgorica and Montenegro, as well as worldwide data, including some countries of the South Europe.

SADRŽAJ

UVOD	6
1. TERESTRIJALNO GAMA ZRAČENJE	8
1.1. Prirodni radioaktivni nizovi i ⁴⁰K	9
1.2. Cezijum-137	15
2. DOZE ZRAČENJA – DEFINICIJE I MJERENJE	16
2.1 Dozimetrijske veličine	16
<i>2.1.1. Mjerenje doza kao mjera zaštite od zračenja</i>	19
2.1.1.1. Rezultati mjerenja doza u laboratorijama Prirodno-matematičkog fakulteta u Podgorici	20
2.2. Ograničenja doza – propisi	25
3. MJERENJE DOZA TERESTRIJALNOG GAMA ZRAČENJA U PODGORICI	27
3.1. Doze terestrijalnog zračenja u svijetu i u Crnoj Gori	27
3.2. Lokacije mjerenja doza terestrijalnog gama zračenja <i>outdoors</i> u Podgorici	31
3.3. Mjerenje doza i uzorkovanje zemljišta	33
3.4. Priprema uzoraka zemljišta i mjerenja aktivnosti radionuklida HPGe spektrometrima	35
<i>3.4.1. HPGe spektrometri i mjerenje aktivnosti radionuklida</i>	37
3.4.1.1. Detektovani radionuklidi	44
4. REZULTATI ODREĐIVANJA DOZA TERESTRIJALNOG GAMA ZRAČENJA U PODGORICI	49
4.1. Doze izmjerene uređajem INSPECTOR 1000	49
4.2. Doze procijenjene na osnovu koncentracija aktivnosti radionuklida	50
<i>4.2.1. Koncentracije aktivnosti radionuklida</i>	50

4.2.2. Proračun jačine apsorbovane doze i godišnje efektivne doze	56
5. DISKUSIJA REZULTATA	62
5.1. Koncentracija aktivnosti radionuklida u zemljištu Podgorice	62
5.2. Doze terestrijalnog gama zračenja <i>outdoors</i> u Podgorici	67
5.2.1. Izmjerena jačina apsorbovane doze	68
5.2.2. Jačina apsorbovane doze procijenjena na osnovu koncentracija aktivnosti radionuklida	70
5.2.3. Poređenja izmjerene i procijenjene jačine apsorbovane doze	73
5.2.4. Godišnja efektivna doza	73
6. ZAKLJUČAK	77
LITERATURA	80
Popis tabela i slika	83
PRILOG	86

UVOD

Poznato je da jonizujuće zračenje može imati razne, negativne, efekte na zdravlje ljudi, zbog čega je njegovo ispitivanje – mjerenje i analiza rezultata, tim značajnije. Poznato je, takođe, da je zaštita od jonizujućih zračenja (mjere zaštite, ograničenja izlaganja) predmet odgovarajućeg zakona i podzakonskih akata (pravilnika) na nacionalnim nivoima, ali i preporuka i standarda na međunarodnom nivou.

Jonizujuće zračenje može biti prirodno (potiče od prirodnih radionuklida – iz vazduha, tla, hrane i pića) i vještačko (zračenje u medicini, industriji, nauci...). Ukupnu dozu zračenja koju čovjek prima čine doze koje potiču od svih prirodnih i vještačkih izvora kojima je pojedinac izložen. Kad su u pitanju prirodni izvori, radi se o kosmičkom zračenju i kosmogenim radionuklidima, terestrijalnom zračenju, kao i o radionuklidima koji se udisanjem i hranom i pićem unose u organizam.

S obzirom na to da postoje prirodni izvori jonizujućeg zračenja, uvijek postoji i neka doza zračenja koju čovjek svakodnevno prima od prirodnih radionuklida, ali i od vještačkih koji su dospjeli na neku teritoriju.

Predmet ovog rada je terestrijalno zračenje *outdoors*, odnosno gama zračenje terestrijalnog porijekla napolju. Terestrijalno zračenje (zračenje terestrijalnih radionuklida) koje se javlja kao eksterno, tj. djeluje spolja, postoji i *indoors* (izvor su tlo, građevinski materijali), ali je u okviru ovog rada razmatrana samo doza ovog zračenja napolju, na gradskoj teritoriji Podgorice. Istraživanje je nastavak istraživanja koje je sprovedeno tokom izrade specijalističkog rada *Personalne i ambijentalne doze zračenja u trima laboratorijama za fiziku na Univerzitetu Crne Gore*, koji je odbranjen 08. 07. 2015. godine, a dio tih rezultata je uključen i u ovaj rad.

Cilj ovog magistarskog rada je da se provjeri nivo izloženosti stanovništva spoljašnjem terestrijalnom zračenju *outdoors*, tj. da se procijeni koje su doze ovog zračenja karakteristične za Podgoricu. U radu se tumače doze zračenja koje su dobijene direktnim mjerenjem pomoću uređaja Canberra INSPECTOR 1000, i one koje su dobijene gama-spektrometrijskim mjerenjem

koncentracija aktivnosti radionuklida za koje se pretpostavlja da su dominantno prisutni u zemljištu.

U prvoj glavi rada je definisano terestrijalno gama zračenje, dok su u drugoj glavi definisane doze zračenja, razmatrano njihovo mjerenje koje je neophodno za primjenu principa i mjera zaštite od zračenja, a dati su i rezultati mjerenja doza u laboratorijima za fiziku Prirodno-matematičkog fakulteta Univerziteta Crne Gore. U okviru iste glave data su ograničenja izlaganja (nivoi doza) na osnovu važećih propisa u Crnoj Gori.

Mjerenje doza terestrijalnog gama zračenja u Podgorici razmatrano je u trećoj glavi, uz osvrt na srednje godišnje doze na svjetskom nivou, kao i na određene rezultate dosadašnjih mjerenja doza u Crnoj Gori. Definisane su mjerne tačke, objašnjeno mjerenje doza i uzorkovanje zemljišta za gama-spektrometrijske analize, kao i priprema uzoraka i mjerenje, tj. određivanje koncentracija aktivnosti radionuklida u uzorcima zemljišta.

U glavi četiri su dati rezultati određivanja doza terestrijalnog gama zračenja *outdoors* u Podgorici – direktna mjerenja i procjene na osnovu gama-spektrometrijskih rezultata. Diskusija rezultata je u glavi pet, i to: koncentracije aktivnosti radionuklida u zemljištu Podgorice, doze terestrijalnog zračenja *outdoors*. Zaključak rada je u glavi šest.

1. TERESTRIJALNO GAMA ZRAČENJE

Jonizujuće zračenje je svako zračenje koje nosi energiju dovoljnu da jonizuje supstancu kroz koju prolazi (X- i gama zračenje, naelektrisane čestice, neutroni).

Gama (γ) zračenje, koje je predmet ovog rada, je kratkotalasno elektromagnetno zračenje jezgra. Radi se o spontanoj emisiji gama kvanata iz jezgra, od strane prirodnih i vještačkih radionuklida. U procesu emisije gama kvanata (fotona), jezgro prelazi iz pobuđenog stanja u stanje sa manjom energijom (radijacioni prelaz), a u pobuđenom stanju je ostalo nakon alfa (α) ili beta (β) raspada. Generalno, energija takvog γ -zraka može biti od 10 keV do 5 MeV [1].

Terestrijalno γ -zračenje, tj. γ -zračenje iz tla, potiče od prirodnih radionuklida (radionuklida iz radioaktivnih nizova, ^{40}K , itd.), ali i od vještačkih radionuklida koji su dospjeli u zemljište iz atmosfere, nakon nuklearnih proba i havarija u nuklearnim elektranama.

Gama zračenje po svojoj prirodi (nema naelektrisanje i masu, ne skreće u magnetnom polju) je prodorno zračenje, ali mu je sposobnost jonizacije sredine manja od one koju imaju naelektrisane čestice, jer je prolazak čestica kroz materiju okarakterisan, kako gubitkom energije, tako i skretanjem sa upadne putanje. Skretanje čestica je posljedica elastičnih i neelastičnih sudara koji se mogu ponoviti mnogo puta pri prolasku čestice kroz materiju. Kao posljedice javljaju se i zakočno zračenje, Čerenkovljevo zračenje, nuklearne reakcije [2,3].

Gama zračenje interaguje sa materijom kroz tri efekta:

- fotoelektrični efekat (γ -zrak interaguje sa vezanim elektronom i ovaj efekat dominira na niskim energijama, za veliko Z ; Z je redni broj),
- Komptonov efekat (γ -zrak interaguje sa slabo vezanim elektronom, i efekat dominira na srednjim energijama, za nisko Z) i
- kreacija para elektron-pozitron (efekat dominira na visokim energijama, za velike vrijednosti Z).

Ako se posmatra radioaktivni izotop sa početnim brojem jezgara N_0 i vremenom poluraspada $T_{1/2}$, onda se pomoću zakona radioaktivnog raspada može odrediti broj jezgara nakon nekog vremena t [1]:

$$N(t) = N_0 / 2^{t/T_{1/2}}. \quad (1.1)$$

Vjerovatnoća raspada je *konstanta raspada*. Ova veličina se često koristi umjesto $T_{1/2}$, i izračunava se po sljedećoj formuli [1]:

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}, \quad (1.2)$$

pa sada promjena broja radioaktivnih jezgara sa vremenom postaje [1]:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}. \quad (1.3)$$

Brzina raspadanja jezgara u radioaktivnom izvoru se naziva aktivnost izvora, izražava se pomoću jedinice bekerel (Bq), a računa preko [1]:

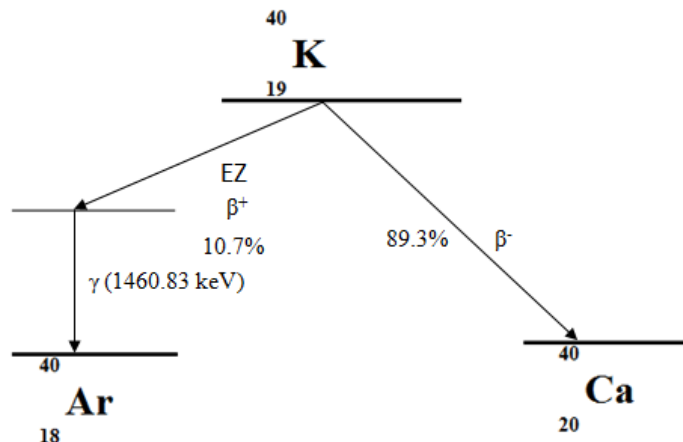
$$A(t) = \left| \frac{dN}{dt} \right| = \lambda N(t) = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\lambda t}, \quad (1.4)$$

gdje je A_0 početna aktivnost. Jedinična aktivnost (1 Bq) predstavlja jedan raspad u jedinici vremena.

Važna veličina je takođe i koncentracija aktivnosti koja predstavlja aktivnost po jedinici mase uzorka (Bq/kg).

1.1. Prirodni radioaktivni nizovi i ^{40}K

Prirodni izotop kalijuma ^{40}K ima dug period poluraspada ($1.28 \cdot 10^9$ godina [4]) i raspada se (slika 1.1.) β^- -raspadom u ^{40}Ca (89.3 %) i elektronskim zahvatom i β^+ -raspadom u ^{40}Ar (10.7 %), pri čemu se emituje γ -zrak energije 1460.83 keV. Ovaj zrak se koristi u γ -spektrometriji za detekciju ^{40}K i analizu njegove aktivnosti u nekom uzorku.



Slika 1.1. Šema raspada ^{40}K .

Prirodni radioaktivni nizovi su $^{235}\text{U} \rightarrow ^{207}\text{Pb}$, $^{238}\text{U} \rightarrow ^{206}\text{Pb}$ i $^{232}\text{Th} \rightarrow ^{208}\text{Pb}$, sa periodima poluraspada početnih izotopa $7.03 \cdot 10^8$ godina, $4.468 \cdot 10^9$ godina i $1.405 \cdot 10^{10}$ godina, respektivno [4].

Tabela 1.1. Produkti raspada ^{235}U [5].

Naziv nuklida	Oznaka nuklida	Energija i intenzitet γ -zraka
Uranijum-235	$^{235}_{92}\text{U}$	185.715 keV (52.7 %), 143.764 keV (10.96 %)
Torijum-231	$^{231}_{90}\text{Th}$	25.646 keV (14.5 %)
Protaktinijum-231	$^{231}_{91}\text{Pa}$	27.3 keV (10.3 %)
Aktinijum-227	$^{227}_{89}\text{Ac}$	
Torijum-227	$^{227}_{90}\text{Th}$	235.971 keV (12.3 %)
Francijum-223	$^{223}_{87}\text{Fr}$	
Radijum-223	$^{223}_{88}\text{Ra}$	269.459 keV (13.7 %)
Astatin-219	$^{219}_{85}\text{At}$	
Radon-219	$^{219}_{86}\text{Rn}$	271.23 keV (10.8 %)
Bizmut-215	$^{215}_{83}\text{Bi}$	
Polonijum-215	$^{215}_{84}\text{Po}$	
Astatin-215	$^{215}_{85}\text{At}$	
Olovo-211	$^{211}_{82}\text{Pb}$	
Bizmut-211	$^{211}_{83}\text{Bi}$	351.06 keV (12.91 %)
Polonijum-211	$^{211}_{84}\text{Po}$	
Talijum-207	$^{207}_{81}\text{Tl}$	
Olovo-207	$^{207}_{82}\text{Pb}$	

Uranijum-aktinijumski radioaktivni niz ($^{235}\text{U} \rightarrow ^{207}\text{Pb}$) čini petnaest radioizotopa, koji su nastali nakon 12 α - i 9 β -raspada [4,5]. Analize [5] su pokazale da se pet radionuklida raspada na dva načina: ^{227}Ac , ^{223}Fr , ^{219}At , ^{215}Po , ^{211}Bi , a u svim slučajevima, dominantan je jedan raspad (3 puta α - i 2 puta β -raspad). U tabeli 1.1. su prikazani članovi ovog niza, a markirani su oni radionuklidi nakon čijeg raspada se javljaju intenzivniji γ -zraci, čije su energije takođe date u tabeli 1.1, [5].

Kako je prirodna zastupljenost ovog radioaktivnog niza manja u odnosu na ostala dva, predmet mjerenja i analize su radionuklidi iz nizova ^{238}U i ^{232}Th .

Uranijum-radijumski niz ($^{238}\text{U} \rightarrow ^{206}\text{Pb}$) ima osamnaest radioizotopa, koji su rezultat 13 α - i 11 β -raspada [5]. Nakon ovih raspada emituje se γ -zračenje, tako da se aktivnosti radionuklida mogu odrediti mjerenjem tog zračenja, tj. γ -spektrometrijski.

Radionuklidi koji pripadaju ovom nizu su dati u tabeli 1.2, gdje markirani radionuklidi predstavljaju one nakon čijeg raspada se iz nastalih jezgara emituju intenzivniji γ -zraci [5].

Detaljne analize date u literaturi [5] pokazuju sljedeće. Jezgro ^{238}U se pri α -raspadu transformiše u jezgro ^{234}Th , pri čemu se emituju 2 γ -zraka. Zatim se β^- -raspadom jezgro ^{234}Th transformiše u $^{234\text{m}}\text{Pa}$ i ^{234}Pa .

Pa-234m i ^{234}Pa se transformišu u ^{234}U uz emisiju ukupno 513 γ -zraka, a ^{234}U α -raspadom prelazi u ^{230}Th uz emisiju 9 γ -zraka.

Th-230 se takođe α -raspadom transformiše u ^{226}Ra , uz emisiju 13 γ -zraka.

Ra-226 se α -raspadom transformiše u ^{222}Rn uz emisiju 7 γ -zraka, ^{222}Rn se takođe putem α -raspada dalje transformiše u ^{218}Po uz emisiju 1 γ -zraka.

Po-218 se pri β^- -raspadu transformiše u ^{218}At , a drugi način transformacije je α -raspad u olovo (^{214}Pb), gdje nema emisije γ -zraka.

Pb-214 se transformiše β^- -raspadom u ^{214}Bi , uz emisiju 34 γ -zraka, nakon čega ^{214}Bi pri β^- -raspadu prelazi u ^{214}Po , uz emisiju 294 γ -zraka. Drugi način raspada ^{214}Bi je kada se α -raspadom transformiše u ^{210}Tl , uz emisiju 2 γ -zraka.

Beta minus raspadom se dalje ^{210}Tl transformiše u ^{210}Pb , što je praćeno emisijom 24 γ -zraka, a takođe se ^{214}Po transformiše u ^{210}Pb pri α -raspadu, uz emisiju 2 γ -zraka.

Pb-210 se β^- -raspadom transformiše u ^{210}Bi , uz emisiju 1 γ -zraka, a α -raspadom se transformiše u ^{206}Hg .

Bi-210 pri β^- -raspadu prelazi u ^{210}Po , a drugi način transformacije je α -raspad do ^{206}Tl , koji se dobija i iz ^{206}Hg . Na kraju, α -raspad ^{210}Po dovodi do stabilnog olova ^{206}Pb .

Tabela 1.2. Produkti raspada ^{238}U [5].

Naziv nuklida	Oznaka nuklida	Energija i intenzitet γ -zraka
Uranijum-238	$_{92}\text{U}^{238}$	
Torijum-234	$_{90}\text{Th}^{234}$	
Metastabilni protaktinijum-234	$_{91}\text{Pa}^{234\text{m}}$	
Protaktinijum-234	$_{91}\text{Pa}^{234}$	131.3 keV (18 %), 946 keV (13.4 %)
Uranijum-234	$_{92}\text{U}^{234}$	
Torijum-230	$_{90}\text{Th}^{230}$	
Radijum-226	$_{88}\text{Ra}^{226}$	
Radon-222	$_{86}\text{Rn}^{222}$	
Polonijum-218	$_{84}\text{Po}^{218}$	
Astatin-218	$_{85}\text{At}^{218}$	
Radon-218	$_{86}\text{Rn}^{218}$	
Olovo-214	$_{82}\text{Pb}^{214}$	351.932 keV (37.6 %), 295.224 keV (19.3 %)
Bizmut-214	$_{83}\text{Bi}^{214}$	609.312 keV (46.1 %), 1764.494 keV (15.4 %), 1120.287 keV (15.1 %)
Polonijum-214	$_{84}\text{Po}^{214}$	
Talijum-210	$_{81}\text{Tl}^{210}$	799.7 keV (99 %), 298 keV (79 %), 1316 keV (21 %), 1210 keV (17 %), 1070 keV (12 %)
Olovo-210	$_{82}\text{Pb}^{210}$	
Bizmut-210	$_{83}\text{Bi}^{210}$	
Polonijum-210	$_{84}\text{Po}^{210}$	
Živa-206	$_{80}\text{Hg}^{206}$	
Talijum-206	$_{81}\text{Tl}^{206}$	
Olovo-206	$_{82}\text{Pb}^{206}$	

Torijumski niz ($^{232}\text{Th} \rightarrow ^{208}\text{Pb}$) čini deset radioizotopa, koji nastaju nakon 7 α - i 5 β -raspada [5]. Ovi raspadi se dešavaju uz emisiju γ -zračenja, tako da se aktivnosti radionuklida iz

torijumovog niza mogu određivati γ -spektrometrijski. Svi radionuklidi se raspadaju ili α - ili β -raspadom, osim ^{212}Bi koji se raspada i α - i β -raspadom. U tabeli 1.3. su navedeni radionuklidi iz niza ^{232}Th , gdje markirani radionuklidi predstavljaju one nakon čijih raspada se javljaju intenzivniji γ -zraci.

Tabela 1.3. Produkti raspada ^{232}Th [5].

Naziv nuklida	Oznaka nuklida	Energija i intenzitet γ -zraka
Torijum-232	$_{90}\text{Th}^{232}$	
Radijum-228	$_{88}\text{Ra}^{228}$	
Aktinijum-228	$_{89}\text{Ac}^{228}$	911.204 keV (25.8 %), 968.971 keV (15.8 %), 338.32 keV (11.27 %)
Torijum-228	$_{90}\text{Th}^{228}$	
Radijum-224	$_{88}\text{Ra}^{224}$	
Radon-220	$_{86}\text{Rn}^{220}$	
Polonijum-216	$_{84}\text{Po}^{216}$	
Olovo-212	$_{82}\text{Pb}^{212}$	238.632 keV (43.3 %)
Bizmut-212	$_{83}\text{Bi}^{212}$	
Polonijum-212	$_{84}\text{Po}^{212}$	
Talijum-208	$_{81}\text{Tl}^{208}$	2614.533 keV (99 %), 583.191 keV (84.5 %), 510.77 keV (22.6 %), 860.564 keV (12.42 %)
Olovo-208	$_{82}\text{Pb}^{208}$	

Analize u literaturi [5] pokazuju da se ^{232}Th α -raspadom transformiše u ^{228}Ra , uz emisiju 2 γ -zraka. Nakon toga se ^{228}Ra transformiše β^- -raspadom u ^{228}Ac iz koga se emituje 9 γ -zraka. Ac-228 se takođe β^- -raspadom transformiše u ^{228}Th , uz 262 γ -zraka. Potom se ^{228}Th α -raspadom transformiše u ^{224}Ra uz emisiju 14 γ -zraka, dok se nakon α -raspada ^{224}Ra u ^{220}Rn javlja 5 γ -zraka.

Rn-220 se dalje α -raspadom transformiše u ^{216}Po , uz emisiju 1 γ -zraka. Nakon toga se dalje ^{216}Po α -raspadom prevodi u ^{212}Pb , uz emisiju takođe 1 γ -zraka.

Raspad (β^-) ^{212}Pb u ^{212}Bi dešava se uz emisiju 12 γ -zraka, a ^{212}Bi se α -raspadom transformiše u ^{208}Tl , a β^- -raspadom u ^{212}Po , što je praćeno emisijom ukupno 26 γ -zraka.

Stabilno olovo ^{208}Pb dobija se α -raspadom ^{212}Po , a takođe i β^- -raspadom ^{208}Tl , kada je jezgro ^{208}Pb pobuđeno, a njegova deekscitacija se vrši emisijom 29 γ -zraka.

Zračenje koje čovjek prima od spoljašnjih prirodnih izvora dolazi u najvećem dijelu od γ -zračenja koje emituju ^{40}K i radionuklidi iz nizova ^{238}U i ^{232}Th . I drugi terestrijalni radionuklidi (pomenuti ^{235}U i njegovi produkti raspada, izotopi ^{87}Rb , ^{138}La , ^{147}Sm i ^{176}Lu) postoje u prirodi, ali su doze zračenja koje čovjek od njih prima manje [6].

Zračenje na otvorenom prostoru (*outdoors*) dolazi od terestrijalnih radionuklida koji su prisutni u svim vrstama zemljišta. Njihov sadržaj zavisi od geološke podloge, tipa i karakteristika zemljišta. Na primjer, povećane nivoe zračenja pokazuje granit, a niže nivoe pokazuju sedimentne stijene [6].

Tabela 1.4. Koncentracije aktivnosti radionuklida u zemljištu južne Evrope [6].

Država	Koncentracije aktivnosti radionuklida u zemljištu (Bq/kg)							
	^{40}K		^{238}U		^{226}Ra		^{232}Th	
	Srednja vrijed.	Opseg	Srednja vrijed.	Opseg	Srednja vrijed.	Opseg	Srednja vrijed.	Opseg
Albanija	360	15-1150	23	6-96			24	4-160
Hrvatska	490	140-710	110	83-180	54	21-77	45	12-65
Kipar	140	0-670			17	0-120		
Grčka	360	12-1570	25	1-240	25	1-240	21	1-190
Portugalija	840	220-1230	49	26-82	44	8-65	51	22-100
Slovenija	370	15-1410			41	2-210	35	2-90
Španija	470	25-1650			32	6-250	33	2-210
Medijana na svjetskom nivou	400	140-850	35	16-110	35	17-60	30	11-64

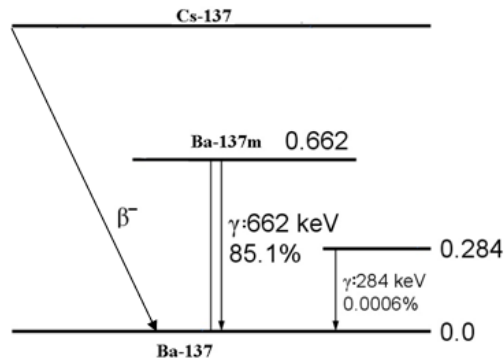
Koncentracije aktivnosti radionuklida u zemljištu pojedinih zemalja južne Evrope, koje su navedene u tabeli 1.4, uzete su iz izvještaja UNSCEAR (*United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation*) 2000 [6].

Izlaganje γ -zračenju u zatvorenom prostoru (*indoors*) uglavnom je posljedica sadržaja terestrijalnih radionuklida u materijalu od kojeg je objekat izgrađen. Na primjer, prema izvještaju UNSCEAR 2000 [6], ako su objekti izgrađeni od drveta, onda se *indoor* izlaganje može uporediti sa *outdoor* izlaganjem.

U kasnijem izvještaju (2008) UNSCEAR [7], takođe je dat pregled u vezi sa izlaganjem stanovništva prirodnim izvorima zračenja, uključujući terestrijalno. Na primjer, u tom izvještaju se navodi da se doze koje stanovništvo prima rijetko direktno mjere. Mnogo češće se one procjenjuju na osnovu rezultata monitoringa životne sredine i modela simulacije [7]. Zbog toga su u ovom radu doze zračenja i izmjerene i procijenjene na osnovu koncentracija aktivnosti radionuklida u zemljištu.

1.3. Cezijum-137

Od vještačkih radionuklida za teritoriju Crne Gore i Podgorice značajan je ^{137}Cs . Njegov period poluraspada je 30.1 godina i pri njegovom β^- -raspadu (slika 1.2.) nastaje ^{137}Ba . Gama zrak koji se pri raspadu emituje, 661.7 keV (85.1 %) [4], se koristi u γ -spektrometriji za detekciju ^{137}Cs i analizu njegove aktivnosti u nekom uzorku. Utvrđeno je da je porijeklo cezijuma, koga danas ima u zemljištu u Crnoj Gori, černobiljsko, tj. da je ovdje dospio nakon havarije u Černobilju 1986. godine [8].



Slika 1.2. Šema raspada ^{137}Cs .

2. DOZE ZRAČENJA – DEFINICIJE I MJERENJE

Samo detekcija zračenja, pa i γ -zračenja koje je predmet ovog rada, koja zahtijeva detektore (spektrometre), nije dovoljna da se procijene efekti koje ovo zračenje može izazvati kod čovjeka, nego je potrebno izmjeriti ili izračunati doze zračenja kojima je čovjek izložen. Zbog toga je potrebno definisati doze zračenja, a zatim i dati osnovne karakteristike uređaja kojima se te doze mjere. Uređaja za detekciju i dozimetriju zračenja ima mnogo, ali su u ovom radu, uz određene opšte podatke, predstavljeni samo oni koji su korišćeni za realizaciju eksperimentalnog dijela istraživanja.

2.1. Dozimetrijske veličine

Apsorbovana doza je srednja energija jonizujućeg zračenja koju apsorbuje jedinica mase materijala [9]:

$$D = \frac{\Delta E}{\Delta m} . \quad (2.1)$$

Jedinica za apsorbovanu dozu je grej (Gy), i to je izvedena jedinica jednaka J/kg. Jačina apsorbovane doze se definiše kao doza u jedinici vremena i izražava u jedinicama Gy/s.

Ekvivalentna doza je proporcionalna apsorbovanoj dozi, ali u obzir uzima različite težine zračenja. Različiti tipovi jonizujućih zračenja izazivaju različite efekte u živom tkivu, a ekvivalentna doza je [9]:

$$H = \sum_i D_i Q_i, \quad (2.2)$$

gdje je D_i srednja apsorbovana doza u jednom tkivu, a Q_i težinski faktor zračenja i . U tabeli 2.1. su dati težinski faktori za različita jonizujuća zračenja.

Jedinica za ekvivalentnu dozu je sivert (Sv). Sivert je kao i grej jednak jednom džulu po kilogramu (J/kg), jer su težinski faktori veličine bez dimenzije. Jačina ekvivalentne doze bila bi priraštaj ekvivalentne doze u nekom vremenskom intervalu.

Tabela 2.1. Vrijednosti težinskog faktora zračenja [9].

Težinski faktor (Q)	Vrsta zračenja
1	X-zračenje, γ -zračenje, elektroni i pozitroni
20	Alfa zračenje
5	Neutroni energije ispod 10 keV i iznad 20 MeV
10	Neutroni energije (10-100) keV, (2-20) MeV
20	Neutroni energije od 100 keV do 2 MeV
5	Protoni energije iznad 2 MeV

Efektivna doza je vezana za apsorbovanu dozu i težinski faktor zračenja, tj. za ekvivalentnu dozu, ali i za tkiva koja su ozračena. Ona je jednaka [9]:

$$E = \sum_j W_j H = \sum_i W_j \sum_i D_i Q_i, \quad (2.3)$$

gdje je W_j tkivni težinski faktor. Tkivni težinski faktor nema dimenziju, a odnosi se na različite osjetljivosti tkiva na zračenje. Preporuke ICPR (*International Commission on Radiological Protection*) 103 za vrijednosti pojedinih tkivnih faktora za određene organe, kao i sume tkivnih težinskih faktora za date organe, prikazane su u tabeli 2.2, [9]. Vrijednosti su drugačije od onih koje su bile preporučene ranije (u ICRP 60 [10], na primjer). Iz formule (2.3) slijedi da se efektivna doza procjenjuje.

Napomena: *Veličina koja se često koristi je jačina efektivne doze, koja predstavlja efektivnu dozu u jedinici vremena (Sv/s). Odnosno, često se razmatra efektivna doza koja je primljena tokom nekog vremena.*

Tabela 2.2. Vrijednost tkivnog težinskog faktora za određene organe [9].

Tkivo/organ	Tkivni težinski faktor (W_j)	Suma tkivnih težinskih faktora ($\sum_j W_j$)
Koštana srž, debelo crijevo, pluća, želudac, grudi i ostala tkiva	0.12	0.72
Gonade	0.08	0.08
Bešika, jednjak, jetra, štitna žlijezda	0.04	0.16
Kosti, mozak, pljuvačne žlijezde i koža	0.01	0.04

Kad se radi o terestrijalnom γ -zračenju koje je predmet ovog rada, osnovna veličina je jačina apsorbovane doze, koja se mjeri i procjenjuje da bi se ocijenilo izlaganje čovjeka ovoj vrsti zračenja.

Jačina apsorbovane doze (terestrijalno γ -zračenje, *outdoors*) na 1 m iznad tla se direktno mjeri ili (uz pretpostavku da su u najvećoj mjeri u zemljištu prisutni ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K , a od vještačkih radionuklida ^{137}Cs) procjenjuje koristeći formulu:

$$D = A_c(^{226}\text{Ra}) \cdot 0.462 + A_c(^{232}\text{Th}) \cdot 0.604 + A_c(^{40}\text{K}) \cdot 0.0417 + A_c(^{137}\text{Cs}) \cdot 0.1243, \quad (2.4)$$

gdje su A_c koncentracije aktivnosti radionuklida, a navedene brojne vrijednosti (u nGy/h po Bq/kg) su odgovarajući dozni koeficijenti za ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K i ^{137}Cs , respektivno [6, 11, 12, 13].

Da bi se procijenila odgovarajuća godišnja efektivna doza za odraslu osobu, uzima se u obzir konverzioni koeficijent (apsorbovane doze u vazduhu u efektivnu dozu) vrijednosti 0.7 Sv/Gy, i faktor izloženosti za spoljašnje ozračivanje *outdoors* u iznosu 0.2 [6]. Izraz za procjenu godišnje efektivne doze je onda:

$$E = D(\text{nGy/h}) \cdot 8760 \text{ h/y} \cdot 0.2 \cdot 0.7 \text{ Sv/Gy}. \quad (2.5)$$

2.1.1. Mjerenje doza kao mjera zaštite od zračenja

Zbog činjenice da se efektivna doza samo procjenjuje, za provjeru izloženosti zračenju preporučuje se mjerenje drugih veličina (operativnih). Za sve vrste spoljašnjeg zračenja, operativne veličine za nadzor prostora i lica definisane su na osnovu vrijednosti ekvivalentne doze u jednostavnom fantomu, u tzv. ICRU (*International Commission on Radiation Units and Measurements*) sferi. ICRU sfera je fantom kojim se aproksimira ljudsko tijelo. To je tkivno-ekvivalentna sfera prečnika 30 cm, gustine 1 g/cm^3 , i masenog sastava 76.2 % kiseonika, 11.1 % ugljenika, 10.1 % vodonika i 2.6 % azota [9].

Operativne veličine za spoljašnje izlaganje, odnosno operativne veličine za nadzor prostora i lica su [9]:

- $H^*(10)$ ambijentalni ekvivalent doze,
- $H'(d, \Omega)$ usmjereni ambijentalni ekvivalent doze,
- $H_p(d)$ lični ekvivalent doze

gdje je d – dubina u mm ispod površine ICRU sfere, a Ω je upadni ugao na njenu površinu. Jedinica doznih ekvivalenata je Sv.

Ambijentalni ekvivalent doze ($H^*(10)$) je dozni ekvivalent u tački radijacionog polja koji bi izazvao odgovarajuće polje u ICRU sferi na dubini 10 mm. Prema ICRP 103 [9], ova veličina odgovara većini praktičnih situacija kad je u pitanju spoljašnje izlaganje zračenju, kada se na osnovu njene vrijednosti mogu procijeniti gornje granice doza koje čovjek prima, a koje se upoređuju sa propisanim granicama.

Usmjereni ambijentalni ekvivalent doze ($H'(d, \Omega)$) se najčešće odnosi na dubinu 0.07 m, a rjeđe i na dubinu 3 mm. Koristi se za monitoring prostora u slučaju manje prodornih zračenja. Prema ICRP 103 [9], $H'(0.07, \Omega)$ može da se koristi i za procjene kad je u pitanju očno sočivo, za koje se navodi i monitoring pomoću $H'(3, \Omega)$ u kombinaciji sa $H_p(3)$.

Lični ekvivalent doze ($H_p(d)$) je ekvivalent doze u mekom tkivu (ICRU sfera), na određenoj dubini (d) ljudskog tijela ispod specificirane tačke. Koristi se za individualni monitoring (monitoring lica) i određivanje doze prodornih i manje prodornih zračenja za [9]:

- $d = 10$ mm (prodorna zračenja),
- $d = 0.07$ mm (koža i manje prodorna zračenja),
- $d = 3$ mm (očno sočivo).

Pomenuta specificirana tačka je obično pozicija na kojoj se nosi lični dozimetar.

Prema ICRP 103 [9], za procjene efektivne doze preporučuje se dubina 10 mm, za procjene ekvivalentne doze za kožu, ruke i stopala, dubina 0.07 mm, a za očno sočivo dubina 3 mm.

Za γ -zračenje i spoljašnje izlaganje koje je predmet ovog rada, značajne su provjere (mjerjenja) $H^*(10)$ i $H_p(10)$. Upravo te doze su mjerene u prethodnom istraživanju [14] koje se odnosilo na zatvoreni prostor, tj. laboratorije Prirodno-matematičkog fakulteta Univerziteta Crne Gore.

2.1.1.1. Rezultati mjerenja doza u laboratorijama Prirodno-matematičkog fakulteta u Podgorici

Koristeći termoluminiscentne dozimetre (TLD) *Centra za ekotoksikološka ispitivanja* iz Podgorice – za mjerenje ličnih doza, procijenjen je nivo izloženosti zaposlenih na Prirodno-matematičkom fakultetu (PMF) Univerziteta Crne Gore, koji posao obavljaju u trima laboratorijama za fiziku [14].

TLD-100 (LiF) (slika 2.1.) dozimetre nosila su tri zaposlena lica na PMF-u u periodu od 24. 03. 2015. godine do 28. 04. 2015. godine, tj. 36 dana, i dobijeni su rezultati predstavljeni u tabeli 2.3.



Slika 2.1. Lični dozimetar TLD-100 [14].

Tabela 2.3. Personalna ($H_p(10)$) doza zračenja za 36 dana [14].

Laboratorija u kojoj je osoba uglavnom boravila	Doza (μSv)
002	93.3
036	69.2
044	88.1

Termoluminiscentni dozimetri se često koriste za provjeru ličnih doza, a sastoje se od kristala (u ovom slučaju LiF), koji zadržava dio apsorbovane energije pri izlaganju jonizujućem zračenju. Ta apsorbovana energija je proporcionalna dozi zračenja. Dio te apsorbovane energije se oslobađa u vidu svjetlosti, pri određenim uslovima zagrijavanja, i ta svjetlost se detektuje.

Sistem za ličnu dozimetriju u *Centru za ekotoksikološka ispitivanja* gdje su očitani dozimetri se, uz dozimetre, sastoji od čitača HARSHAW 4500, iradijatora Bicorn 2210 (^{90}Sr , aktivnosti 33 MBq), predstavljenog na slici 2.2, WinRems softvera i fantoma.



Slika 2.2. Iradijator Bicorn 2210 (^{90}Sr) [14].

Performanse sistema su [15]:

- stabilnost visokog napona: $\pm 0.005 \%$;
- linearnost: devijacija manja od 1% ;
- fonski šum: manji od $1 \mu\text{Gy}$;
- vrijeme zagrijavanja: 20 minuta;
- vrste i energije zračenja:
 - fotoni energija većih od 1 keV ,
 - neutroni od termalnih do energija od 100 MeV ,
 - beta zračenje energija većih od 70 MeV ;
- linearni opseg mjerenja ($>1 \%$):
 - LiF: Mg, Ti – $100 \mu\text{Gy}$ do 1 Gy ,
 - LiF: Mg, Cu, P – $10 \mu\text{Gy}$ do 10 Gy ;
- ponovljivost: varijacija manja od 2% (zasnovano na jednoj standardnoj devijaciji za 10 mjerenja ^{137}Cs na 1 mGy);
- minimum detekcije: manji od $10 \mu\text{Gv}$ (zasnovano na $2.26 \times$ standardna devijacija 10 ponovljenih evaluacija neizloženog dozimetra).

Pri istom istraživanju mjerene su i ambijentalne doze zračenja u istim prostorijama. Korišćen je uređaj INSPECTOR 1000 (Canberra) (slika 2.3.), a isti uređaj je korišćen i za dio eksperimentalnih istraživanja koja su predmet ovog rada (za direktno mjerenje doza terestrijalnog γ -zračenja u Podgorici – *outdoors*).



Slika 2.3. Canberra INSPECTOR 1000 [14].

INSPECTOR 1000 [16] je višekanalni digitalni detektor koji se koristi za detekciju zračenja. Ovaj detektor se koristi za mjerenje doze zračenja, kao i za identifikaciju radionuklida. Dizajniran je tako da je rukovanje ovim detektorom veoma jednostavno. Posjeduje LCD displej, NaI i neutronska sondu (za mjerenje gama i neutronske zračenja) i bateriju. Dimenzija samog uređaja je 19 cm x 16.5 cm x 6.4 cm, a masa sa dvije sonde je 3.5 kg. LCD displej detektora je jasno vidljiv, kako pri dnevnoj svjetlosti, tako i noću. Rezolucija displeja je 320 x 240 piksela, a dijagonala 9 cm. Na displeju se može izabrati skala 0.1, 1, 10, 100, 1000 i 10 000, auto i podesiva od strane korisnika; i jedinice: $\mu\text{R/h}$, mR/h , R/h , $\mu\text{Sv/h}$, mSv/h , $\mu\text{rem/h}$, mrem/h , rem/h . Kapacitet baterije iznosi 2.2 Ah, vrijeme punjenja je 3 h, a maksimalno vrijeme rada sa punom baterijom je 9 h. Radni uslovi detektora su temperatura u opsegu od -10 do $+50$ °C, i vlažnost do 80 %. Ovaj detektor može da izdrži pad na beton sa 1 m visine.

Canberra INSPECTOR 1000 sa NaI sondom ima energetski opseg od 50 keV do 3 MeV. Minimum jačine doze, odnosno doznog ekvivalenta ($H^*(10)$), je 10 nSv/h, a maksimum iznosi 100 mSv/h. Opseg za ukupnu (kumulativnu) dozu ima vrijednosti od 100 nSv do 1 Sv [16].

Mjerenje doze pomoću Canberra INSPECTOR 1000 sa NaI sondom je izvršeno u istim laboratorijama (002, 036 i 044), tj. u prostorijama gdje su većinu radnog vremena provela lica koja su nosila TLD-100 za provjeru lične doze – i to: u centru prostorije i na mjestu gdje su ostavljani mantili nakon radnog vremena (na visini 1 m, kao i u visini grudi, što odgovara poziciji ličnog dozimetra dok ga osoba nosi).

U tabeli 2.4. predstavljeni su rezultati mjerenja, a u tabelama 2.5. i 2.6. su date određene procjene.

Zaključeno je da je realni nivo izloženosti manji, s obzirom na vrijeme koje osobe provode u zatvorenom prostoru, tj. u tim laboratorijama [14]. Takođe, direktna mjerenja $H^*(10)$ su trenutna, dok su mjerenja pomoću TLD-100 pokazala nakupljenu dozu tokom 36 dana.

Tabela 2.4. Izmjerene vrijednosti (jačine) doze zračenja u laboratorijama PMF-a [14].

Laboratorija	Doza u centru laboratorije ($\mu\text{Sv/h}$)		Doza u blizini mjesta u laboratoriji gdje je ostavljan mantil sa TL dozimetrom ($\mu\text{Sv/h}$)	
	Na visini 1 m iznad poda	U visini grudi	Na visini 1 m iznad poda	U visini grudi
002	0.030	0.027	0.034	0.031
036	0.025	0.026	0.028	0.030
044	0.034	0.035	0.045	0.040

Tabela 2.5. Procijenjene mjesečne doze zračenja u laboratorijama PMF-a [14].

Laboratorija	Doza u centru laboratorije (μSv)		Doza u blizini mjesta u laboratoriji gdje je ostavljan mantil sa TL dozimetrom (μSv)	
	Na visini 1 m iznad poda	U visini grudi	Na visini 1 m iznad poda	U visini grudi
002	21.6	19.4	24.5	22.3
036	18.0	18.7	20.2	21.6
044	24.5	25.2	32.4	28.8

Tabela 2.6. Procijenjene doze zračenja u laboratorijama PMF-a za 36 dana [14].

Laboratorija	Doza u centru laboratorije (μSv)		Doza u blizini mjesta u laboratoriji gdje je ostavljan mantil sa TL dozimetrom (μSv)	
	Na visini 1 m iznad poda	U visini grudi	Na visini 1 m iznad poda	U visini grudi
002	25.9	23.3	29.4	26.8
036	21.6	22.5	24.2	25.9
044	29.4	30.2	38.9	34.6

2.2. Ograničenje doza – propisi

S ciljem zaštite ljudi i životne sredine u Crnoj Gori je usvojen *Zakon o zaštiti od jonizujućeg zračenja i radijacionoj sigurnosti* (Sl. list CG, br. 56/09 i 58/09) [17]. Na ovaj način „uređuje se zaštita života i zdravlja ljudi i zaštita životne sredine od štetnog djelovanja jonizujućeg zračenja, obavljanje radijacione djelatnosti, promet izvora jonizujućeg zračenja i radioaktivnih materijala, upravljanje radioaktivnim otpadom, postupanje u slučaju radijacionog udesa, kao i druga pitanja od značaja za zaštitu od jonizujućeg zračenja i radijacionu sigurnost“. Zakon se ne odnosi na prirodna zračenja (zračenja iz tla, hrane i pića, vazduha), ukoliko ta zračenja nijesu promijenjena od strane čovjeka [17].

Pored *Zakona o zaštiti od jonizujućeg zračenja i radijacionoj sigurnosti* u Crnoj Gori važi i *Pravilnik o granicama izlaganja jonizujućim zračenjima* [18], koji propisuje granice izlaganja jonizujućim zračenjima profesionalno izloženih lica i stanovništva, predstavljene u tabeli 2.7. Takođe, na primjer, ovim *Pravilnikom* propisana je granica izloženosti za lica koja tokom školovanja koriste izvore zračenja (između 16 i 18 godina starosti) – tabela 2.8, [18].

Tabela 2.7. Granice godišnjih doza zračenja [18].

	Profesionalno izložena lica	Stanovništvo
Efektivna doza za cijelo tijelo	100 mSv za pet godina, prosječno 20 mSv/god, pri čemu je dozvoljeno maksimalno 50 mSv tokom godine	1 mSv
Ekvivalentna doza za pojedine organe:		
očno sočivo	150 mSv	15 mSv
djelove ekstremiteta (šake, podlaktice, stopala i gležnjevi)	500 mSv	50 mSv
kožu (ekvivalentna doza usrednjena „po površini kože od 1 cm ² , nezavisno od veličine izložene površine“)	500 mSv	50 mSv

Tabela 2.8. Granice godišnjih doza zračenja za lica između 16 i 18 godina koja tokom školovanja koriste izvore zračenja [18].

Efektivna doza za cijelo tijelo	6 mSv
Ekvivalentna doza za pojedine organe:	
očno sočivo	45 mSv
kožu (ekvivalentna doza usrednjena „po površini kože od 1 cm ² , nezavisno od veličine izložene površine“)	150 mSv
djelove ekstremiteta (šake, podlaktice, stopala i gležnjevi)	150 mSv

U tabeli 2.9. date su granične vrijednosti efektivne doze za profesionalno izložena lica (lica koja su u kontaktu sa izvorima zračenja) i stanovništvo, po preporukama ICRP 103 [9].

Tabela 2.9. Granične vrijednosti doza za izlaganja zračenju [9].

	Profesionalno izložena lica	Stanovništvo
Efektivna doza	20 mSv godišnje, urednjeno za vremenski period od 5 godina	1 mSv za jednu godinu
Godišnji ekvivalent doze za:		
očna sočiva	150 mSv	15 mSv
kožu	500 mSv	50 mSv
ekstremitete	500 mSv	-

Za profesionalno izložena lica preporučuje se da godišnja efektivna doza ne pređe 20 mSv za godinu dana, što predstavlja srednju vrijednost za 5 godina (ukupno 100 mSv za 5 godina). Za stanovništvo se preporučuje da godišnja efektivna doza bude maksimalno 1 mSv. Međutim, za godinu dana mogu se tolerisati i veće vrijednosti od 1 mSv, ali se ne smije preći vrijednost od 5 mSv za 5 godina.

3. MJERENJE DOZA TERESTRIJALNOG GAMA ZRAČENJA U PODGORICI

3.1. Doze terestrijalnog zračenja u svijetu i u Crnoj Gori

U tabeli 3.1. su date godišnje efektivne doze usljed izlaganja prirodnim izvorima zračenja na svjetskom nivou, iz izvještaja UNSCEAR 2008 [7].

Tabela 3.1. Godišnje efektivne doze usljed izlaganja prirodnim izvorima zračenja na svjetskom nivou [7].

Izvor	Godišnja efektivna doza (mSv)	
	Srednja vrijednost	Opseg
<i>Kosmičko zračenje</i>		
Jonizujuće i fotonska komponenta	0.28	
Neutronska komponenta	0.10	
Kosmogeni radionuklidi	0.01	
Ukupno:	0.39	0.3-1.0
<i>Eksterno terestrijalno zračenje</i>		
Outdoors	0.07	
Indoors	0.41	
Ukupno:	0.48	0.3-1.0
<i>Inhalacija</i>		
Uranijumski i torijumski niz	0.006	
Radon (^{222}Rn)	1.15	
Toron (^{220}Rn)	0.10	
Ukupno:	1.26	0.2-10
<i>Ingestija</i> ^{40}K	0.17	
Uranijumski i torijumski niz	0.12	
Ukupno:	0.29	0.2-1.0
UKUPNO:	2.4	1-13

Godišnja efektivna doza usljed izlaganja prirodnim izvorima zračenja je u opsegu od 1 mSv do 13 mSv, sa srednjom vrijednošću 2.4 mSv. Iz tabele 3.1. se vidi da srednja godišnja doza usljed terestrijalnog zračenja *outdoors* iznosi 0.07 mSv, a *indoors* – 0.41 mSv.

Jačina apsorbovane doze u vazduhu, izračunata na osnovu koeficijenata datih u izrazu (2.4) i medijana srednjih vrijednosti koncentracija aktivnosti radionuklida u zemljištu na svjetskom nivou (tabela 1.4: 400 Bq/kg za ^{40}K , 35 Bq/kg za ^{238}U i 30 Bq/kg za ^{232}Th), ukupno iznosi 51 nGy/h. Odnosno, 17 nGy/h od ^{40}K , 16 nGy/h od ^{238}U -niza i 18 nGy/h od ^{232}Th -niza [6].

Spoljašnja izlaganja terestrijalnom γ -zračenju u pojedinim zemljama južne Evrope daju jačine apsorbovane doze u vazduhu predstavljene u tabeli 3.2, [6].

Tabela 3.2. Doze od terestrijalnog γ -zračenja u zemljištu južne Evrope [6].

Država	Jačina apsorbovane doze u vazduhu (nGy/h)				Odnos <i>Indoors/Outdoors</i>
	<i>Outdoors</i>		<i>Indoors</i>		
	Srednja vrijed.	Opseg	Srednja vrijed.	Opseg	
Albanija	71	20-350	100	20-300	1.4
Kipar	18	9-52			
Grčka	56	30-109	67	36-131	1.2
Italija	74	3-228	105	0-700	1.4
Portugalija	84	4-230	101	4-280	1.2
Slovenija	56	4-147	75	40-250	1.3
Španija	76	40-120	110	57-180	1.4
Medijana na svjetskom nivou	57	18-93	75	20-200	1.3 (0.6-2.3)

U tabeli 3.3. su dati podaci iz izvještaja UNSCEAR 2000 [6], o jačinama apsorbovanih doza *outdoors* koje su procijenjene na osnovu koncentracija aktivnosti radionuklida u zemljištu određenog broja zemalja svijeta, kao i one koje su u tim zemljama direktno izmjerene.

Tabela 3.3. Doze zračenja *outdoors* [6].

Država	Jačina apsorbovane doze u vazduhu (nGy/h)		
	Procijenjena iz koncentracija aktivnosti radionuklida	Direktno izmjerena	Odnos procijenjene i izmjerene jačine apsorbovane doze
Luksemburg	72	49	1.5
Irska	58	42	1.4
Švedska	77	56	1.4
Indija	69	56	1.2
Kina (Hong Kong)	107	87	1.2
Norveška	86	73	1.2
SAD	55	47	1.2
Švajcarska	49	45	1.1
Kazahstan	65	63	1.0
Belgija	44	43	1.0
Portugalija	86	84	1.0
Malezija	93	92	1.0
Egipat	32	32	1.0
Slovenija	56	56	1.0
Rumunija	58	59	1.0
Kina	58	62	0.9
Poljska	42	45	0.9
Estonija	54	59	0.9
Slovačka	60	67	0.9
Japan	45	53	0.8
Litvanija	48	58	0.8
Tajland	62	77	0.8
Rusija	52	65	0.8
Bugarska	56	70	0.8
Mađarska	48	61	0.8
Alžir	54	70	0.8
Iran	53	71	0.7
Danska	39	52	0.7
Španija	54	76	0.7
Grčka	39	56	0.7
Albanija	40	71	0.6
Sirija	33	59	0.6

U dostupnoj literaturi u vezi sa dozama γ -zračenja terestrijalnog porijekla u Crnoj Gori, navedeni su različiti metodi njihovog određivanja. Za potrebe ovog rada razmatrano je nekoliko preporučenih publikacija.

Na primjer, 1994. godine su vršena mjerenja *in situ* γ -spektrometrijom pomoću HPGe (*High Purity Germanium*) detektora [19]. Rezultati sa 42 lokacije širom Crne Gore pokazali su da je srednja vrijednost doze koja dolazi iz zemljišta 6.3 $\mu\text{R/h}$ (tj. 55.2 nGy/h), sa medijanom 5.6 $\mu\text{R/h}$ (tj. 49.1 nGy/h). Doza od prirodnih terestrijalnih γ -izvora (^{40}K , ^{238}U i ^{232}Th) ima srednju vrijednost 4.4 $\mu\text{R/h}$ (tj. 38.6 nGy/h) i medijanu 3.47 $\mu\text{R/h}$ (tj. 32.4 nGy/h), a doza od vještačkog ^{137}Cs – 1.9 $\mu\text{R/h}$ (tj. 16.7 nGy/h) i 1.9 $\mu\text{R/h}$ (tj. 16.7 nGy/h), respektivno [19].

U laboratorijskim mjerenjima koncentracija aktivnosti prirodnih radionuklida (^{40}K , ^{226}Ra i ^{232}Th) pomoću HPGe spektrometra, u uzorcima zemljišta sa 24 lokacije u Crnoj Gori (3 u Podgorici), dobijeni su rezultati na osnovu kojih su procijenjene jačina apsorbovane doze na 1 m visine iznad tla (izraz (2.4) bez ^{137}Cs), i godišnja efektivna doza (izraz (2.5)) [20]. Prema tim podacima, minimum, maksimum, srednja vrijednost, standardna devijacija i medijana jačine apsorbovane doze u vazduhu iznose oko 27.9, 185, 63, 32.1 i 56 nGy/h, respektivno; a godišnjih efektivnih doza izazvanih terestrijalnim zračenjem *outdoors* – oko 34.2, 227, 77.2, 39.4 i 68.3 μSv , respektivno. Na tri lokacije u Podgorici jačine apsorbovanih doza bile su oko 55, 120 i 46 nGy/h, a procijenjene godišnje efektivne doze 67.6, 148 i 56.4 μSv [20].

Za teritoriju Mojkovca (13 lokacija), jačine apsorbovanih doza u vazduhu koje potiču od prirodnih radionuklida, čije su koncentracije aktivnosti u zemljištu takođe mjerene u laboratoriji HPGe spektrometrom, bile su u opsegu od 52.3 do 74.5 nGy/h, sa srednjom vrijednošću 65.2 nGy/h, standardnom devijacijom 6.2 nGy/h i medijanom 66.6 nGy/h [21]. Minimum, maksimum, srednja vrijednost, standardna devijacija i medijana godišnje efektivne doze koju donosi terestrijalno γ -zračenje *outdoors* procijenjeni su na oko 64.2, 91.3, 80, 7.56 i 81.7 μSv , respektivno [21].

Na 10 lokacija u Nikšiću [22] doze terestrijalnog zračenja direktno su mjerene uređajem koji je korišćen i u ovom radu (Canberra INSPECTOR 1000) i procijenjene na osnovu koncentracija aktivnosti radionuklida (^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th i ^{137}Cs) u zemljištu sa tih lokacija. Minimum, maksimum, srednja vrijednost, standardna devijacija i medijana direktno izmjerene jačine apsorbovane doze iznosili su 38, 95, 63.8, 17.6 i 64.5 nGy/h, respektivno; a procijenjene –

oko 61.3, 171, 103, 35.7 and 89.2 nGy/h, respektivno. Odnos ovih doza imao je opseg od 1.3 do 2 [22]. Što se tiče odgovarajućih godišnjih efektivnih doza, navode se vrijednosti oko 75.1, 210, 126, 43.8 i 109 μ Sv, respektivno (na osnovu procjena jačine apsorbovane doze) i 46.6, 116, 78.3, 21.6 i 79.1 μ Sv, respektivno (na osnovu mjerenja jačine apsorbovane doze) [22].

Pri istraživanjima lokaliteta u Crnoj Gori sa povećanim fonom terestrijalnog γ -zračenja, koja su obavljena 2008-2009. godine [23], koja su uključila svaku od četiri geotektonske jedinice (Durmitorsku, Visoki krš, Jadransko-jonsku i Budva-Cukali) i ukupno 138 lokacija, usvojen je kriterijum da se „kao lokalnost sa povećanim fonom zračenja smatra ona na kojoj je jačina apsorbovane doze zračenja D u vazduhu, na visini 1 m iznad tla, najmanje za 50% veća od srednje vrijednosti jačine apsorbovane doze za Crnu Goru, koja prema ranijim istraživanjima iznosi 55 nGy/h“. Jačine apsorbovanih doza u vazduhu mjerene uređajem VICTOREEN 190 SI sa NaI sondom, bile su u opsegu od 10 do 192 nGy/h, sa srednjom vrijednošću i medijanom od 56.3 i 56.4 nGy/h, respektivno [23]. Doza iznad 80 nG/h izmjerena je na ukupno 27 lokacija (13 u Durmitorskoj geotektonskoj jedinici, 12 u jedinici Visoki krš, 2 u Jadransko-jonskoj jedinici i 0 u jedinici Budva-Cukali) [23].

Predmet novijih detaljnih istraživanja [24], iz 2015. godine, bili su Bukovik i Bukovica, kao „lokalnosti sa najvećim fonom terestrijalnog zračenja u Crnoj Gori“. Srednja izmjerena (pomoću Canberra INSPECTOR 1000) jačina apsorbovane doze u vazduhu, na 1 m visine iznad tla, bila je 266 nGy/h u Bukoviku i 188 nGy/h u Bukovici (u ranijim istraživanjima – 192 i 148 nGy/h, respektivno). Opseg izmjerenih doza bio je (190-370) nGy/h, sa medijanom 270 nGy/h – u Bukoviku, i (110-310) nGy/h, sa medijanom 180 nGy/h – u Bukovici [24].

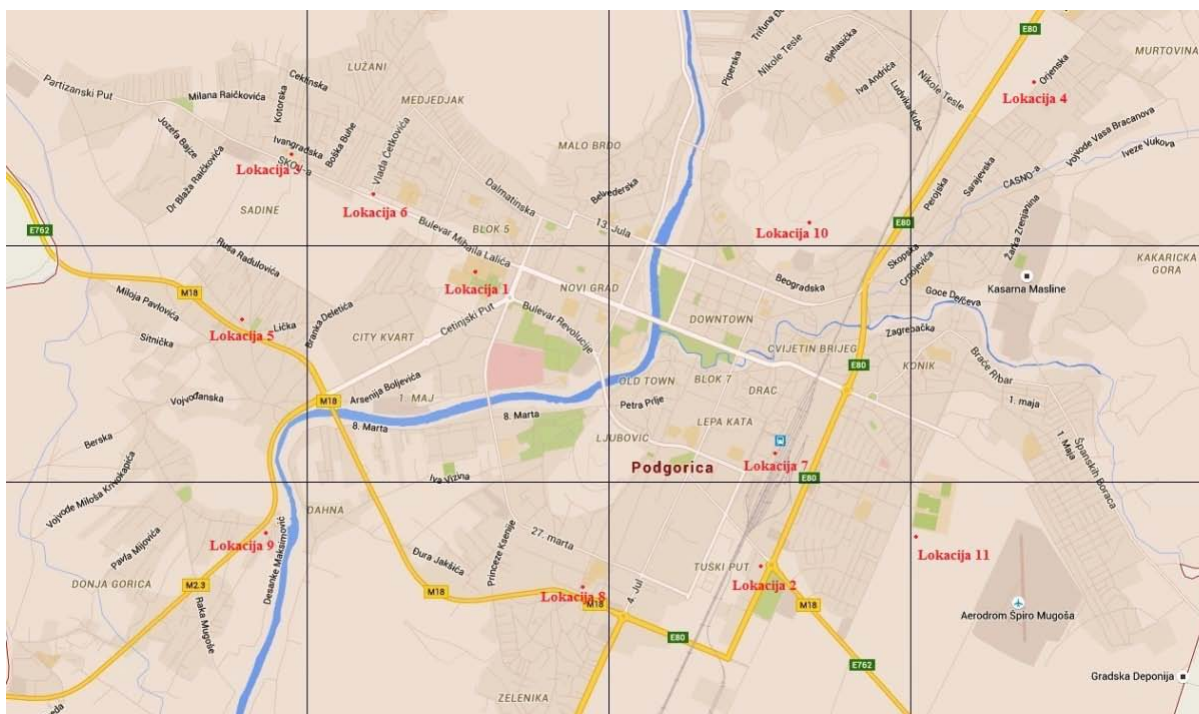
3.2. Lokacije mjerenja doza terestrijalnog gama zračenja *outdoors* u Podgorici

Podgorica je glavni grad Crne Gore, površine 1441 km², a po broju stanovnika je i najveći grad u državi (185 937 stanovnika, prema popisu iz 2011. godine) [25]. Nalazi se na nadmorskoj visini oko 45 m. Srednja godišnja temperatura u ovom gradu iznosi 17 °C, srednja godišnja suma padavina iznosi 896.9 L/m², srednja godišnja relativna vlažnost vazduha je 57 %,

broj dana sa kišom u toku godine je 92, a sa jakim vjetro – 132, dok je broj vedrih dana u toku godine 112 [25].

Za potrebe ovog istraživanja, na teritoriji grada Podgorice (slika 3.1.), mjerenje je izvršeno na 11 lokacija. Na istim lokacijama vršena su i mjerenja koncentracija radona u zemljištu, što je bilo predmet drugog istraživanja. Lokacije su javne površine, a izmjerena doza potiče od fonskog zračenja jer nijesu postojali dodatni izvori jonizujućeg zračenja. Odnosno, terestrijalni radionuklidi koji su, kako je prethodno navedeno, prisutni u svim vrstama zemljišta, daju prirodni fon, i čine da čovjek uvijek prima neku dozu zračenja.

U tabeli 3.4. su dati brojevi lokacija, koordinate mjernog mjesta (određene pomoću GPS sistema), kao i naziv lokacije.



Slika 3.1. Teritorija Podgorice [26] sa naznačenim mjernim lokacijama.

Tabela 3.4. Mjerne lokacije u Podgorici.

Lokacija	Koordinate lokacije	Naziv lokacije (bliži opis)
1	N: 42° 26' 35.5'' E: 19° 14' 43.3''	Prirodno-matematički fakultet (PMF) – kod zgrade tehničkih fakulteta
2	N: 42° 25' 37.7'' E: 19° 16' 20.6''	Centar za ekotoksikološka ispitivanja (CETI)
3	N: 42° 27' 04.8'' E: 19° 13' 44.7''	Vrtić Luna
4	N: 42° 27' 37.7'' E: 19° 17' 57.2''	U blizini O.Š. Dragiša Ivanović
5	N: 42° 26' 24.6'' E: 19° 13' 48.4''	Put prema Nikšiću
6	N: 42° 26' 53.9'' E: 19° 14' 15.8''	U parku kod O.Š. Radojica Perović
7	N: 42° 25' 48.1'' E: 19° 16' 23''	Parking kod Željezničke stanice
8	N: 42° 25' 20.4'' E: 19° 15' 09.9''	O.Š. Oktoih Zabjelo
9	N: 42° 25' 34.4'' E: 19° 13' 40.6''	DOM ZDRAVLJA Ambulanta Lješkopolje
10	N: 42° 26' 37.7'' E: 19° 16' 20.5''	Ispod brda Gorica
11	N: 42° 25' 26.9'' E: 19° 17' 0.01''	Kod stadiona Mladost

3.3. Mjerenje doza i uzorkovanje zemljišta

Mjerenje doze zračenja na izabranim lokacijama izvršeno je uređajem INSPECTOR 1000 sa NaI sondom (mjerenja su, nakon prethodnih test mjerenja, vršena u periodu jun-jul 2016. godine), čije karakteristike su prethodno navedene. Na svakoj od lokacija mjerenja su vršena na 1 m visine iznad tla i na nultoj visini, tj. na samom tlu, i u svim slučajevima uzeta je srednja vrijednost tri očitavanja. Na slici 3.2. je predstavljeno jedno postavljanje uređaja.



Slika 3.2. Uređaj INSPECTOR 1000 na lokaciji 7.

Ni na jednoj lokaciji nijesu postojali dodatni izvori zračenja, pa izmjerena doza predstavlja dozu prirodnog fona γ -zračenja (terestrijalnog porijekla).

Da bi se uradila poređenja, uzorkovano je zemljište za analize spektrometrima γ -zračenja. Primijenjena je jedna od standardnih procedura uzimanja uzoraka zemljišta [27, 28].

Na istom mjestu gdje je doza direktno mjerena pomoću INSPECTOR 1000, sa određene površine (25 cm x 25 cm), nakon sklanjanja površinskog sloja (trava, kamenje, otpaci), uziman je uzorak sa dubine (0-5) cm – površinski sloj, a na određenom broju lokacija (2, 4, 10) i sa dvije dodatne dubine (5-10) cm i (10-15) cm. Na slici 3.3. prikazano je uzorkovanje površinskog sloja zemljišta na lokaciji 7, na slici 3.4. su prikazani spakovani uzorci sa tri dubine sa lokacije 10, a na slici 3.5. prikazano je uzimanje uzorka sa dubine (5-10) cm na istoj lokaciji (10).



Slika 3.3. Površinski uzorak zemljišta sa lokacije 7.



Slika 3.4. Uzorci zemljišta sa tri dubine sa lokacije 10.



Slika 3.5. Uzorkovanje sloja zemljišta sa dubine (5-10) cm na lokaciji 10.

3.4. Priprema uzoraka zemljišta i mjerenja aktivnosti radionuklida HPGe spektrometrima

Gama zrak koji se emituje pri prelasku jezgra iz pobuđenog stanja, nakon alfa ili beta raspada, u niže pobuđeno ili osnovno stanje, registruje se detektorima γ -zračenja. Na osnovu dobijenog spektra identifikuju se radionuklidi prisutni u datom uzorku.

Metodi analize γ -spektara, nakon odgovarajuće kalibracije uređaja i samog mjerenja, standardno podrazumijevaju analizu pikova totalne apsorpcije (fotopikova) – iz koje se dobijaju

potrebni podaci. Prethodno je, međutim, potrebno na adekvatan način pripremiti uzorke i izvršiti snimanje spektara.

Uobičajena priprema uzoraka zemljišta za mjerenja pomoću HPGe spektrometara podrazumijeva sušenje, prosijavanje i pakovanje u posude namijenjene za mjerenje, koje odgovaraju kalibracionim standardima (tzv. standardna geometrija mjerenja). Svi uzorci zemljišta sa teritorije grada Podgorice su pripremljeni i upakovani u Marineli posude od pola litra.

Na slici 3.6. i slici 3.7. su prikazani uzorci zemljišta sa mjernih lokacija u Podgorici nakon sušenja i u toku prosijavanja.



Slika 3.6. Uzorci zemljišta nakon sušenja.



Slika 3.7. Prosijavanje uzoraka zemljišta i pakovanje u Marineli posude.

3.4.1. HPGe spektrometri i mjerenje aktivnosti radionuklida

U *Centru za ekotoksikološka ispitivanja* u Podgorici, dva ORTEC spektrometra čine sistem za γ -spektrometriju – svaki sa 16 000 kanala, iz XLB (*Extra Low Background*) klase [29]. Ova dva poluprovodnička HPGe detektora (koaksijalni GEM – 40190 i koaksijalni GEM – 30185-S) imaju energetske opseg od 40 keV do 3000 keV. Kako je energetske opseg ovih detektora veoma širok, može se zaključiti da pokrivaju (tj. detektuju) glavne γ -zrake velikog broja radionuklida. Sistem se sastoji iz sljedećih komponenti [29]:

- NIM BIN 4001A kućište sa napajanjem 4002D
- Dvostruko 5 kV detektorsko napajanje model 660
- Prepojačivač model 257 P sa visokonaponskim filtrom 138
- Spektroskopski pojačivač model 672
- Analizator sa četiri ulaza model 919 *Spectrum master multichannel buffer*
- Kriostati CFG-XLB – GEM – SV
- Kućište detektora sa zaštitom: Von Gahlen model VG – BB – 98/19A – 2, sastoji se od: 100 mm Pb, 2 mm Cu, 1 mm Cd, 4 mm Perspeks
- Računar IBM (Pentium MMX 166 MHz)

- Softver: Gamma Vision 32 A66-B32 V 4.12 i Gamma Vision 32 A66-B32 V 5.2; Nuclide Navigator V 1.01.

Karakteristike HPGe koaksijalnog detektora GEM – 40190 su relativna efikasnost 40 %, FWHM (širina pika na poluvisini) 1.80 keV na 1.33 MeV ^{60}Co , *Peak shape* = 1.83, FWHM = 840 eV na 122 keV za ^{57}Co , dok je fon spektrometra 1.23 imp/s [29].

Efikasnost 35 %, FWHM = 1.72 keV na 1.33 MeV ^{60}Co , *Peak shape* = 1.89, FWHM = 700 eV na 122 keV za ^{57}Co , i fon spektrometra od 0.98 imp/s, su karakteristike HPGe koaksijalnog detektora GEM – 30185-S [29].

Ova dva detektora su niskofonska, ali određeni fon ipak postoji i mora se uzeti u obzir pri analizi spektara. S ciljem dodatnog smanjenja fona, montirana je pumpa koja usisava atmosferski vazduh sa visine 5 m u odnosu na nivo detektora, i ubacuje ga u kućište detektora sa protokom (2-3) L/min [29]. Na ovaj način je postignuto smanjenje fona skoro 3 puta [29]. Stvarni broj impulsa koji se dobija iz uzorka je:

$$N_{\text{uzorka}} = N_{\text{fotopika}} - N_{\text{fona}} \quad (3.1)$$

Kao što je uobičajeno, detektore je potrebno kalibrisati i na pouzdan način utvrditi odnos broja kanala u spektru i energije fotona, širine pika na poluvisini i energije, efikasnosti detekcije i energije fotona. Kalibracioni izvori u *Centru za ekotoksikološka ispitivanja* koji se za tu svrhu koriste su [29]:

- 6 tačkastih izvora proizvođača *Czech Metrology Institute*: ^{57}Co , ^{60}Co , ^{88}Y , ^{133}Ba , ^{137}Cs , ^{152}Eu

- Miks standardi proizvođača *Czech Metrology Institute*:

- Standard u Marineli posudi od 1 L, $\rho = 1.0 \text{ g/cm}^3$, matriks silikonska smola, radionuklidi: ^{241}Am , ^{133}Ba , ^{109}Cd , ^{139}Ce , ^{57}Co , ^{60}Co , ^{137}Cs , ^{54}Mn , ^{113}Sn , ^{85}Sr , ^{88}Y

- Standard u Marineli posudi od 1 L, $\rho = 1.06 \text{ g/cm}^3$, matriks 4M HCl, radionuklidi: ^{139}Ce , ^{57}Co , ^{60}Co , ^{137}Cs , ^{203}Hg , ^{113}Sn , ^{85}Sr , ^{88}Y

- Standard u Marineli posudi od 1 L, $\rho = 1.22 \text{ g/cm}^3$, matriks silikonska smola, radionuklidi: ^{241}Am , ^{109}Cd , ^{139}Ce , ^{57}Co , ^{60}Co , ^{137}Cs , ^{113}Sn , ^{85}Sr , ^{88}Y , ^{113}Hg

- Standard u Marineli posudi od 0.5 L, $\rho = 1.0 \text{ g/cm}^3$, matriks silikonska smola, radionuklidi: ^{241}Am , ^{109}Cd , ^{139}Ce , ^{57}Co , ^{60}Co , ^{137}Cs , ^{113}Sn , ^{85}Sr , ^{88}Y , ^{203}Hg
 - Standard u Marineli posudi od 0.5 L, $\rho = 1.22 \text{ g/cm}^3$, matriks silikonska smola, radionuklidi: ^{241}Am , ^{109}Cd , ^{139}Ce , ^{57}Co , ^{60}Co , ^{137}Cs , ^{113}Sn , ^{85}Sr , ^{88}Y , ^{203}Hg
 - Standard u cilindričnoj posudi od 0.2 L, $\rho = 1.22 \text{ g/cm}^3$, matriks silikonska smola, radionuklidi: ^{241}Am , ^{109}Cd , ^{139}Ce , ^{57}Co , ^{60}Co , ^{137}Cs , ^{113}Sn , ^{85}Sr , ^{88}Y , ^{203}Hg
 - Standard u Marineli posudi od 1 L, $\rho = 1.0 \text{ g/cm}^3$, matriks silikonska smola, radionuklidi: ^{241}Am , ^{109}Cd , ^{139}Ce , ^{57}Co , ^{60}Co , ^{137}Cs , ^{113}Sn , ^{85}Sr , ^{88}Y
 - Radni standardi proizvođača *IAEA Laboratory Seibersdorf*:
 - Miks standard u Marineli posudi od 0.5 L, $\rho = 1.06 \text{ g/cm}^3$, matriks 4M HCL
 - Miks standard u cilindričnoj posudi od 0.2 L, $\rho = 1.22 \text{ g/cm}^3$, matriks zemlja
 - Marineli 1 L Ampula 125
 - Marineli 1 L IAEA 425
 - Marineli 1 L IAEA 430
 - Marineli 1 L IAEA 422
 - Marineli 0.5 L IAEA 428,
- itd.

Koristeći multistandarde sa precizno definisanim parametrima (gustina, aktivnosti radionuklida, intenziteti γ -prelaza, vrijeme poluraspada i sl.), dobija se kalibraciona kriva efikasnosti, koja je pouzdanija ukoliko u standardu ima više radionuklida, odnosno fotopikova.

Efikasnost detekcije gama zraka u fotopiku (fotoefikasnost) se računa po formuli:

$$\varepsilon = \frac{N}{A \cdot I \cdot t}, \quad (3.2)$$

gdje je A – aktivnost izvora, I – relativni intenzitet γ -linije, t – živo vrijeme mjerenja, a N – broj impulsa u fotopiku (nakon oduzimanja fona).

Uzorci zemljišta iz Podgorice mjereni su pomoću navedenih HPGe spektrometara, u Marineli posudama od pola litra (posuda prikazana na slici 3.8.), po 30 000 s živog vremena. Na

slici 3.9, dat je HPGe GEM-40190, čija je relativna efikasnost 40 %, dok je na slici 3.10. prikazan HPGe GEM-30185-S, relativne efikasnosti 35 %.



Slika 3.8. Pripremljeni uzorak u Marineli posudi 0.5 L.



Slika 3.9. HPGe GEM-40190 relativne efikasnosti 40 %, kojim je vršeno mjerenje uzoraka zemljišta.

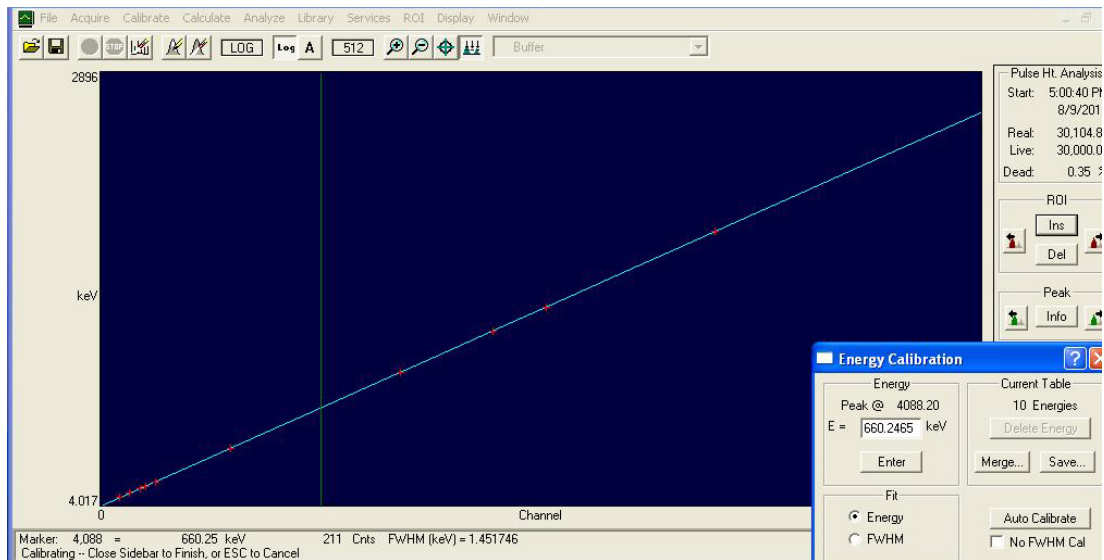


Slika 3.10. HPGe GEM-30185-S relativne efikasnosti 35 %, kojim je vršeno mjerenje uzoraka zemljišta.

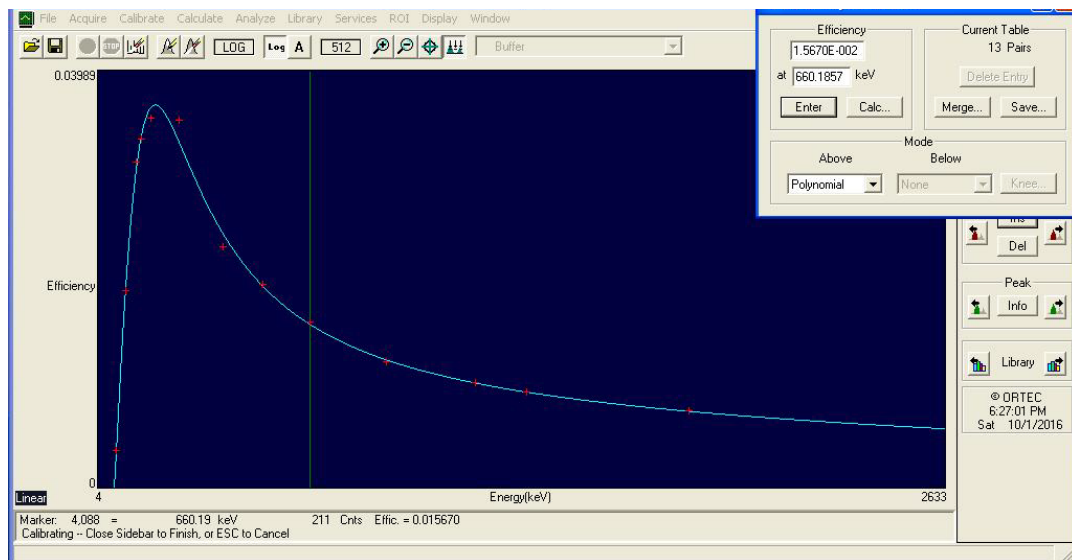
Kalibracija uređaja je urađena pomoću standarda MBSS 2 (*Czech Metrology Institute*), serijskog broja 300415-1503041, aktivnosti 41.46 kBq na dan 01. 06. 2015. godine (slika 3.11.). Kalibracioni dijagrami su predstavljeni na slikama 3.12. i 3.13.



Slika 3.11. Kalibracioni standard MBSS 2.

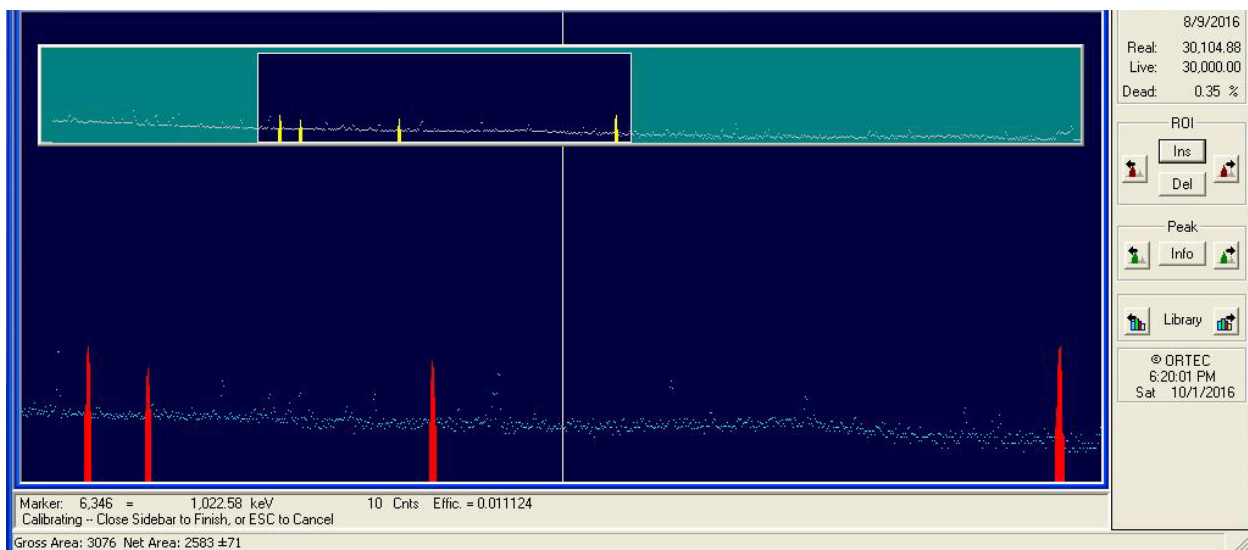


Slika 3.12. Kalibracioni dijagram energija-kanala, iz kalibracije koja je korišćena za obradu spektara uzoraka zemljišta.



Slika 3.13. Kalibracioni dijagram efikasnost-energija, iz kalibracije koja je korišćena za obradu spektara uzoraka zemljišta.

U procesu obrade, softverom *Gamma vision 32* dobijeni spektri (ilustracija na slici 3.14.) su dalje analizirani na aktivnosti radionuklida.



Slika 3.14. Spektar površinskog sloja zemljišta sa lokacije 9 ((0-5) cm).

Analiza se vrši pomoću pikova koji odgovaraju interakciji γ -zraka sa materijom fotoelektričnim efektom (fotopikovi), pri čemu je njihova energija potpuno apsorbovana. Na osnovu njihove pozicije u spektru i kalibracije energija-kanal prepoznaje se koju energiju ima γ -zračenje i radionuklid koji ga emituje. Za proračun aktivnosti svakog radionuklida u uzorku koristi se formula:

$$A = \frac{\frac{N_{uzorka}}{t_{uzorka}} - \frac{N_{fona}}{t_{fona}}}{\varepsilon \cdot I}, \quad (3.3)$$

gdje je I – relativni intenzitet γ -linije, a ε – efikasnost detekcije za datu γ -liniju (iz kalibracionog dijagrama).

Po formuli (3.4) se određuje koncentracija aktivnosti, tj. aktivnost (A) po jedinici mase (m) radionuklida:

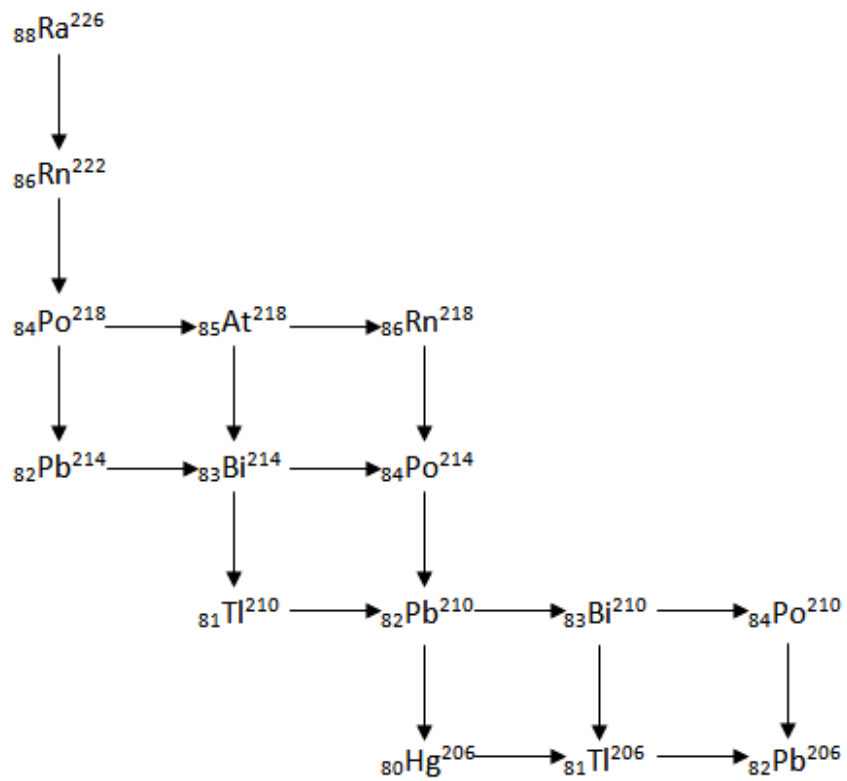
$$A_c = \frac{A}{m}. \quad (3.4)$$

Softver u obradi spektara, odnosno pikova, aktivnost radionuklida izračunava pomoću efikasnosti iz kalibracione krive, koja je dobijena u istim uslovima (geometriji) mjerenja uz upotrebu kalibracionih standarda koji sadrži radionuklide poznatih aktivnosti.

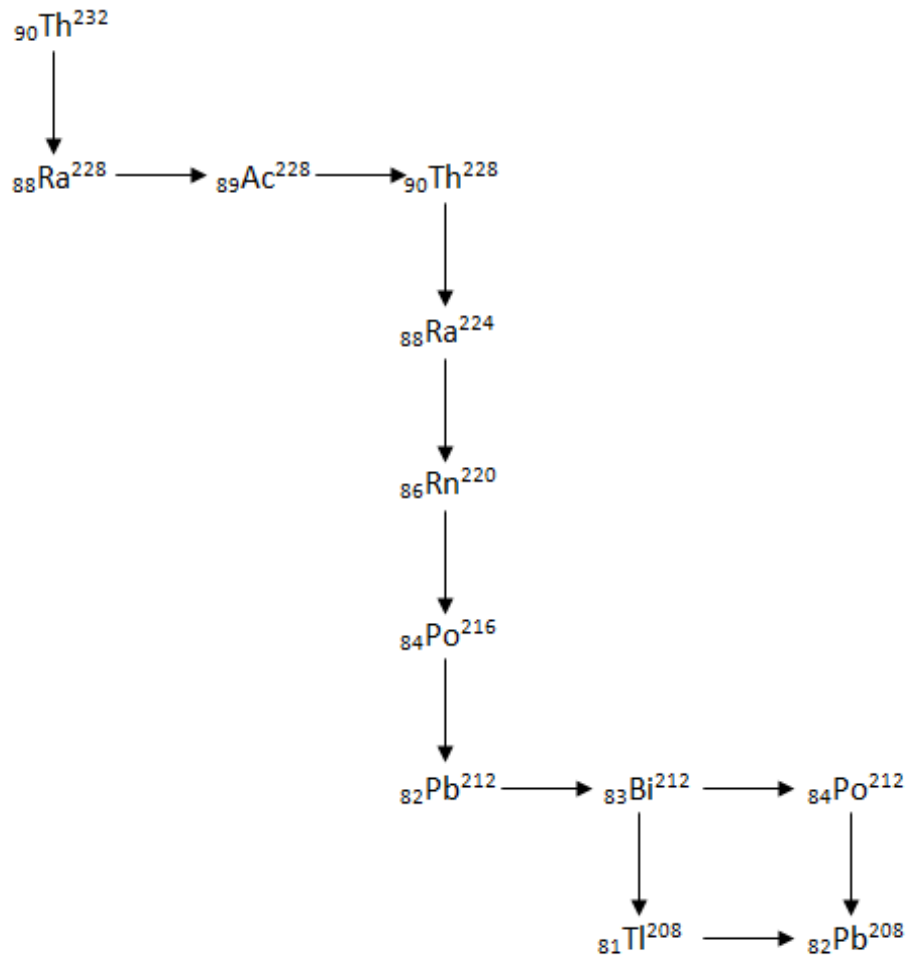
3.4.1.1. Detektovani radionuklidi

Kao što je i bilo očekivano, u uzorcima zemljišta od prirodnih radionuklida su prisutni radionuklidi iz dva radioaktivna niza (^{238}U , tj. ^{226}Ra i ^{232}Th) i ^{40}K , kao i vještački ^{137}Cs .

Raspad radijuma (^{226}Ra) i torijuma (^{232}Th) dati su na slikama 3.15. i 3.16, respektivno [5].



Slika 3.15. Raspad radijuma (^{226}Ra).



Slika 3.16. Raspad torijuma (${}^{232}\text{Th}$).

Oba niza imaju po jedan izotop gasa radona (${}_{86}\text{Rn}^{222}$, ${}_{86}\text{Rn}^{220}$) koji emaniraju iz uzorka. Ukoliko je potrebno izmjeriti aktivnost radijuma pomoću aktivnosti potomaka, potrebno je hermetizovati uzorak i obezbijediti postizanje radioaktivne ravnoteže (sekularna ravnoteža: $\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2$, gdje su λ_1 , λ_2 konstante raspada roditelja i potomka [1]). U slučaju ${}^{226}\text{Ra}$, sa periodom poluraspada od 1600 godina, i njegovog gasovitog potomka ${}^{222}\text{Rn}$ (period poluraspada 3.82 dana), sekularna ravnoteža se uspostavlja nakon 10 perioda poluraspada $T_{1/2}({}^{222}\text{Rn})$, tj. nakon 38.2 dana [1].

Gama linije najvećih intenziteta (iznad 10 %) pri raspadima u nizovima ${}^{226}\text{Ra}$ i ${}^{232}\text{Th}$ su izdvojene u tabelama 3.5. i 3.6, respektivno.

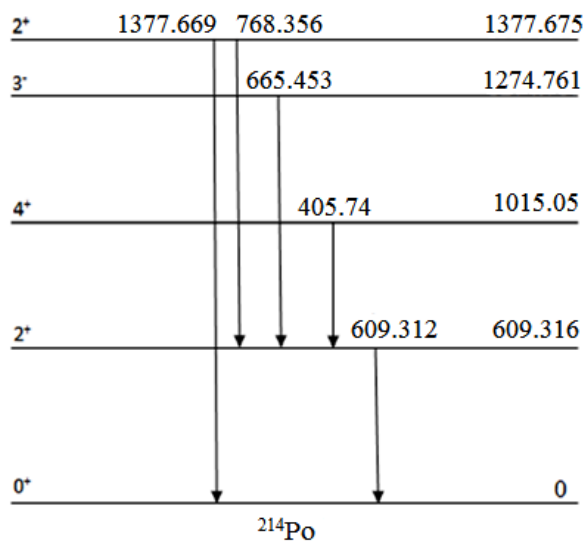
Tabela 3.5. Gama najvećih intenziteta iz raspada niza ^{226}Ra [5].

Energija γ -zraka (keV)	Intenzitet γ -prelaza (%)
^{214}Pb	
351.932	37.6
295.224	19.3
^{214}Bi	
609.312	46.1
1764.494	15.4
1120.287	15.1
^{210}Tl	
799.7	99
298	79
1316	21
1210	17
1070	12

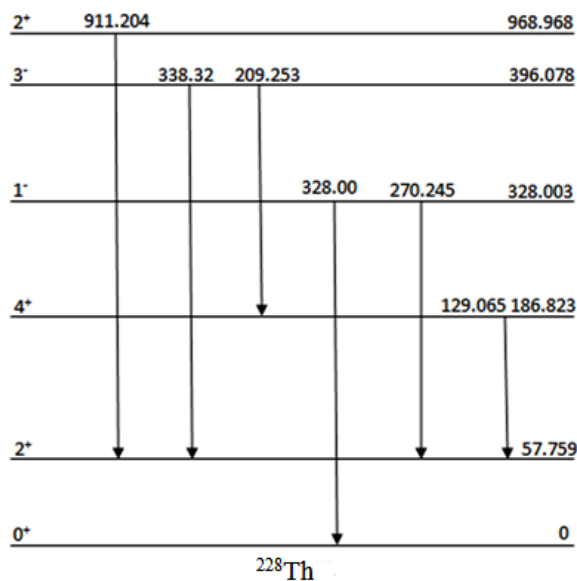
Tabela 3.6. Gama najvećih intenziteta iz raspada niza ^{232}Th [5].

Energija γ -zraka (keV)	Intenzitet γ -prelaza (%)
^{228}Ac	
911.204	25.8
968.971	15.8
338.32	11.27
^{212}Pb	
238.632	43.3
^{208}Tl	
2614.533	99
583.191	84.5
510.77	22.6
860.564	12.42

Gama zraci između ostalog korišćeni za detekciju ^{226}Ra i ^{228}Th u uzorcima zemljišta iz Podgorice, su energija 609.11 keV i 911.20 keV, respektivno (slike 3.17. i 3.18.). U pitanju su zraci koji koji prate raspad ^{214}Bi (u ^{214}Po) i ^{228}Ac (u ^{228}Th), respektivno.



Slika 3.17. Dio γ -emisija iz jezgra ^{214}Po , nakon raspada ^{214}Bi .



Slika 3.18. Dio γ -emisija iz jezgra ^{228}Th , nakon raspada ^{228}Ac .

U standardnim γ -spektrometrijskim procedurama mjerenja ^{232}Th u uzorcima iz životne sredine, koriste se γ -zranci ^{228}Th iz raspada ^{228}Ac (slika 3.18.) [13]. I u ovom radu je podrazumijevano da aktivnost ^{228}Ac ukazuje na nivo ^{232}Th . Pripremljeni uzorci mjereni su nakon ne manje od 30 dana, i aktivnost ^{226}Ra određena je kao srednja vrijednost aktivnosti koje su dobijene iz fotopikova na energijama 295 keV, 352 keV, 609 keV, 1120 keV i 1764 keV (tabela 3.5.). Aktivnosti ^{137}Cs i ^{40}K određene su iz pikova na energijama 662 keV i 1461 keV, respektivno.

4. REZULTATI ODREĐIVANJA DOZA TERESTRIJALNOG GAMA ZRAČENJA U PODGORICI

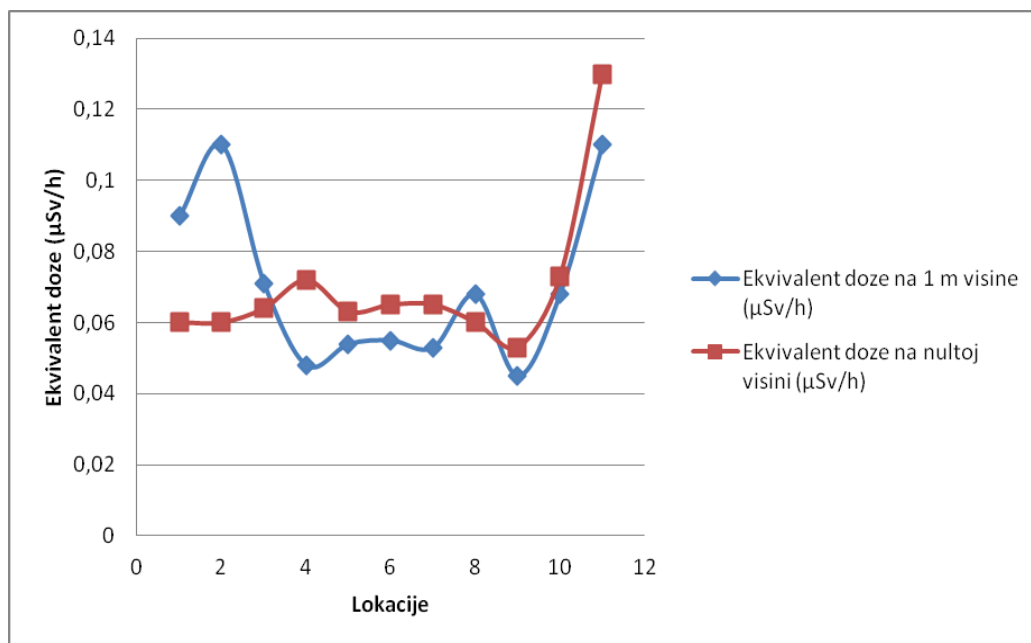
4.1. Doze izmjerene uređajem INSPECTOR 1000

U tabeli 4.1. su prikazane doze zračenja *outdoors* na mjernim lokacijama u Podgorici (tabela 3.4.), koje su direktno mjerene pomoću uređaja INSPECTOR 1000 na 1 m iznad tla i na nultoj visini.

Tabela 4.1. Izmjerene vrijednosti (jačine) doze zračenja na mjernim lokacijama iz tabele 3.4.

Lokacija	Ekvivalent doze na 1 m visine ($\mu\text{Sv/h}$)	Ekvivalent doze na nultoj visini ($\mu\text{Sv/h}$)
1	0.090 \pm 0.001	0.060 \pm 0.003
2	0.110 \pm 0.003	0.060 \pm 0.002
3	0.071 \pm 0.002	0.064 \pm 0.001
4	0.048 \pm 0.002	0.072 \pm 0.003
5	0.054 \pm 0.002	0.063 \pm 0.002
6	0.055 \pm 0.003	0.065 \pm 0.002
7	0.053 \pm 0.003	0.065 \pm 0.002
8	0.068 \pm 0.002	0.060 \pm 0.001
9	0.045 \pm 0.003	0.053 \pm 0.001
10	0.068 \pm 0.002	0.073 \pm 0.002
11	0.110 \pm 0.003	0.130 \pm 0.010

Radi lakšeg poređenja, izmjerene doze na mjernim lokacijama date su i na slici 4.1.



Slika 4.1. Doze direktno izmjerene na mjernim lokacijama.

4.2. Doze procijenjene na osnovu koncentracija aktivnosti radionuklida

4.2.1. Koncentracije aktivnosti radionuklida

U tabeli 4.2. i na slici 4.2. su date aktivnosti radionuklida u površinskom sloju zemljišta, dok su u tabeli 4.3. i na slici 4.3. date njihove koncentracije aktivnosti. U *Prilogu* su tabele sa rezultatima sa dvije decimale, koji su korišćeni za crtanje grafika, proračune i statističke analize pomoću *Microsoft Office Excel 2007*, dok su u tabelama u ovoj glavi rada rezultati zaokruženi.

Aktivnost ^{232}Th određena je na osnovu aktivnosti ^{228}Ac , preko pika na energiji 911 keV, kako se to često radi u standardnim γ -spektrometrijskim analizama. U nekoliko spektara ova aktivnost je provjerena na osnovu pika na energiji 338 keV i nijesu uočena značajnija odstupanja, kao ni odstupanja tako dobijene srednje aktivnosti u odnosu na aktivnost dobijenu iz pika 911 keV. Na primjer, na lokacijama 2, 5 i 11, u površinskom sloju zemljišta, aktivnost preko pika na energiji 338 keV je bila 21.83 Bq, 15.71 Bq i 44.54 Bq, respektivno (što znači srednju vrijednost aktivnosti na osnovu dva pika ^{228}Ac – oko 22.99 Bq, 16.74 Bq i 45.31 Bq,

respektivno). Zato je u daljim analizama korišćena aktivnost dobijena preko pika na energiji 911 keV, a imajući u vidu i najveći intenzitet tog zraka.

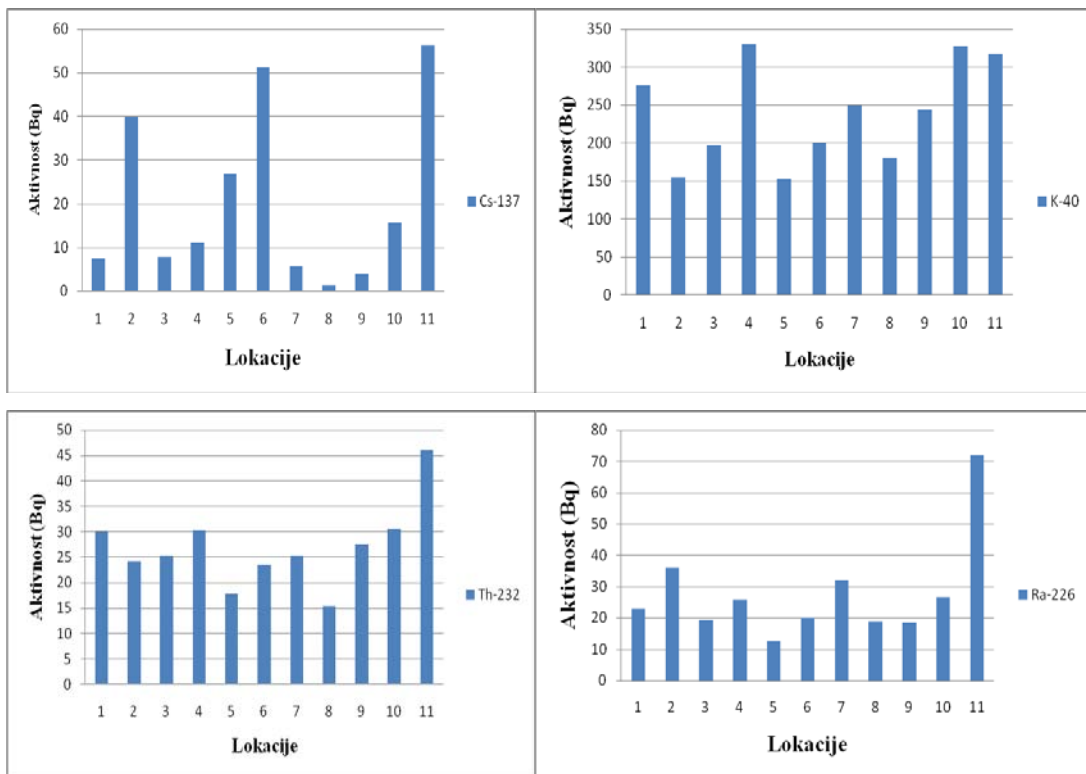
Tabela 4.2. Aktivnost radionuklida u površinskom sloju zemljišta sa 11 lokacija.

Lokacija	Masa uzorka (kg)	Aktivnost (Bq)			
		¹³⁷ Cs	⁴⁰ K	²²⁶ Ra	²³² Th (²²⁸ Ac)
1	0.583	7.43±0.20	276±4	23.0±0.5	30.0±0.8
2	0.531	39.8±0.4	155±2	36.0±0.5	24.2±0.6
3	0.500	7.81±0.20	197±3	19.3±0.5	25.4±0.7
4	0.856	11.2±0.2	330±4	25.9±0.5	30.3±0.8
5	0.502	26.8±0.3	153±2	12.5±0.4	17.8±0.6
6	0.511	51.1±0.4	200±3	20.1±0.5	23.6±0.7
7	0.530	5.73±0.20	249±4	32.0±0.6	25.4±0.8
8	0.647	1.29±0.10	181±2	18.6±0.4	15.4±0.6
9	0.545	3.95±0.20	244±3	18.5±0.4	27.5±0.8
10	0.636	15.6±0.2	328±4	26.6±0.5	30.5±0.8
11	0.506	56.2±0.4	318±4	71.8±0.8	46.1±1.0

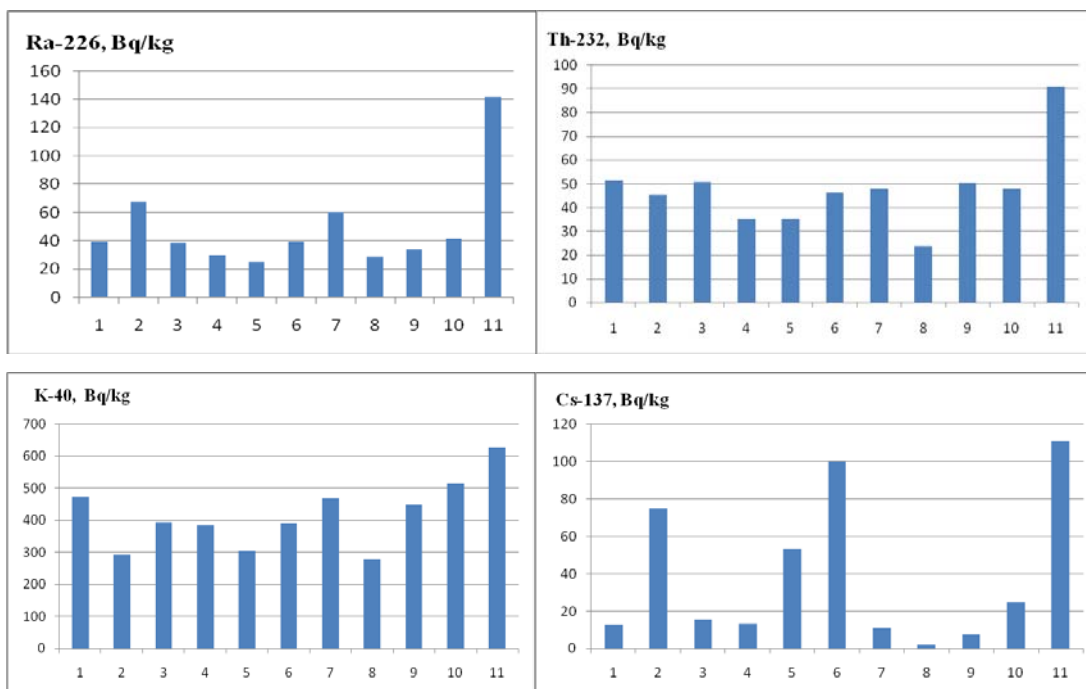
Tabela 4.3. Koncentracija aktivnosti radionuklida u površinskom sloju zemljišta sa 11 lokacija.

Lokacija	Živo vrijeme mjerenja (s)	Masa uzorka (kg)	Koncentracija aktivnosti (Bq/kg)			
			¹³⁷ Cs	⁴⁰ K	²²⁶ Ra	²³² Th (²²⁸ Ac)
1	30 000	0.583	12.7±0.3	473±6	39.5±0.9	51.4±1.4
2	30 000	0.531	75.0±0.8	292±4	67.8±0.9	45.5±1.1
3	30 000	0.500	15.6±0.4	394±6	38.7±1.0	50.7±1.4

4	30 000	0.856	13.1±0.2	386±4	30.2±0.6	35.4±0.9
5	30 000	0.502	53.3±0.6	304±5	24.9±0.8	35.4±1.2
6	30 000	0.511	100±1	392±6	39.4±1.0	46.2±1.4
7	30 000	0.530	10.8±0.4	469±7	60.4±1.1	47.9±1.5
8	30 000	0.647	1.99±0.20	280±3	28.8±0.7	23.7±0.9
9	30 000	0.545	7.25±0.40	447±6	33.9±0.7	50.5±1.5
10	30 000	0.636	24.5±0.3	515±6	41.9±0.8	48.0±1.2
11	30 000	0.506	111±1	628±8	142±2	91.0±2.0

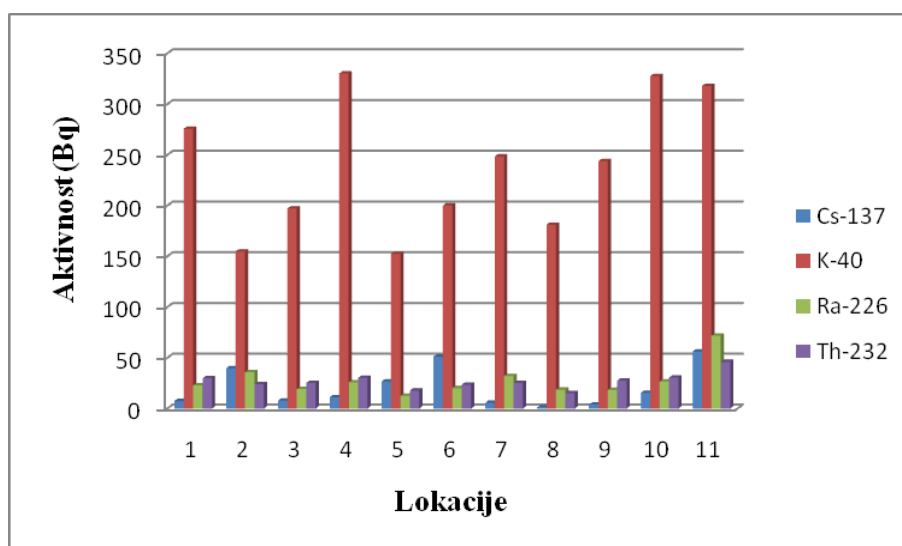


Slika 4.2. Aktivnosti radionuklida u ispitivanim uzorcima površinskog zemljišta iz Podgorice.

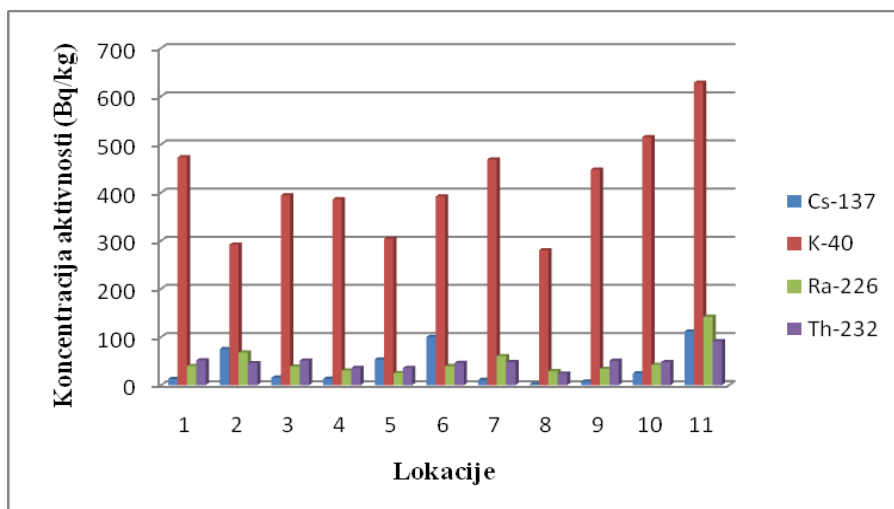


Slika 4.3. Koncentracije aktivnosti radionuklida u ispitivanim uzorcima površinskog zemljišta iz Podgorice.

Slike 4.4. i 4.5. su date radi lakšeg poređenja aktivnosti i koncentracija aktivnosti radionuklida u površinskom sloju zemljišta na 11 lokacija.



Slika 4.4. Aktivnosti radionuklida u površinskom sloju zemljišta.



Slika 4.5. Koncentracije aktivnosti radionuklida u površinskom sloju zemljišta.

Tabela 4.4. predstavlja aktivnosti radionuklida u uzorcima zemljišta sa tri dubine, a tabela 4.5. prikazuje koncentracije aktivnosti tih radionuklida u istim uzorcima.

Tabela 4.4. Aktivnost radionuklida u uzorcima zemljišta sa tri dubine.

Lokacija	Živo vrijeme mjerenja (s)	Masa uzorka (kg)	Dubina (cm)	Aktivnost (Bq)			
				¹³⁷ Cs	⁴⁰ K	²²⁶ Ra	²³² Th (²²⁸ Ac)
2	30 000	0.531	(0-5)	39.8±0.4	155±2	36.0±0.5	24.2±0.6
		0.673	(5-10)	27.8±0.3	171±3	42.2±0.6	26.9±0.6
		0.554	(10-15)	28.4±0.3	217±3	55.6±0.7	33.3±0.9
4	30 000	0.856	(0-5)	11.2±0.2	330±4	25.9±0.5	30.3±0.8
		0.626	(5-10)	4.86±0.20	296±3	23.0±0.5	29.7±0.7
		0.616	(10-15)	3.59±0.20	300±4	25.0±0.5	33.8±0.8
10	30 000	0.636	(0-5)	15.6±0.2	328±4	26.6±0.5	30.5±0.8
		0.724	(5-10)	7.21±0.20	371±4	29.3±0.6	32.4±0.8
		0.778	(10-15)	11.2±0.2	365±4	33.3±0.6	34.9±0.9

Tabela 4.5. Koncentracija aktivnosti radionuklida u uzorcima zemljišta sa tri dubine.

Lokacija	Živo vrijeme (s)	Masa (kg)	Dubina (cm)	Koncentracija aktivnosti (Bq/kg)			
				^{137}Cs	^{40}K	^{226}Ra	^{232}Th (^{228}Ac)
2	30 000	0.531	(0-5)	75.0±0.7	292±4	67.8±0.9	45.5±1.1
		0.673	(5-10)	41.2±0.4	254±4	62.8±0.9	39.9±0.9
		0.554	(10-15)	51.2±0.5	392±6	100±1	60.1±1.6
4	30 000	0.856	(0-5)	13.1±0.2	386±4	30.2±0.6	35.4±0.9
		0.626	(5-10)	7.76±0.30	472±5	36.7±0.8	47.5±1.1
		0.616	(10-15)	5.83±0.30	487±6	40.6±0.8	54.9±1.3
10	30 000	0.636	(0-5)	24.5±0.3	515±6	41.9±0.8	48.0±1.2
		0.724	(5-10)	9.96±0.30	512±5	40.4±0.8	44.7±1.1
		0.778	(10-15)	14.4±0.3	470±6	42.8±0.8	44.8±1.1

U tabeli 4.6. je dat prikaz aritmetičkih sredina aktivnosti radionuklida u uzorcima zemljišta za dubinu (0-15) cm – za lokacije na kojima je zemljište uzorkovano sa tri dubine (2, 4 i 10), dok je za ostale lokacije uzeta vrijednost aktivnosti radionuklida u površinskom sloju zemljišta. U tabeli 4.7. prikazano je isto, ali za koncentracije aktivnosti radionuklida u uzorcima zemljišta.

Tabela 4.6. Srednje aktivnosti radionuklida u uzorcima zemljišta.

Lokacija	Aritmetičke sredine aktivnosti radionuklida (Bq)			
	^{137}Cs	^{40}K	^{226}Ra	^{232}Th (^{228}Ac)
1	7.43±0.20	276±4	23.0±0.5	30.0±0.8
2	32.0±0.3	181±3	44.6±0.6	28.1±0.7
3	7.81±0.20	197±3	19.3±0.5	25.4±0.7
4	6.55±0.20	309±4	24.6±0.5	31.3±0.8
5	26.8±0.3	153±2	12.5±0.4	17.8±0.6
6	51.1±0.4	200±3	20.1±0.5	23.6±0.7

7	5.73±0.20	249±4	32.0±0.6	25.4±0.8
8	1.29±0.10	181±2	18.6±0.4	15.4±0.6
9	3.95±0.20	244±3	18.5±0.4	27.5±0.8
10	11.3±0.2	355±4	29.7±0.6	32.6±0.8
11	56.2±0.4	318±4	71.8±0.8	46.1±1.0

Tabela 4.7. Srednje koncentracije aktivnosti radionuklida u uzorcima zemljišta.

Lokacija	Aritmetičke sredine koncentracija aktivnosti radionuklida (Bq/kg)			
	¹³⁷ Cs	⁴⁰ K	²²⁶ Ra	²³² Th (²²⁸ Ac)
1	12.7±0.3	473±6	39.5±0.9	51.4±1.4
2	55.8±0.6	313±5	76.9±1.0	48.5±1.2
3	15.6±0.4	394±6	38.7±1.0	50.7±1.4
4	8.89±0.30	448±5	35.9±0.7	45.9±1.1
5	53.3±0.6	304±5	24.9±0.8	35.4±1.2
6	100±1	392±6	39.4±1.0	46.2±1.4
7	10.8±0.4	469±7	60.4±1.1	47.9±1.5
8	1.99±0.20	280±3	28.8±0.7	23.7±0.9
9	7.25±0.40	447±6	33.9±0.7	50.5±1.5
10	16.3±0.3	499±6	41.7±0.8	45.8±1.1
11	111±1	628±8	142±2	91.0±2.0

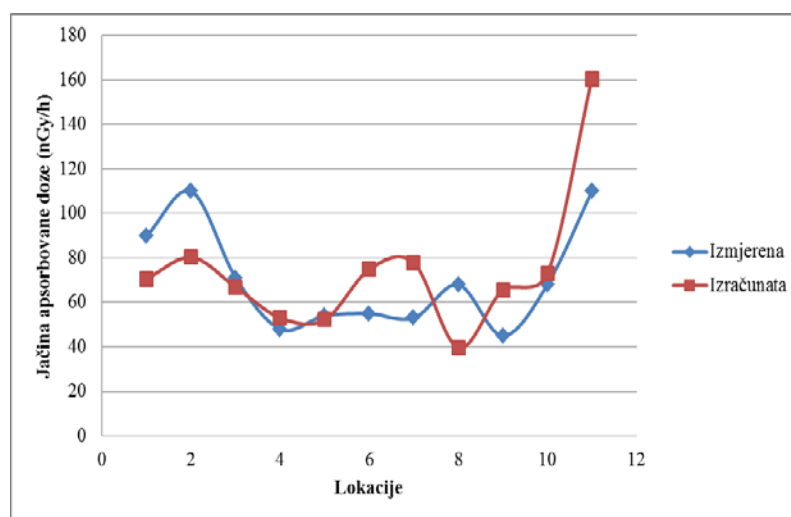
4.2.2. Proračun jačine apsorbovane doze i godišnje efektivne doze

U tabeli 4.8. su navedene (jačine) apsorbovane doze na 1 m visine iznad tla – izračunate na osnovu koncentracija aktivnosti radionuklida u površinskom sloju zemljišta (izraz (2.4), tabela 4.3.) i izmjerene uređajem INSPECTOR 1000 (znajući težinski faktor za fotone (γ -zrake)).

Tabela 4.8. Jačina apsorbovane doze *outdoors* na 1 m visine iznad tla.

Lokacija	Izmjerena apsorbovana doza (nGy/h)	Izračunata apsorbovana doza (nGy/h)	Odnos izračunate i izmjerene apsorbovane doze
1	90±1	70.6±1.5	0.78
2	110±3	80.3±1.4	0.73
3	71±2	66.9±1.6	0.94
4	48±2	53.1±1.0	1.11
5	54±2	52.2±1.4	0.97
6	55±3	74.8±1.7	1.36
7	53±3	77.7±1.7	1.47
8	68±2	39.6±1.0	0.58
9	45±3	65.7±1.5	1.46
10	68±2	72.9±1.4	1.07
11	110±3	161±2	1.46

Na slici 4.6. je dat prikaz izračunate jačine apsorbovane doze na osnovu koncentracija aktivnosti radionuklida u površinskom sloju zemljišta i izmjerene jačine apsorbovane doze.

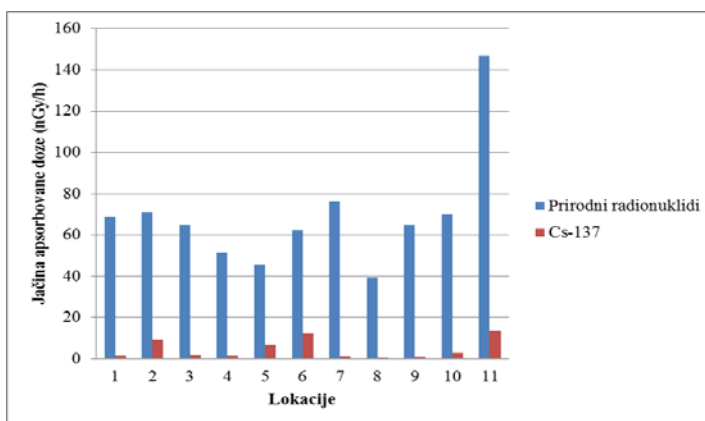


Slika 4.6. Izmjerena i izračunata jačina apsorbovane doze na 1 m visine iznad tla.

Jačine apsorbovanih doza od prirodnih radionuklida i ^{137}Cs su posebno razmatrane i rezultati su dati u tabeli 4.9. i na slici 4.7.

Tabela 4.9. Jačina apsorbovane doze *outdoors* na 1 m visine iznad tla od prirodnih radionuklida i od ^{137}Cs .

Lokacija	Apsorbovana doza od prirodnih radionuklida (nGy/h)	Apsorbovana doza od ^{137}Cs (nGy/h)
1	69.1±1.5	1.58±0.04
2	71.0±1.3	9.32±0.10
3	64.9±1.6	1.94±0.05
4	51.4±1.0	1.62±0.02
5	45.6±1.3	6.63±0.07
6	67.4±1.6	12.4±0.1
7	76.4±1.7	1.34±0.05
8	39.3±1.0	0.25±0.02
9	64.8±1.5	0.90±0.05
10	69.8±1.3	3.05±0.04
11	147±2	13.8±0.1

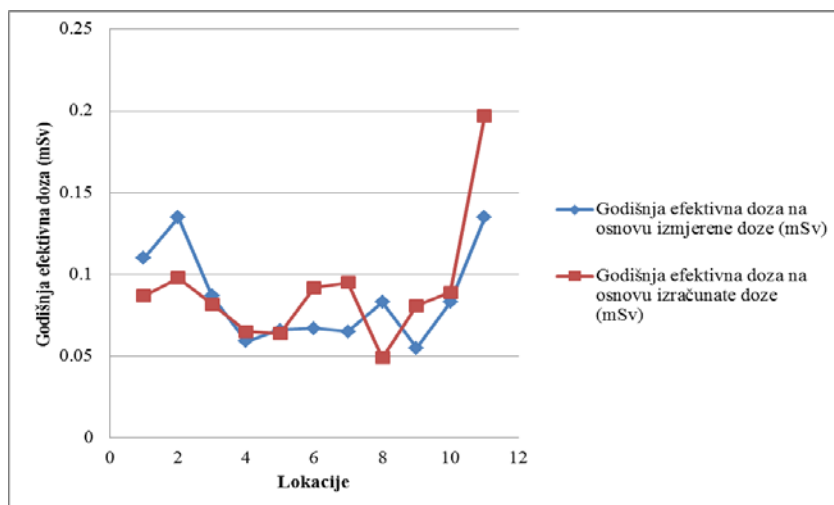


Slika 4.7. Jačine apsorbovane doze na mjernim lokacijama u Podgorici – od prirodnih radionuklida i ^{137}Cs .

Vrijednosti godišnje efektivne doze (izraz (2.5)), dobijene korišćenjem podataka o direktno izmjerenoj dozi i podataka proračunavanja doze na osnovu koncentracija aktivnosti radionuklida, date su u tabeli 4.10. i na slici 4.8.

Tabela 4.10. Vrijednosti godišnje efektivne doze.

Lokacija	Izmjerena apsorbovana doza na 1 m iznad tla (nGy/h)	Izračunata apsorbovana doza na 1 m iznad tla (nGy/h)	Godišnja efektivna doza na osnovu izmjerene apsorbovane doze (mSv)	Godišnja efektivna doza na osnovu izračunate apsorbovane doze (mSv)
1	90±1	70.6±1.5	0.110±0.001	0.087±0.002
2	110±3	80.3±1.4	0.135±0.004	0.098±0.002
3	71±2	66.9±1.6	0.087±0.002	0.082±0.002
4	48±2	53.1±1.0	0.059±0.002	0.065±0.001
5	54±2	52.2±1.4	0.066±0.002	0.064±0.002
6	55±3	74.8±1.7	0.067±0.004	0.092±0.002
7	53±3	77.7±1.7	0.065±0.004	0.095±0.002
8	68±2	39.6±1.0	0.083±0.002	0.049±0.001
9	45±3	65.7±1.5	0.055±0.004	0.081±0.002
10	68±2	72.9±1.4	0.083±0.002	0.089±0.002
11	110±3	161±2	0.135±0.004	0.197±0.003

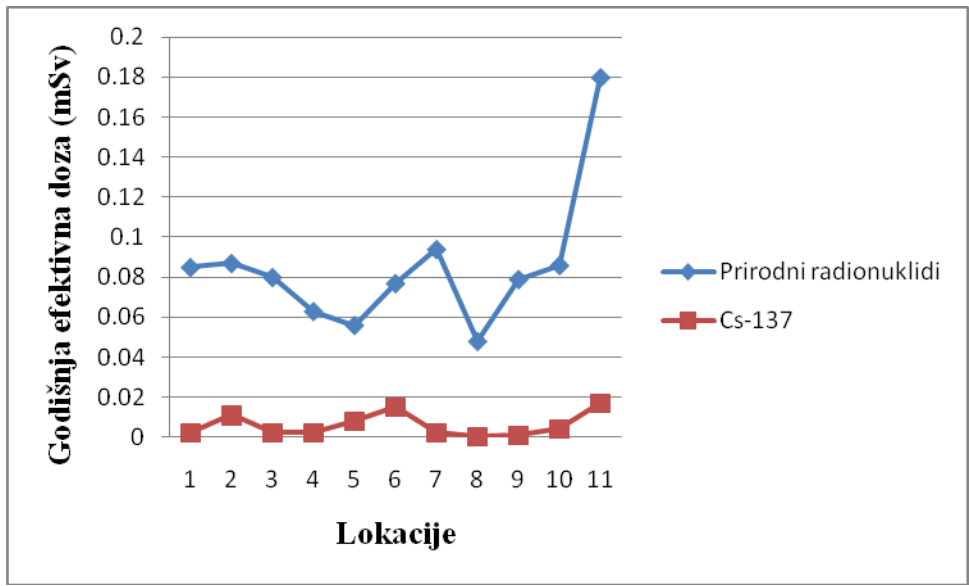


Slika 4.8. Godišnja efektivna doza od terestrijalnog zračenja *outdoors*.

Konačno, podaci u tabeli 4.11. i na slici 4.9. govore o godišnjim efektivnim dozama zračenja od terestrijalnih prirodnih radionuklida i od vještačkog ^{137}Cs – *outdoors*.

Tabela 4.11. Vrijednosti godišnje efektivne doze od prirodnih radionuklida i ^{137}Cs .

Lokacija	Godišnja efektivna doza od prirodnih radionuklida (mSv)	Godišnja efektivna doza od ^{137}Cs (mSv)
1	0.085±0.002	0.00200±0.00005
2	0.087±0.002	0.0110±0.0001
3	0.080±0.002	0.00200±0.00001
4	0.063±0.001	0.00200±0.00003
5	0.056±0.002	0.0080±0.0001
6	0.077±0.002	0.0150±0.0001
7	0.094±0.002	0.00200±0.00001
8	0.048±0.001	0.00030±0.00003
9	0.079±0.002	0.0010±0.0001
10	0.086±0.002	0.00400±0.00005
11	0.180±0.003	0.0170±0.0001



Slika 4.9. Godišnja efektivna doza od prirodnih radionuklida i ¹³⁷Cs (tabela 4.11.).

5. DISKUSIJA REZULTATA

5.1. Koncentracije aktivnosti radionuklida u zemljištu Podgorice

Kao što je rečeno prethodno, terestrijalno zračenje, odnosno koncentracija aktivnosti terestrijalnih radionuklida koji ovo zračenje emituju, zavisi kako od geološke podloge tako i od vrste i osobina zemljišta.

Na osnovu podataka datih u tabeli 4.2. i na slici 4.2, minimum, maksimum, srednja vrijednost, standardna devijacija i medijana aktivnosti razmatranih radionuklida u površinskom sloju zemljišta na gradskom području Podgorice su oko: ^{137}Cs – 1.29, 56.2, 20.6, 19.8, 11.2 Bq, respektivno, ^{40}K – 152, 330, 239, 67.1, 244 Bq, respektivno, ^{226}Ra – 12.5, 71.8, 27.7, 16.1, 23.5 Bq, respektivno, i ^{228}Th – 15.4, 46.1, 26.9, 8.0, 25.4 Bq, respektivno.

Na osnovu podataka datih u tabeli 4.3. i na slici 4.3, minimum, maksimum, srednja vrijednost, standardna devijacija i medijana koncentracija aktivnosti radionuklida u površinskom sloju zemljišta na gradskom području Podgorice su oko: ^{137}Cs – 1.99, 111, 38.7, 39.6, 15.6 Bq/kg, respektivno, ^{40}K – 280, 628, 416, 105, 394 Bq/kg, respektivno, ^{226}Ra – 24.9, 142, 49.8, 33.2, 39.4 Bq/kg, respektivno, i ^{228}Th – 23.7, 91.0, 47.8, 16.7, 47.9 Bq/kg, respektivno.

Koncentracije aktivnosti radionuklida u površinskom sloju zemljišta u Podgorici predstavljene su i u tabelama 5.1, 5.2, 5.3. i 5.4, u kojima su zbog poređenja dati i pojedini literaturni podaci – u vezi sa mjerenjima na teritoriji Crne Gore, kao i podaci o koncentracijama aktivnosti razmatranih radionuklida u južnoj Evropi (tabela 1.4.) i u svijetu.

Iz tabele 5.1. se vidi da je srednja vrijednost koncentracije aktivnosti ^{40}K u površinskom sloju zemljišta u Podgorici uporediva sa medijanom srednjih vrijednosti na svjetskom nivou. Nešto je manja od srednje vrijednosti koja je dobijena za zemlje južne Evrope (1.04 puta) i ranije za Crnu Goru ([20]). Manja je i od srednje koncentracije aktivnosti u području Nikšića, Mojkovca i DTJ (oko 1.2, 1.5 i 3.1 put, respektivno). U odnosu na Bukovik i Bukovicu, područja sa visokim fonom terestrijalnog zračenja u Crnoj Gori, srednja koncentracija aktivnosti ^{40}K u površinskom sloju zemljišta u Podgorici je manja oko 6.5 i 5 puta, respektivno. U odnosu na srednje vrijednosti koncentracija aktivnosti ^{40}K na teritoriji Visoki krš, Jadransko-jonska zona i Crna Gora ([19]) ona je veća oko 1.2, 2.2 i 1.7 puta, respektivno.

Tabela 5.1. Koncentracije aktivnosti ^{40}K u zemljištu (Durmitorska tektonska jedinica (DTJ), Visoki krš (VK), Jadransko-jonska zona (JJ)).

Teritorija	Minimum (Bq/kg)	Maksimum (Bq/kg)	Srednja vrijedn. (Bq/kg)	Standard. devijacija (Bq/kg)	Medijana (Bq/kg)	Referenca
Svijet (medijana)	140	850	400	-	-	[6]
Južna Evropa	12	1650	433	-	-	[6]
Crna Gora	78	-	246	-	223	[19]
Crna Gora	245	712	438	132	418	[20]
DTJ	-	3341	1286	-	-	[23]
VK	-	2329	349	-	-	[23]
JJ	-	-	185	-	-	[23]
Bukovik	1894	3514	2702	-	-	[24]
Bukovica	1439	3148	2108	-	-	[24]
Mojkovac	516	753	621	72.7	615	[21]
Nikšić	285	725	492	144	454	[22]
Podgorica	280	628	416	105	394	Ovaj rad

Rezultati dobijeni u ovom radu se slažu sa rezultatima koji su ranije dobijeni, odnosno koncentracijama aktivnosti ^{40}K u površinskom sloju zemljišta na tri lokacije u Podgorici (oko 367, 436 i 336 Bq/kg [20]).

U ranijim mjerenjima [20], koncentracija aktivnosti ^{226}Ra u površinskom sloju zemljišta na tri lokacije u Podgorici je bila oko 34, 126 i 27 Bq/kg, od čega ne odstupaju ni rezultati koji su dobijeni u ovom radu. Iz tabele 5.2. se vidi da je srednja vrijednost koncentracije aktivnosti ^{226}Ra veća od medijane srednjih vrijednosti na svjetskom nivou, kao i od srednjih vrijednosti u zemljama južne Evrope, ali i pojedinih područja u Crnoj Gori, osim područja Visoki krš i posebno Jadransko-jonske zone gdje je ova vrijednosti respektivno veća oko 2.2 i više od 3.6 puta.

Iz tabele 5.2. se vidi da je srednja vrijednost koncentracije aktivnosti ^{226}Ra u površinskom sloju zemljišta u Podgorici (oko 50 Bq/kg) veća u odnosu na srednje vrijednosti njegove koncentracije aktivnosti u svijetu, južnoj Evropi i Durmitorsko tektonskoj jedinici oko 1.4 puta, od one u Bukoviku i Crnoj Gori oko 1.2 puta, a od one u Bukovici i Mojkovcu oko 2 i 1.7 puta

respektivno. Od srednje vrijednosti koncentracije aktivnosti ^{226}Ra u površinskom sloju zemljišta u Nikšiću ova u Podgorici je manja 1.2 puta.

Tabela 5.2. Koncentracije aktivnosti ^{226}Ra u zemljištu (Durmitorska tektonska jedinica (DTJ), Visoki krš (VK), Jadransko-jonska zona (JJ)).

Teritorija	Minimum (Bq/kg)	Maksimum (Bq/kg)	Srednja vrijedn. (Bq/kg)	Standard. devijacija (Bq/kg)	Medijana (Bq/kg)	Referenca
Svijet (medijana)	17	60	35	-	-	[6]
Južna Evropa	1	250	35.5	-	-	[6]
Crna Gora	11	216	39.9	43.7	27	[20]
JJ	-	-	182	-	-	[23]
VK	-	239	111	-	-	[23]
DTJ	-	44.3	34.9	-	-	[23]
Bukovik	40.8	43.4	41.9	-	-	[24]
Bukovica	21.3	32.9	25.3	-	-	[24]
Mojkovac	20.5	38.3	28.6	4.3	28.6	[21]
Nikšić	26.3	136.8	60.2	39.5	48.6	[22]
Podgorica	24.9	142	49.8	33.2	39.4	Ovaj rad

Tabela 5.3. pokazuje da je srednja vrijednost koncentracije aktivnosti ^{232}Th u površinskom sloju zemljišta u Podgorici veća od medijane srednjih vrijednosti na svjetskom nivou, kao i od srednje vrijednosti za zemlje južne Evrope (oko 1.6 i 1.4 puta, respektivno), ali je i niža od srednje vrijednosti koja je ranije dobijena za pojedina područja u Crnoj Gori. U zemljištima u područjima Durmitorska tektonska jedinica, Visoki krš, Jadransko-jonska zona, Bukovik, Bukovica i Nikšić, srednje vrijednosti koncentracije ^{232}Th su veće 1.05, 2.99, 3.62, 1.46, 1.07 i 1.14 puta, respektivno.

Ukoliko se uporedi srednja vrijednost koncentracije aktivnosti ^{232}Th u zemljištu Podgorice (47.8 Bq/kg), sa srednjim vrijednostima za Crnu Goru ([19, 20]) i Mojkovac, vidi se da je ova vrijednost veća 2.02, 1.09 i 1.11 puta, respektivno.

U ranijim mjerenjima [20] koncentracija aktivnosti ^{232}Th u površinskom sloju zemljišta na tri lokacije u Podgorici je bila oko 40, 73 i 32 Bq/kg, što se slaže sa rezultatima koji su dobijeni u ovom radu.

Tabela 5.3. Koncentracije aktivnosti ^{232}Th u zemljištu (Durmitorska tektonska jedinica (DTJ), Visoki krš (VK), Jadransko-jonska zona (JJ)).

Teritorija	Minimum (Bq/kg)	Maksimum (Bq/kg)	Srednja vrijedn. (Bq/kg)	Standard. devijacija (Bq/kg)	Medijana (Bq/kg)	Referenca
Svijet (medijana)	11	64	30	-	-	[6]
Južna Evropa	1	210	34.8	-	-	[6]
Crna Gora	-	74	23.7	-	19.0	[19]
Crna Gora	18.2	107	43.5	18.9	40	[20]
DTJ	-	71.9	50.0	-	-	[23]
VK	-	201	143	-	-	[23]
JJ	-	-	173	-	-	[23]
Bukovik	64.9	79.2	70.0	-	-	[24]
Bukovica	39.1	70.8	51.3	-	-	[24]
Mojkovac	31.2	56.3	43.1	6.9	42.9	[21]
Nikšić	33.9	78.6	54.6	14.1	51.3	[22]
Podgorica	23.7	91	47.8	16.7	47.9	Ovaj rad

Ukoliko se uporede srednje vrijednosti koncentracija aktivnosti prirodnih radionuklida u zemljištu Podgorice sa onim u Hrvatskoj (^{40}K – 490 Bq/kg, ^{232}Th – 45 Bq/kg, ^{226}Ra – 54 Bq/kg), Albaniji (^{40}K – 360 Bq/kg, ^{232}Th – 24 Bq/kg) i Sloveniji (^{40}K – 370 Bq/kg, ^{232}Th – 35 Bq/kg, ^{226}Ra – 41 Bq/kg) [6], uviđa se da je vrijednost za ^{40}K u odnosu na Albaniju i Sloveniju nešto veća, a u odnosu na Hrvatsku niža, dok je vrijednost za ^{232}Th u odnosu na sve tri zemlje veća, kao i vrijednost za ^{226}Ra u odnosu na Sloveniju.

Tabela 5.4. Koncentracije aktivnosti ^{137}Cs u zemljištu u Crnoj Gori.

Teritorija	Minimum (Bq/kg)	Maksimum (Bq/kg)	Srednja vrijedn. (Bq/kg)	Standard. devijacija (Bq/kg)	Medijana (Bq/kg)	Referenca
Crna Gora	-	740	227	-	152	[19]
Crna Gora	1.82	413	81.1	95.4	49.9	[8]
Bukovik	0.95	4.40	1.98	-	-	[24]
Bukovica	1.39	184	129	-	-	[24]
Mojkovac	1.26	276	55	73.5	33.6	[21]
Nikšić	2.91	476	172	131	132	[22]
Podgorica	1.99	111	38.7	39.6	15.6	Ovaj rad

Važno je istaći da se podaci u tabeli 5.4. iz [19] odnose na mjerenja iz 1994. godine, dok se podaci iz [24] (Bukovik i Bukovica) odnose na mjerenja iz 2015. godine.

Ranije je na osnovu mjerenja koncentracija aktivnosti ^{137}Cs u tri sloja zemljišta u Crnoj Gori zaključeno da je on černobiljskog porijekla i da se tada, 2011. godine, i dalje najviše nalazio u površinskom sloju zemljišta [8].

Ta istraživanja su pokazala minimum, maksimum, srednju vrijednosti, standardnu devijaciju i medijanu: 1.82, 413, 81, 95 i 50 Bq/kg, respektivno (površinski sloj zemljišta, tj. (0-5) cm); 1.87, 142, 49, 39 i 42 Bq/kg, respektivno (sloj zemljišta (5-10) cm); 2, 113, 36, 32 i 24 Bq/kg, respektivno (sloj zemljišta (10-15) cm).

U tabeli 4.5. su date koncentracije aktivnosti radionuklida u uzorcima zemljišta sa različitih dubina na tri mjerne lokacije u Podgorici (2, 4 i 10, tj. kod *Centra za ekotoksikološka ispitivanja*, u blizini škole „Dragiša Ivanović“, ispod brda Gorica, respektivno).

Za ^{40}K , na lokacijama 2 i 4 najveće vrijednosti koncentracije aktivnosti su za sloj (10-15) cm, a na lokaciji 10 za sloj (0-5) cm. Najmanje koncentracije aktivnosti ^{40}K su u slojevima (5-10) cm, (0-5) cm i (10-15) cm, respektivno.

Maksimalne vrijednosti koncentracije aktivnosti ^{226}Ra na lokacijama 2, 4, 10 su u sloju (10-15) cm, a ^{228}Th – (10-15) cm, (10-15) cm i (0-5) cm, respektivno. Minimalne vrijednosti koncentracije aktivnosti ^{226}Ra i ^{228}Th na lokacijama 2 i 10 su detektovane u sloju zemljišta sa dubine (5-10) cm, a na lokaciji 4 u površinskom sloju.

Aritmetičke sredine koncentracija aktivnosti koje su detektovane u uzorcima tri sloja zemljišta sa iste lokacije (tabela 4.7.), date su i u tabeli 5.5.

Tabela 5.5. Srednja koncentracija aktivnosti radionuklida u sloju zemljišta (0-15) cm.

Lokacija	Koncentracija aktivnosti radionuklida (Bq/kg)			
	^{137}Cs	^{40}K	^{226}Ra	^{232}Th (^{228}Ac)
2	55.8±0.6	313±5	76.9±1.0	48.5±1.2
4	8.89±0.30	448±5	35.9±0.7	45.9±1.1
10	16.3±0.3	499±6	41.7±0.8	45.8±1.1

Najveća koncentracija aktivnosti ^{137}Cs na sve tri lokacije je u površinskom sloju, a najmanja je na dubini (5-10) cm na lokacijama 2 i 10, dok je na lokaciji 4 najmanja koncentracija njegove aktivnosti u sloju (10-15) cm.

U tabeli 5.6. su dati podaci o ^{137}Cs u slojevima zemljišta na tri lokacije koje su ispitivane u ovom radu, i na tri lokacije koje su ispitivane ranije.

Tabela 5.6. Koncentracije aktivnosti ^{137}Cs u uzorcima zemljišta sa tri dubine u Podgorici.

Koordinate lokacije	Sloj (cm)	^{137}Cs (Bq/kg)	Koordinate lokacije [8]	Sloj (cm)	^{137}Cs (Bq/kg) [8]
N: 42° 25' 37.7'' E: 19° 16' 20.6''	(0-5)	75.0±0.7	N: 42° 25.344' E: 19° 16.061'	(0-5)	100±7
	(5-10)	41.2±0.4		(5-10)	70.0±4.6
	(10-15)	51.2±0.5		(10-15)	22.8±1.5
N: 42° 27' 37.7'' E: 19° 17' 57.2''	(0-5)	13.1±0.2	N: 42° 25.618' E: 19° 12.128'	(0-5)	52.1±3.4
	(5-10)	7.76±0.30		(5-10)	19.7±1.4
	(10-15)	5.83±0.30		(10-15)	11.2±0.4
N: 42° 26' 37.7'' E: 19° 16' 20.5''	(0-5)	24.5±0.3	N: 42° 26.973' E: 19° 16.946'	(0-5)	44.6±2.9
	(5-10)	9.96±0.30		(5-10)	25.8±1.7
	(10-15)	14.4±0.3		(10-15)	16.9±1.1

Iako se od ^{137}Cs očekuje da tokom vremena migrira u dublje slojeve, a zaključeno je (u [8]) da je on kod nas černobiljskog porijekla, odnosno da je dospio na našu teritoriju nakon havarije u reaktoru Černobilj 1986. godine, i ova mjerenja pokazuju da su njegove koncentracije aktivnosti u površinskom sloju i dalje veće nego u nešto dubljim slojevima, ali same vrijednosti aktivnosti nijesu velike.

5.2. Doze terestrijalnog gama zračenja *outdoors* u Podgorici

Kao što se vidi iz tabele 3.1, spoljašnje ozračivanje dolazi od kosmičkog i terestrijalnog zračenja (prirodnog, fonskog zračenja). Galaktički kosmički zraci koji dolaze do atmosfere su nukleonske komponente 98 % (88 % protoni i 11 % alfa čestice) a 2 % elektroni [6]. Ove primarne kosmičke čestice imaju energetski spektar od 10^8 eV do 10^{20} eV [6]. Interakcija čestica kosmičkog zračenja u atmosferi proizvodi veliki broj radionuklida, uključujući ^3H , ^7Be , ^{14}C i

^{22}Na . Godišnja efektivna doza koja potiče od ovih kosmogenih radionuklida iznosi: ^{14}C – 12 μSv , ^{22}Na – 0.15 μSv , ^3H – 0.01 μSv , ^7Be – 0.03 μSv [6].

Na svjetskom nivou, srednja vrijednost jačine efektivne doze koja potiče od kosmičkih zraka (*outdoors*, na nivou mora) za sjevernu hemisferu je 31 nSv/h, a za južnu 30.3 nSv/h (za svijet: 30.9 nSv/h). Vrijednost ove doze koja potiče od neutronske komponente na sjevernoj hemisferi iznosi 5.6 nSv/h, na južnoj 4 nSv/h, a na svjetskom nivou 5.5 nSv/h [6].

Može se reći da je u Podgorici (čija je nadmorska visina malo iznad nivoa mora) glavni izvor spoljašnjeg ozračivanja *outdoors* terestrijalno γ -zračenje koje je predmet ovog rada.

5.2.1. Izmjerena jačina apsorbovane doze

U tabeli 4.1. su date izmjerene vrijednosti jačine doze zračenja na mjernim lokacijama u Podgorici. Iz te tabele se vidi da je minimalna jačina apsorbovane doze na 1 m i na 0 m iznad tla 45 i 53 nGy/h, respektivno, a maksimalna – 110 i 130 nGy/h, respektivno. Srednja vrijednost jačine doze na 1 m iznad tla i one na samom tlu (0 m visine) je približno ista i iznosi 70 nGy/h. Standardna devijacija i medijana na 1 m iznad tla iznose 23 i 68 nGy/h, respektivno, a na samom tlu 21 i 64 nGy/h, respektivno.

Kao što se jasno vidi na slici 4.1, na prve dvije lokacije (1 i 2) doza izmjerena na 1 m visine je veća od doze koja je izmjerena na 0 m visine.

Minimalna doza je izmjerena na lokaciji 9, kako na 1 m visine, tako i na nultoj visini, dok je maksimalna doza na 1 m visine izmjerena na lokacijama 2 i 11, a na nultoj visini na lokaciji 11.

Iz navedenog se zaključuje da su na većini lokacija jačine doze na nultoj visini veće nego na visini 1 m iznad tla.

Kako se lokacija 1 (Prirodno matematički fakultet, tj. kod zgrade tehničkih fakulteta Univerziteta Crne Gore) nalazi u neposrednoj blizini laboratorije 044, u kojoj je prethodno određena doza na 1 m visine (tabela 2.4: 34 nGy/h – u centru laboratorije, i 45 nGy/h – na mjestu gdje je ostavljan mantil [14]), moguće je uraditi određena poređenja. Vrijednosti jačine doze *outdoors* (tabela 4.1.) na visini 1 m iznad tla i na samom tlu, izmjerene uređajem INSPECTOR 1000, su 90 nGy/h i 60 nGy/h, respektivno. Ukoliko se uporedi direktno izmjerena doza u centru

laboratorije 044 i doza izmjerena na mjestu gdje je mantil ostavljan, na visini 1 m iznad poda, sa direktno izmjerenom dozom na lokaciji 1 *outdoors*, na visini 1 m iznad tla, dobija se da su te doze manje oko 38 i 50 %, respektivno. Može se zaključiti da su doze u ovom zatvorenom prostoru uslovljene radionuklidima u građevinskom materijalu.

U tabeli 3.3. su navedene direktno mjerene jačine apsorbovanih doza u zemljama svijeta, iz izvještaja UNSCEAR 2000 [6]. Statistička analiza tih podataka predstavljena je u tabeli 5.7, zajedno sa rezultatima za Podgoricu iz ovog rada i drugim podacima iz literature koje se odnose na mjerenja doze u Crnoj Gori.

Tabela 5.7. Izmjerena jačina apsorbovane doze na 1 m visine iznad tla.

Teritorija	Minimum (nGy/h)	Maksimum (nGy/h)	Srednja vrijedn. (nGy/h)	Standard. devijacija (nGy/h)	Medijana (nGy/h)	Referenca
Svijet	32	92	61.1	13.7	59	[6]
Crna Gora	-	-	55.2	-	49.1	[19]
Crna Gora	10	192	56.3	-	56.4	[23]
Bukovik	190	370	266	-	270	[24]
Bukovica	110	310	188	-	180	[24]
Nikšić	38	95	63.8	17.6	64.5	[22]
Podgorica	45	110	70	23	68	Ovaj rad

Ukoliko se uporedi srednja vrijednost izmjerene doze (70 nGy/h) sa podacima takođe iz UNSCEAR izvještaja 2000. godine, zaključuje se da je ta vrijednost veća nego na svjetskom nivou, gdje je medijana srednjih vrijednosti jačina apsorbovanih doza u vazduhu *outdoors* (spoljašnje izlaganje terestrijalnom γ -zračenju) 57 nGy/h [6]. Ipak, srednja izmjerena jačina apsorbovane doze na 1 m visine iznad tla u Podgorici upada u opseg (medijana) na svjetskom nivou (od 18 do 93 nGy/h [6]).

Posmatrajući podatke o dozama od terestrijalnog γ -zračenja *outdoors* u zemljama južne Evrope (tabela 3.2, Albanija, Kipar, Grčka, Italija, Portugalija, Slovenija i Španija, od 18 do 84 nGy/h [6]), srednja vrijednost izmjerene doze u Podgorici se može uporediti sa dozama u Albaniji, Italiji i Španiji (71, 74 i 76 nGy/h, respektivno), koje su veće 1.01, 1.06, i 1.09 puta, respektivno. Srednja vrijednost izmjerene doze na teritoriji Podgorice u odnosu na dozu na Kipru je veća oko 3.9 puta, kao i 1.25 puta od doze u Grčkoj i Sloveniji.

Podaci u tabeli 5.7. takođe pokazuju da je doza izmjerena u Podgorici nešto iznad srednje doze koja je ranije dobijena za teritoriju Crne Gore, ali je uočljivo niža od doza koje su izmjerene u Bukoviku i Bukovici (3.8 i 2.7 puta, respektivno).

5.2.2. Jačina apsorbovane doze procijenjena na osnovu koncentracija aktivnosti radionuklida

U tabeli 4.8. su navedene jačine apsorbovane doze na 1 m visine iznad tla izračunate na osnovu koncentracija aktivnosti radionuklida u površinskom sloju zemljišta. Podrazumijevano je da doprinos dozi daju radionuklidi ^{137}Cs , ^{40}K , ^{226}Ra i ^{232}Th , dok su ostali radionuklidi zanemareni (iako neki od njih, pa i ^{238}U , tj. produkti raspada prije ^{226}Ra , u određenoj mjeri daju doprinos dozi).

Posmatrajući vrijednosti izračunate jačine apsorbovane doze, minimum i maksimum iznose 39.6 i 161 nGy/h, srednja vrijednost je 74 nGy/h, a standardna devijacija i medijana 31.3 i 70.6 nGy/h, respektivno. Minimalna izračunata doza je na lokaciji 8 (Zabjelo), a maksimalna na lokaciji 11 (kod stadiona Mladost). Radi lakšeg poređenja, ovi rezultati su dati u tabeli 5.8, zajedno sa podacima za svijet (tabela 3.3.) i za Nikšić u Crnoj Gori.

Tabela 5.8. Jačina apsorbovane doze na 1 m visine iznad tla procijenjena na osnovu mjerenja uzoraka zemljišta.

Teritorija	Minimum (nGy/h)	Maksimum (nGy/h)	Srednja vrijedn. (nGy/h)	Standard. devijacija (nGy/h)	Medijana (nGy/h)	Referenca
Svijet	32	107	57.6	17.3	54.5	[6]
Nikšić	61.3	171	103	65.7	89.2	[22]
Podgorica	39.6	161	74	31.3	70.6	Ovaj rad

Jačine apsorbovanih doza na 1 m visine iznad tla, izračunate na osnovu koncentracija radionuklida u zemljištu u Podgorici, imaju srednju vrijednost 74 nGy/h, koja je veća (1.3 puta) od one za jačine apsorbovanih doza u vazduhu *outdoors* (spoljašnje izlaganje terestrijalnom γ -zračenju) na svjetskom nivou, ali i manja (1.4 puta) od te doze koje je ranije dobijena za Nikšić. Upoređujući podatke iz tabele 5.8. koji se odnose na Podgoricu sa dozama od terestrijalnog γ -

zračenja *outdoors* u zemljama južne Evrope (tabela 3.2.), ovih 74 nGy/h u Podgorici isto je kao i srednja doza u Italiji *outdoors* (74 nGy/h), i uporedivo sa dozama u Albaniji i Španiji (71 i 76 nGy/h, respektivno) [6]. U odnosu na srednje doze na Kipru, u Grčkoj i Sloveniji, srednja procijenjena doza u Podgorici je veća 4.1 i 1.3 puta, respektivno, dok je od iste doze u Portugaliji (84 nGy/h) manja 1.1 put.

Ukoliko se uporedi srednja vrijednost izračunate doze (74 nGy/h) sa podacima takođe iz UNSCEAR izvještaja 2000. godine (jačine apsorbovanih doza u vazduhu *outdoors* – spoljašnje izlaganje terestrijalnom γ -zračenju) [6], zaključuje se da je ta vrijednost veća nego na svjetskom nivou, i to nešto više nego srednja vrijednost izmjerenih doza. Ipak, i srednja izračunata jačina apsorbovane doze na 1 m visine iznad tla u Podgorici upada u opseg (medijana) na svjetskom nivou (od 18 do 93 nGy/h [6]).

U tabeli 4.9. su date posebno jačine apsorbovanih doza od prirodnih radionuklida (^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th) i od vještačkog ^{137}Cs . Statistička analiza tih podataka, kao i podataka o pojedinačnim doprinosima radionuklida, dala je rezultate koji su prikazani u tabeli 5.9.

Tabela 5.9. Doprinosi radionuklida dozi u vazduhu na 1 m visine (u Podgorici).

	Minimum (nGy/h)	Maksimum (nGy/h)	Srednja vrijednost (nGy/h)	Standardna devijacija (nGy/h)	Medijana (nGy/h)
^{40}K	11.7	26.2	17.4	4.38	16.4
^{226}Ra	11.5	65.6	23	15.3	18.2
^{232}Th	14.3	55	28.9	10.1	28.9
Prirodni – zajedno (^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th)	39.3	147	69.7	28.1	67.4
^{137}Cs	0.25	13.8	4.81	4.92	1.94

Prema izvještaju UNSCEAR 2000 [6], a na osnovu medijana koncentracija aktivnosti radionuklida u zemljištu (tabela 1.4.) i uz pomoć doznih koeficijenata iz izraza (2.4), jačina apsorbovane doze u vazduhu koja potiče od ^{40}K iznosi 17 nGy/h, od niza ^{238}U – 16 nGy/h, od niza ^{232}Th – 18 nGy/h, i ukupno od prirodnih radionuklida – 51 nGy/h.

Doza koja potiče od ^{238}U (^{226}Ra) i ^{232}Th na svjetskom nivou je manja 1.4 i 1.6 puta, respektivno, od doze koja potiče od ^{226}Ra i ^{232}Th u zemljištu Podgorice.

I srednja doza od prirodnih radionuklida (^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th) u Podgorici je 1.4 puta veća nego na svjetskom nivou.

Podaci iz tabele 5.9. pokazuju da je doprinos ^{232}Th srednjoj dozi od prirodnih radionuklida najveći, dok je doprinos ^{40}K najmanji. Dobijena srednja vrijednost je iznad medijane na svjetskom nivou (51 nGy/h), ali je srednja jačina apsorbovane doze koja potiče od ^{40}K u Podgorici ista kao na svjetskom nivou (17 nGy/h).

Ako se podaci iz tabele 5.9. uporede sa rezultatima mjerenja iz 1994. godine [19], kada je dobijeno da je na teritoriji Crne Gore srednja doza od prirodnih terestrijalnih γ -izvora (^{40}K , ^{238}U i ^{232}Th) 38.6 nGy/h, a doza od vještačkog ^{137}Cs 16.7 nGy/h, zaključuje se da je za prirodne radionuklide u Podgorici dobijena veća (1.8 puta), a za ^{137}Cs znatno niža doza, što je očekivano jer su mjerenja koncentracija aktivnosti radionuklida u uzorcima zemljišta iz Podgorice (u okviru ovog rada) izvršena 2016. godine.

Posmatrajući samo prirodne radionuklide prethodno su (u [20]) za Crnu Goru računate jačine apsorbovane doze na 1 m visine iznad tla, i pokazale minimum, maksimum, srednju vrijednost, standardnu devijaciju i medijanu oko 27.9, 185, 63, 32.1 i 56 nGy/h, respektivno. Rezultati iz ovog rada ne odstupaju značajno od tih rezultata. U tim podacima za Crnu Goru su i jačine apsorbovanih doza na tri lokacije u Podgorici (55, 120 i 46 nGy/h [20]) koje su uporedive sa onima koje su dobijene u ovom radu.

Za 13 lokacija u Mojkovcu, jačine apsorbovanih doza u vazduhu koje potiču od prirodnih radionuklida pokazale su minimum, maksimum, srednju vrijednost, standardnu devijaciju i medijanu oko 52.3, 74.5, 65.2 nGy/h, 6.2 i 66.6 nGy/h [21]. Poredeći ove podatke i podatke iz tabele 5.9. za Podgoricu, slijedi da nema značajnijih odstupanja, osim kad je u pitanju maksimalna vrijednost doze (i znatno manja standardna devijacija rezultata za Mojkovac).

Upoređujući podatke dobijene za Podgoricu (tabela 5.9.) sa podacima za Bukovik i Bukovicu (prema [24] – to su lokacije sa najvećim fonom terestrijalnog zračenja u Crnoj Gori), gdje su srednji doprinosi ^{40}K i ^{232}Th jačini apsorbovane doze bili 112.7 nGy/h i 87.9 nGy/h, respektivno (Bukovik) i 42.3 nGy/h i 31.0 nGy/h, respektivno (Bukovica) [24], vidi se da su doze od ^{40}K i ^{232}Th u Podgorici *outdoors* manje (17.4 i 28.9 nGy/h, respektivno).

Srednji doprinos ^{40}K jačini apsorbovane doze u vazduhu u Bukoviku i Bukovici je 6.5 i 2.4 puta, respektivno, veći od srednjeg doprinosa tog radionuklida na teritoriji Podgorice.

Takođe, srednji doprinos ^{232}Th dozi u Bukoviku i Bukovici je oko 3 i 1.1 put, respektivno, veći od srednjeg doprinosa koji ^{232}Th u zemljištu daje jačini apsorbovane doze u vazduhu, na 1 m visine iznad tla, na gradskoj teritoriji Podgorice.

5.2.3. Poređenja izmjerene i procijenjene jačine apsorbovane doze

Odnos izračunate i izmjerene jačine apsorbovane doze dat je u tabeli 4.8. Minimum, maksimum, srednja vrijednost, standardna devijacija i medijana ovih odnosa iznose: 0.58, 1.47, 1.08, 0.32 i 1.07, respektivno.

Na lokacijama 4, 6, 7, 9, 10 i 11 vrijednost izračunate doze je veća od vrijednosti izmjerene doze i to oko 1.1, 1.4, 1.5, 1.5, 1.1 i 1.5 puta, dok je na lokacijama 1, 2, 3 i 8 vrijednost izmjerene doze veća od vrijednosti izračunate doze i to oko 1.3, 1.4, 1.1 i 1.7 puta, respektivno. Na lokaciji 5 direktno izmjerena vrijednost doze je približno ista kao i izračunata, i njihov odnos je 1.003.

Na svjetskom nivou [6], odnos izračunate i izmjerene apsorbovane doze je u opsegu od 0.6 u Albaniji i Siriji do 1.5 u Luksemburgu (tabela 3.3.). Odnosno, taj odnos ima minimum, maksimum, srednju vrijednost, standardnu devijaciju i medijanu – 0.6, 1.5, 0.95, 0.23 i 0.9, respektivno.

Opseg odnosa izračunate i izmjerene jačine apsorbovane doze za lokacije u Podgorici je uporediv sa opsegom na svjetskom nivou (0.6 do 1.5), ali je srednja vrijednost nešto veća (1.08).

Za teritoriju Nikšića ovaj odnos ima opseg od 1.3 do 2 [22], što je iznad onoga što je dobijeno za teritoriju Podgorice.

5.2.4. Godišnja efektivna doza

Godišnja efektivna doza (izraz (2.5)) od terestrijalnog zračenja *outdoors* u Podgorici je procijenjena na osnovu direktno izmjerene i na osnovu izračunate jačine apsorbovane doze (tabela 4.10. i slika 4.8.). Iz tih podataka slijedi da odrasli stanovnik Podgorice primi srednju efektivnu dozu 0.086 mSv/god. (rezultat na osnovu mjerenja jačine apsorbovane doze), tj. 0.091 mSv/god. (rezultat na osnovu proračuna jačine apsorbovane doze).

Minimum i maksimum godišnje efektivne doze na osnovu izmjerene apsorbovane doze iznose 0.055 i 0.135 mSv, respektivno, dok srednja vrijednost iznosi 0.086 mSv. Standardna devijacija i medijana iznose 0.029 i 0.083 mSv, respektivno.

Godišnja efektivna doza na osnovu izračunate apsorbovane doze ima minimum 0.049 mSv, maksimum 0.197 mSv, srednju vrijednost 0.091 mSv, standardnu devijaciju 0.038 mSv i medijanu 0.087 mSv.

Godišnje efektivne doze od prirodnih terestrijalnih radionuklida i vještačkog ^{137}Cs su prikazane u tabeli 4.11. i na slici 4.9. Iz tih podataka slijedi da odrasli stanovnik Podgorice godišnje u srednjem primi (*outdoors*) efektivnu dozu od prirodnih terestrijalnih radionuklida u zemljištu – 0.085 mSv, a od ^{137}Cs – oko 0.006 mSv.

Minimum, maksimum, srednja vrijednost, standardna devijacija i medijana godišnje efektivne doze od prirodnih terestrijalnih radionuklida su: 0.048, 0.18, 0.085, 0.035, 0.08 mSv, respektivno, a od ^{137}Cs : 0.0003, 0.017, 0.006, 0.006, 0.002 mSv, respektivno. Ovi podaci su dati u tabeli 5.10, zajedno sa drugim podacima za Crnu Goru. U toj tabeli su dati i podaci o godišnjim efektivnim dozama koje su za pojedina područja u Crnoj Gori procijenjene na osnovu direktnih mjerenja jačina apsorbovane doze, kao i na osnovu proračuna iz koncentracija aktivnosti radionuklida u zemljištu.

Tabela 5.10. Godišnje efektivne doze od spoljašnjeg terestrijalnog zračenja *outdoors*.

Teritorija	Minimum (μSv)	Maksimum (μSv)	Srednja vrijednost (μSv)	Standardna devijacija (μSv)	Medijana (μSv)	Referenca
Svijet (prirodni radionukl.)	-	-	70	-	-	[6]
Crna Gora (prirodni radionukl.)	34.2	227	77.2	39.4	68.3	[20]
Mojkovac (prirodni radionukl.)	64.2	91.3	80	7.56	81.7	[21]
Podgorica (prirodni radionukl.)	48.2	180	84.9	34.5	79.6	Ovaj rad
Podgorica (^{137}Cs)	0.3	17	5.89	6.04	2.4	Ovaj rad

Bukovik (direktno mjerena doza)	-	-	783	-	-	[24]
Bukovica (direktno mjerena doza)	-	-	553	-	-	[24]
Nikšić (direktno mjerena doza)	46.6	116	78.3	21.6	79.1	[22]
Podgorica (direktno mjerena doza)	55.2	135	86.1	28.7	83.4	Ovaj rad
Nikšić (izračun. ukupna doza)	75.1	210	126	43.8	109	[22]
Podgorica (izračun. ukupna doza)	48.5	197	91	38.4	86.6	Ovaj rad

Iz tabele 5.10. se vidi da je srednja godišnja efektivna doza koju odrasli stanovnik Podgorice prima napolju od ^{137}Cs u zemljištu oko $5.8 \mu\text{Sv}$, dok od prirodnih radionuklida (^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th) prima u srednjem $84.9 \mu\text{Sv}$, što je iznad (1.2 puta) srednje godišnje efektivne doze na svjetskom nivou ($70 \mu\text{Sv}$). Ta doza je nešto veća i od srednje koja je prethodno dobijena za teritoriju Crne Gore i područje Mojkovca. Ranije procijenjene godišnje efektivne doze od prirodnih terestrijalnih radionuklida za tri lokacije u Podgorici su bile 67.6 , 148 , $56.4 \mu\text{Sv}$ [20], što se uklapa u rezultate dobijene u ovom radu.

Ako se razmatraju ukupne doze, onda se vidi da je srednja vrijednost godišnje efektivne doze (spoljašnje terestrijalno zračenje) koju odrasli stanovnik Podgorice prima napolju (*outdoors*), oko $86 \mu\text{Sv}$ (kako slijedi iz direktnih mjerenja doza na 11 lokacija), malo iznad procjena za teritoriju Nikšića (odnos – oko 1.1), ali i da je mnogo manja od doze koju odrasla osoba godišnje prima od ovog zračenja na području Bukovika i Bukovice (9.1 i 6.4 puta, respektivno).

Srednja godišnja efektivna doza procijenjena na osnovu izračunate apsorbovane doze ima vrijednost 91 μSv , što je manje (1.4 puta) od srednje godišnje efektivne doze koja je na isti način dobijena za teritoriju Nikšića.

Na kraju, ukoliko se uporede vrijednosti srednjih godišnjih efektivnih doza dobijenih u ovom radu sa vrijednostima na svjetskom nivou (prirodni izvori zračenja), *outdoors* – 0.07 mSv (tabela 3.1.), zaključuje se da je srednja godišnja efektivna doza na osnovu izračunate apsorbovane doze (0.091 mSv) i na osnovu izmjerene apsorbovane doze (0.086 mSv), veća nego na svjetskom nivou, i to 1.3 i 1.2 puta, respektivno. Ipak, ova odstupanja nijesu značajna, imajući u vidu da je ukupna (*outdoors* i *indoors*) srednja godišnja doza uslovljena eksternim terestrijalnim zračenjem prirodnog porijekla na svjetskom nivou 0.48 mSv, ali da ima opseg (0.3-1.0) mSv. Takođe, srednja godišnja efektivna doza od svih prirodnih izvora zračenja na svjetskom nivou iznosi 2.4 mSv, uz opseg (1-13) mSv.

6. ZAKLJUČAK

Predmet ovog rada bilo je terestrijalno γ -zračenje *outdoors*, odnosno γ -zračenje terestrijalnog porijekla napolju, a cilj je bio da se provjeri nivo izloženosti stanovništva ovom zračenju, tj. odrede doze koje stanovništvo prima od ovog izvora zračenja. Doze u vazduhu mjerene su uređajem Canberra INSPECTOR 1000 i procijenjene na osnovu γ -spektrometrijskih mjerenja koncentracija aktivnosti radionuklida u uzorcima zemljišta sa 11 lokacija na gradskom području Podgorice. Za tri lokacije analizirane su koncentracije aktivnosti u tri sloja zemljišta (dubine do 15 cm), a za ostale lokacije analiziran je samo površinski sloj zemljišta (do 5 cm).

Rezultati ovog istraživanja pokazuju da su koncentracije aktivnosti radionuklida u površinskom sloju zemljišta u Podgorici:

- u opsegu (280-628) Bq/kg sa srednjom vrijednošću 416 Bq/kg za ^{40}K , što odgovara medijani srednjih vrijednosti na svjetskom nivou. Ova srednja vrijednost je manja od srednje vrijednosti koja je dobijena za područja Mojkovca i Nikšića, i više od 5 puta manja nego u Bukoviku i Bukovici, područjima sa visokim fonom terestrijalnog zračenja u Crnoj Gori;
- u opsegu (24.9-142) Bq/kg sa srednjom vrijednošću 49.8 Bq/kg za ^{226}Ra , što je iznad medijane srednjih vrijednosti na svjetskom nivou, kao i srednjih vrijednosti u pojedinim zemljama južne Evrope, ali i pojedinim područjima u Crnoj Gori, osim Nikšića i područja Visoki krš i posebno Jadransko-jonske zone – gdje je ova vrijednosti skoro 4 puta veća;
- u opsegu (23.7-91) Bq/kg sa srednjom vrijednošću 47.8 Bq/kg za ^{232}Th , što je iznad medijane srednjih vrijednosti na svjetskom nivou, kao i srednjih vrijednosti u pojedinim zemljama južne Evrope, ali je uglavnom ispod srednje vrijednosti koja je ranije dobijena za pojedina područja u Crnoj Gori (Durmitorska tektonska jedinica, Visoki krš, Jadransko-jonska zona, Bukovik, Bukovica i Nikšić);
- u opsegu (2-111) Bq/kg sa srednjom vrijednošću 38.7 Bq/kg za ^{137}Cs (2016. godine). Analize koncentracija aktivnosti u tri sloja zemljišta do dubine 15 cm su pokazale da aktivnosti nijesu velike, ali su ipak najveće u površinskom sloju.

Rezultati istraživanja doza terestrijalnog γ -zračenja *outdoors* u Podgorici pokazuju:

- doze izmjerene na samom tlu uglavnom su veće od doza koje su izmjerene u vazduhu, na 1 m visine iznad tla;
- izmjerene jačine apsorbovanih doza na 1 m visine iznad tla su u opsegu (45-110) nGy/h sa srednjom vrijednošću 70 nGy/h, što je nešto iznad srednje doze koja je ranije dobijena za teritoriju Crne Gore i od medijane srednjih vrijednosti jačina apsorbovanih doza u vazduhu *outdoors* (spoljašnje izlaganje terestrijalnom γ -zračenju) na svjetskom nivou;
- jačine apsorbovanih doza na 1 m visine iznad tla, izračunate na osnovu koncentracija aktivnosti radionuklida u zemljištu, su u opsegu (39.6-161) nGy/h sa srednjom vrijednošću 74 nGy/h, što je iznad vrijednosti jačina apsorbovanih doza u vazduhu *outdoors* (spoljašnje izlaganje terestrijalnom γ -zračenju) na svjetskom nivou, ali i ispod takve doze koje je ranije procijenjena za teritoriju Nikšića;
- odnosi izračunatih i direktno izmjerenih jačina apsorbovanih doza na 11 lokacija u Podgorici su u opsegu (0.6-1.5) – što je isto kao na svjetskom nivou, ali je srednja vrijednost tih odnosa nešto veća nego na svjetskom nivou;
- jačine apsorbovanih doza na 1 m visine iznad tla koje potiču od ^{137}Cs u površinskom sloju zemljišta su u opsegu (0.25-13.8) nGy/h, sa srednjom vrijednošću 4.81 nGy/h. Jačine apsorbovanih doza na 1 m visine iznad tla od prirodnih radionuklida (^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th) u zemljištu su u opsegu (39.3-147) nGy/h, sa srednjom vrijednošću oko 70 nGy/h. Doprinos ^{232}Th srednjoj dozi od prirodnih radionuklida je najveći, dok je doprinos ^{40}K najmanji. Dobijena srednja vrijednost je iznad medijane na svjetskom nivou (51 nGy/h), ali je srednja jačina apsorbovane doze koja potiče od ^{40}K u Podgorici ista kao na svjetskom nivou (17 nGy/h);
- godišnje efektivne doze koje odrasli stanovnik Podgorice prima napolju od ^{137}Cs u zemljištu su u opsegu (0.3-17) μSv , sa srednjom vrijednošću oko 6 μSv , a od prirodnih radionuklida (^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th) – u opsegu (48.2-180) μSv , sa srednjom vrijednošću 84.9 μSv , što je iznad srednje godišnje efektivne doze na svjetskom nivou (70 μSv);
- godišnje efektivne doze (spoljašnje terestrijalno zračenje) koje odrasli stanovnik Podgorice prima napolju (*outdoors*) procijenjene na osnovu direktnih mjerenja apsorbovane doze u vazduhu su u opsegu (55.2-135) μSv , sa srednjom vrijednošću oko 86 μSv , što je malo iznad procjena za teritoriju Nikšića, ali i više od 6 puta manje nego u Bukoviku i Bukovicu,

područjima sa visokim fonom terestrijalnog zračenja u Crnoj Gori. Ove doze procijenjene na osnovu izračunate apsorbovane doze su: u opsegu (48.5-197) μSv sa srednjom vrijednošću 91 μSv , što je ispod godišnje efektivne doze koja je na isti način dobijena za teritoriju Nikšića (126 μSv).

Obje godišnje efektivne doze (za odraslog stanovnika Podgorice) od terestrijalnog gama zračenja *outdoors*, izvedene iz direktnih mjerenja i proračuna jačine apsorbovane doze u vazduhu, 86 μSv i 91 μSv , respektivno, tj. 0.086 mSv i 0.091 mSv, respektivno, su veće od srednje na svjetskom nivou koja iznosi 0.07 mSv (od prirodnih izvora). Ovo odstupanje nije značajno, pošto je ukupna srednja godišnja doza uslovljena spoljašnjim terestrijalnim zračenjem prirodnog porijekla na svjetskom nivou 0.48 mSv, ali sa opsegom (0.3-1.0) mSv.

Rezultati dobijeni u ovom rada mogu biti osnova za analize i proračune rizika od terestrijalnog gama zračenja *outdoors* u Podgorici.

LITERATURA

- [1] Мухин К. Н., Экспериментальная ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА (том I, издание четвертое), МОСКВА АЭНЕРГОАТОМИЗДАТ, 1983.
- [2] Draganić I., Radioaktivni izotopi i zračenja (Knjiga I, Opšti pojmovi), Univerzitet u Beogradu, Beograd, 1981.
- [3] Draganić I., Radioaktivni izotopi i zračenja (Knjiga II, Radne tehnike), Univerzitet u Beogradu, Beograd, 1963.
- [4] <http://nucleardata.nuclear.lu.se/toi/nucSearch.asp>
- [5] Svrkota Nikola, Razvoj koincidentnih metoda mjerenja na višedetektorskim gama-spektrometrima, *doktorska disertacija*, Prirodno-matematički fakultet, Univerzitet Crne Gore, 2013.
- [6] Sources and effects of ionizing radiation, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). 2000 Report to the General Assembly of the United Nations with Scientific Annexes, Annex B: Exposures from natural radiation sources, United Nations, New York, 2000.
- [7] Sources and effects of ionizing radiation, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). 2008 Report to the General Assembly of the United Nations with Scientific Annexes, Annex B: Exposures of the public and workers from various sources of radiation, United Nations, New York, 2010.
- [8] Nevenka M. Antovic, Perko Vukotic, Nikola Svrkota, Sergey K. Andrukhovich, Pu-239+240 and Cs-137 in Montenegro soil: their correlation and origin, *J. Environ. Radioactiv.*, 293 (1), 299-302, 2012.
- [9] ICRP 103, The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, *Ann. ICRP*, 37 (2/4), 2007.
- [10] ICRP 60, 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, *Ann. ICRP*, 21 (1-3), 1991.
- [11] Kapdan E., Varinlioglu A., Karahan G., Radioactivity levels and health risks due to radionuclides in the soil of Yalova, northwestern Turkey, *Int. J. Environ. Res.* 5 (4), 837-846, 2011.

- [12] Otansev P., Karahan G., Kam E., Barut I., Taskin H., Assessment of natural radioactivity concentrations and gamma dose rate levels in Kayseri, Turkey, *Radiat. Protect. Dosim.*, 148 (2), 227-236, 2012.
- [13] Antović N., Materijali i prezentacije za studente Prirodno-matematičkog fakulteta – Laboratorijski praktikum III i IV (Nuklearna fizika), 2014-2015.
- [14] Softić Ilda, Personalne i ambijentalne doze zračenja u trima laboratorijama za fiziku na Univerzitetu Crne Gore, *specijalistički rad*, Prirodno-matematički fakultet, Univerzitet Crne Gore, 2015.
- [15] Model 4500 Manuel TLD Reader with WinREMS™, Operator's Manuel, Publication No. 4500-W-O-0602-004, June 28, 2002.
- [16] InSpector™ 1000 Digital Hand- Held Multichannel Analyzer.
- [17] *Zakon o zaštiti od jonizujućeg zračenja i radijacionoj sigurnosti*, Sl. list CG, br. 56/09 i 58/09.
- [18] *Pravilnik o granicama izlaganja jonizujućim zračenjima*, Sl. list SRJ, br. 32/98.
- [19] P. Vukotić, N. Antović, S. Dapčević, G. I. Borisov, V. V. Kuzmič, V. M. Kulakov, M. Mirković, M. Pajović, R. Svrkota, B. Fuštić, G. Duretic, A. Dlabach, Background gamma-radiation in Montenegro, *Proceedings of the IRPA Regional Symposium on Radiation Protection in Neighbouring Countries of Central Europe, Prague, Czech Republic*, pp. 477-479, 1997.
- [20] N. M. Antovic, N. Svrkota and I. Antovic, Radiological impacts of natural radioactivity from soil in Montenegro, *Radiat. Protect. Dosim.*, 148 (3), 310-317, 2012.
- [21] Nevenka M. Antović, Danilo S. Bošković, Nikola R. Svrkota and Ivanka M. Antović, Radioactivity in soil from Mojkovac, Montenegro, and assessment of radiological and cancer risk, *Nucl. Technol. Radiat. Prot.*, 27 (1), 57-63, 2012.
- [22] Antović N. M., Svrkota N., Antović I., Svrkota R., Žižić R., Živković D., Radioactivity impact assessment of Nikšić region in Montenegro, *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, 302 (2), 831-836, 2014.
- [23] Perko Vukotić, Ranko Svrkota, Tomislav Anđelić, Ranko Zekić, Nevenka Antović, Lokalnosti u Crnoj Gori sa povećanim fonom zračenja, *Glasnik odjeljenja prirodnih nauka, Crnogorska akademija nauka i umjetnosti*, 20, str. 13-40, 2014.

- [24] Perko Vukotić, Ranko Svrkota, Tomislav Anđelić, Nikola Svrkota, Bukovik i Bukovica – lokalnosti sa najvećim fonom terestrijalnog zračenja u Crnoj Gori, rad u štampi u *Glasniku odjeljenja prirodnih nauka, Crnogorska akademija nauka i umjetnosti*.
- [25] Zavod za statistiku Crne Gore – Monstat, Statistički godišnjak 2012, Podgorica, 2012.
- [26] <https://www.google.com/maps/>
- [27] HASL-300, *EML Procedures Manual*. Environmental Measurements Laboratory, U.S. Department of Energy, 28 Edition, 1997.
- [28] IAEA, Measurement of radionuclides in food and the environment (a guidebook), *Technical report*, Series No. 295, 1989.
- [29] Svrkota Nikola, Određivanje aktivnosti torijuma i produkata njegovog raspada metodom dvostrukih koincidencija, *magistarski rad*, Prirodno-matematički fakultet, Univerzitet Crne Gore, 2007.

Popis tabela i slika

Tabela 1.1. Produkti raspada ^{235}U [5].

Tabela 1.2. Produkti raspada ^{238}U [5].

Tabela 1.3. Produkti raspada ^{232}Th [5].

Tabela 1.4. Koncentracije aktivnosti radionuklida u zemljištu južne Evrope [6].

Tabela 2.1. Vrijednosti težinskog faktora zračenja [9].

Tabela 2.2. Vrijednost tkivnog težinskog faktora za određene organe [9].

Tabela 2.3. Personalna ($H_p(10)$) doza zračenja za 36 dana [14].

Tabela 2.4. Izmjerene vrijednosti (jačine) doze zračenja u laboratorijama PMF-a [14].

Tabela 2.5. Procijenjene mjesečne doze zračenja u laboratorijama PMF-a [14].

Tabela 2.6. Procijenjene doze zračenja u laboratorijama PMF-a za 36 dana [14].

Tabela 2.7. Granice godišnjih doza zračenja [18].

Tabela 2.8. Granice godišnjih doza zračenja za lica između 16 i 18 godina koja tokom školovanja koriste izvore zračenja [18].

Tabela 2.9. Granične vrijednosti doza prilikom izlaganja zračenju [9].

Tabela 3.1. Godišnje efektivne doze usljed izlaganja prirodnim izvorima zračenja na svjetskom nivou [7].

Tabela 3.2. Doze od terestrijalnog γ -zračenja u zemljištu južne Evrope [6].

Tabela 3.3. Doze zračenja *outdoors* [6].

Tabela 3.4. Mjerne lokacije u Podgorici.

Tabela 3.5. Gama najvećih intenziteta iz raspada niza ^{226}Ra [5].

Tabela 3.6. Gama najvećih intenziteta iz raspada niza ^{232}Th [5].

Tabela 4.1. Izmjerene vrijednosti (jačine) doze zračenja na mjernim lokacijama iz tabele 3.4.

Tabela 4.2. Aktivnost radionuklida u površinskom sloju zemljišta sa 11 lokacija.

Tabela 4.3. Koncentracija aktivnosti radionuklida u površinskom sloju zemljišta sa 11 lokacija.

Tabela 4.4. Aktivnost radionuklida u uzorcima zemljišta sa tri dubine.

Tabela 4.5. Koncentracija aktivnosti radionuklida u uzorcima zemljišta sa tri dubine.

Tabela 4.6. Srednje aktivnosti radionuklida u uzorcima zemljišta.

Tabela 4.7. Srednje koncentracije aktivnosti radionuklida u uzorcima zemljišta.

Tabela 4.8. Jačina apsorbovane doze *outdoors* na 1 m visine iznad tla.

Tabela 4.9. Jačina apsorbovane doze *outdoors* na 1 m visine iznad tla od prirodnih radionuklida i od ^{137}Cs .

Tabela 4.10. Vrijednosti godišnje efektivne doze.

Tabela 4.11. Vrijednosti godišnje efektivne doze od prirodnih radionuklida i ^{137}Cs .

Tabela 5.1. Koncentracije aktivnosti ^{40}K u zemljištu (Durmitorska tektonska jedinica (DTJ), Visoki krš (VK), Jadransko-jonska zona (JJ)).

Tabela 5.2. Koncentracije aktivnosti ^{226}Ra u zemljištu (Durmitorska tektonska jedinica (DTJ), Visoki krš (VK), Jadransko-jonska zona (JJ)).

Tabela 5.3. Koncentracije aktivnosti ^{232}Th u zemljištu (Durmitorska tektonska jedinica (DTJ), Visoki krš (VK), Jadransko-jonska zona (JJ)).

Tabela 5.4. Koncentracije aktivnosti ^{137}Cs u zemljištu u Crnoj Gori.

Tabela 5.5. Srednja koncentracija aktivnosti radionuklida u sloju zemljišta (0-15) cm.

Tabela 5.6. Koncentracije aktivnosti ^{137}Cs u uzorcima zemljišta sa tri dubine u Podgorici.

Tabela 5.7. Izmjerena jačina apsorbovane doze na 1 m visine iznad tla.

Tabela 5.8. Jačina apsorbovane doze na 1 m visine iznad tla procijenjena na osnovu mjerenja uzoraka zemljišta.

Tabela 5.9. Doprinosi radionuklida dozi u vazduhu na 1 m visine u Podgorici.

Tabela 5.10. Godišnje efektivne doze od spoljašnjeg terestrijalnog zračenja *outdoors*.

Slika 1.1. Šema raspada ^{40}K .

Slika 1.2. Šema raspada ^{137}Cs .

Slika 2.1. Lični dozimetar TLD-100 [14].

Slika 2.2. Iradijator Bicron 2210 (^{90}Sr) [14].

Slika 2.3. Canberra INSPECTOR 1000 [14].

Slika 3.1. Teritorija Podgorice [26] sa naznačenim mjernim lokacijama.

Slika 3.2. Uređaj INSPECTOR 1000 na lokaciji 7.

Slika 3.3. Površinski uzorak zemljišta sa lokacije 7.

Slika 3.4. Uzorci zemljišta sa tri dubine sa lokacije 10.

Slika 3.5. Uzorkovanje sloja zemljišta sa dubine (5-10) cm na lokaciji 10.

Slika 3.6. Uzorci zemljišta nakon sušenja.

Slika 3.7. Prosijavanje uzoraka zemljišta i pakovanje u Marineli posude.

Slika 3.8. Pripremljeni uzorak u Marineli posudi od pola litra.

Slika 3.9. HPGe GEM-40190 relativne efikasnosti 40 %, kojim je vršeno mjerenje uzoraka zemljišta.

Slika 3.10. HPGe GEM-30185-S relativne efikasnosti 35 %, kojim je vršeno mjerenje uzoraka zemljišta.

Slika 3.11. Kalibracioni standard MBSS 2.

Slika 3.12. Kalibracioni dijagram energija-kanala, iz kalibracije koja je korišćena za obradu spektara uzoraka zemljišta.

Slika 3.13. Kalibracioni dijagram efikasnost-energija, iz kalibracije koja je korišćena za obradu spektara uzoraka zemljišta.

Slika 3.14. Spektar površinskog sloja zemljišta sa lokacije 9 ((0-5) cm).

Slika 3.15. Raspad radijuma (^{226}Ra).

Slika 3.16. Raspad torijuma (^{232}Th).

Slika 3.17. Dio γ -emisija iz jezgra ^{214}Po , nakon raspada ^{214}Bi .

Slika 3.18. Dio γ -emisija iz jezgra ^{228}Th , nakon raspada ^{228}Ac .

Slika 4.1. Doze direktno izmjerene na mjernim lokacijama.

Slika 4.2. Aktivnosti radionuklida u ispitivanim uzorcima površinskog zemljišta iz Podgorice.

Slika 4.3. Koncentracije aktivnosti radionuklida u ispitivanim uzorcima površinskog zemljišta iz Podgorice.

Slika 4.4. Aktivnosti radionuklida u površinskom sloju zemljišta.

Slika 4.5. Koncentracije aktivnosti radionuklida u površinskom sloju zemljišta.

Slika 4.6. Izmjerena i izračunata jačina apsorbovane doze na 1 m visine iznad tla.

Slika 4.7. Jačine apsorbovane doze na mjernim lokacijama u Podgorici – od prirodnih radionuklida i ^{137}Cs .

Slika 4.8. Godišnja efektivna doza od terestrijalnog zračenja *outdoors*.

Slika 4.9. Godišnja efektivna doza od prirodnih radionuklida i ^{137}Cs (tabela 4.11.).

PRILOG

Tabela 4.2. Aktivnost radionuklida u površinskom sloju zemljišta sa 11 lokacija.

Lokacija	Masa uzorka (kg)	Aktivnost (Bq)			
		¹³⁷ Cs	⁴⁰ K	²²⁶ Ra	²³² Th (²²⁸ Ac)
1	0.583	7.43±0.20	275.85±3.50	23.05±0.50	29.98±0.80
2	0.531	39.81±0.40	154.86±2.40	35.99±0.50	24.15±0.60
3	0.500	7.81±0.20	197.17±3.20	19.34±0.50	25.35±0.70
4	0.856	11.19±0.20	330.24±3.70	25.86±0.50	30.34±0.80
5	0.502	26.76±0.30	152.53±2.40	12.52±0.40	17.77±0.60
6	0.511	51.11±0.40	200.22±3.20	20.12±0.50	23.60±0.70
7	0.530	5.73±0.20	248.52±3.50	32.03±0.60	25.37±0.80
8	0.647	1.29±0.10	181.09±2.00	18.65±0.40	15.35±0.60
9	0.545	3.95±0.20	243.84±3.20	18.48±0.40	27.51±0.80
10	0.636	15.60±0.20	327.63±3.70	26.65±0.50	30.54±0.80
11	0.506	56.19±0.40	317.89±4.20	71.83±0.80	46.07±1.03

Tabela 4.3. Koncentracija aktivnosti radionuklida u površinskom sloju zemljišta sa 11 lokacija.

Lokacija	Živo vrijeme mjerenja (s)	Masa uzorka (kg)	Koncentracija aktivnosti (Bq/kg)			
			¹³⁷ Cs	⁴⁰ K	²²⁶ Ra	²³² Th (²²⁸ Ac)
1	30 000	0.583	12.74±0.30	473.16±6.00	39.54±0.90	51.42±1.40
2	30 000	0.531	74.97±0.80	291.64±4.50	67.78±0.90	45.48±1.10
3	30 000	0.500	15.62±0.40	394.34±6.40	38.68±1.00	50.70±1.40
4	30 000	0.856	13.07±0.20	385.79±4.30	30.21±0.60	35.44±0.90
5	30 000	0.502	53.31±0.60	303.84±4.80	24.94±0.80	35.40±1.20
6	30 000	0.511	100.02±0.80	391.82±6.30	39.37±1.00	46.18±1.40
7	30 000	0.530	10.81±0.40	468.91±6.60	60.43±1.10	47.87±1.50
8	30 000	0.647	1.99±0.20	279.89±3.10	28.82±0.70	23.72±0.90
9	30 000	0.545	7.25±0.40	447.41±5.90	33.91±0.70	50.48±1.50
10	30 000	0.636	24.53±0.30	515.14±5.80	41.90±0.80	48.02±1.20
11	30 000	0.506	111.05±0.80	628.24±8.30	141.96±1.60	91.05±2.00

Tabela 4.4. Aktivnost radionuklida u uzorcima zemljišta sa tri dubine.

Lokacija	Živo vrijeme mjerenja (s)	Masa uzorka (kg)	Dubina (cm)	Aktivnost (Bq)			
				¹³⁷ Cs	⁴⁰ K	²²⁶ Ra	²³² Th (²²⁸ Ac)
2	30 000	0.531	(0-5)	39.81±0.40	154.86±2.40	35.99±0.50	24.15±0.60
		0.673	(5-10)	27.75±0.30	170.80±2.70	42.24±0.60	26.87±0.60
		0.554	(10-15)	28.35±0.30	217.23±3.40	55.56±0.70	33.30±0.90
4	30 000	0.856	(0-5)	11.19±0.20	330.24±3.70	25.86±0.50	30.34±0.80
		0.626	(5-10)	4.86±0.20	295.52±3.20	23.00±0.50	29.72±0.70
		0.616	(10-15)	3.59±0.20	300.23±3.90	25.03±0.50	33.80±0.80
10	30 000	0.636	(0-5)	15.60±0.20	327.63±3.70	26.65±0.50	30.54±0.80
		0.724	(5-10)	7.21±0.20	370.66±3.90	29.26±0.60	32.37±0.80
		0.778	(10-15)	11.19±0.20	365.39±4.40	33.30±0.60	34.88±0.90

Tabela 4.5. Koncentracija aktivnosti radionuklida u uzorcima zemljišta sa tri dubine.

Lokacija	Živo vrijeme (s)	Masa (kg)	Dubina (cm)	Koncentracija aktivnosti (Bq/kg)			
				¹³⁷ Cs	⁴⁰ K	²²⁶ Ra	²³² Th (²²⁸ Ac)
2	30 000	0.531	(0-5)	74.97±0.70	291.64±4.50	67.78±0.90	45.48±1.10
		0.673	(5-10)	41.23±0.40	253.79±4.00	62.76±0.90	39.92±0.90
		0.554	(10-15)	51.17±0.50	392.11±6.10	100.30±1.30	60.11±1.60
4	30 000	0.856	(0-5)	13.07±0.20	385.79±4.30	30.21±0.60	35.44±0.90
		0.626	(5-10)	7.76±0.30	472.08±5.10	36.74±0.80	47.48±1.10
		0.616	(10-15)	5.83±0.30	487.39±6.30	40.63±0.80	54.87±1.30
10	30 000	0.636	(0-5)	24.53±0.30	515.14±5.80	41.90±0.80	48.02±1.20
		0.724	(5-10)	9.96±0.30	511.96±5.40	40.41±0.80	44.71±1.10
		0.778	(10-15)	14.38±0.30	469.65±5.60	42.80±0.80	44.83±1.10

Tabela 4.6. Srednje aktivnosti radionuklida u uzorcima zemljišta.

Lokacija	Aritmetičke sredine aktivnosti radionuklida (Bq)			
	¹³⁷ Cs	⁴⁰ K	²²⁶ Ra	²³² Th (²²⁸ Ac)
1	7.43±0.20	275.85±3.50	23.05±0.50	29.98±0.80
2	31.97±0.30	180.96±2.80	44.6±0.60	28.11±0.70
3	7.81±0.20	197.17±3.20	19.34±0.50	25.35±0.70
4	6.55±0.20	308.66±3.60	24.63±0.50	31.29±0.80
5	26.76±0.30	152.53±2.40	12.52±0.40	17.77±0.60
6	51.11±0.40	200.22±3.20	20.12±0.50	23.60±0.70
7	5.73±0.20	248.52±3.50	32.03±0.60	25.37±0.80
8	1.29±0.10	181.09±2.00	18.65±0.40	15.35±0.60
9	3.95±0.20	243.84±3.20	18.48±0.40	27.51±0.80
10	11.33±0.20	354.56±4.00	29.74±0.60	32.60±0.80
11	56.19±0.40	317.89±4.20	71.83±0.80	46.07±1.00

Tabela 4.7. Srednje koncentracije aktivnosti radionuklida u uzorcima zemljišta.

Lokacija	Aritmetičke sredine koncentracija aktivnosti radionuklida (Bq/kg)			
	¹³⁷ Cs	⁴⁰ K	²²⁶ Ra	²³² Th (²²⁸ Ac)
1	12.74±0.30	473.16±6.00	39.54±0.90	51.42±1.40
2	55.79±0.60	312.51±4.90	76.94±1.00	48.50±1.20
3	15.62±0.40	394.34±6.40	38.68±1.00	50.70±1.40
4	8.89±0.30	448.42±5.20	35.87±0.70	45.93±1.10
5	53.31±0.60	303.84±4.80	24.94±0.80	35.40±1.20
6	100.02±0.80	391.82±6.30	39.37±1.00	46.18±1.40
7	10.81±0.40	468.91±6.60	60.43±1.10	47.87±1.50
8	1.99±0.20	279.89±3.10	28.82±0.70	23.72±0.90
9	7.25±0.40	447.41±5.90	33.91±0.70	50.48±1.50
10	16.29±0.30	498.92±5.60	41.71±0.80	45.85±1.10
11	111.05±0.80	628.24±8.30	141.96±1.60	91.05±2.00

Tabela 4.8. Jačina apsorbovane doze *outdoors* na 1 m visine iznad tla.

Lokacija	Izmjerena apsorbovana doza (nGy/h)	Izračunata apsorbovana doza (nGy/h)	Odnos izračunate i izmjerene apsorbovane doze
1	90±1	70.64±1.50	0.78
2	110±3	80.26±1.40	0.73
3	71±2	66.88±1.60	0.94
4	48±2	53.07±1.00	1.11
5	54±2	52.20±1.40	0.97
6	55±3	74.85±1.70	1.36
7	53±3	77.73±1.70	1.47
8	68±2	39.56±1.00	0.58
9	45±3	65.71±1.50	1.46
10	68±2	72.89±1.40	1.07
11	110±3	160.58±2.40	1.46

Tabela 4.9. Jačina apsorbovane doze *outdoors* na 1 m visine iznad tla od prirodnih radionuklida i od ¹³⁷Cs.

Lokacija	Apsorbovana doza od prirodnih radionuklida (nGy/h)	Apsorbovana doza od ¹³⁷ Cs (nGy/h)
1	69.06±1.51	1.58±0.04
2	70.95±1.27	9.32±0.10
3	64.94±1.57	1.94±0.05
4	51.45±1.00	1.62±0.02
5	45.57±1.29	6.63±0.07
6	67.42±1.57	12.43±0.10
7	76.39±1.69	1.34±0.05
8	39.31±1.00	0.25±0.02
9	64.81±1.48	0.90±0.05
10	69.84±1.34	3.05±0.04
11	146.78±2.29	13.80±0.10

Tabela 4.10. Vrijednosti godišnje efektivne doze.

Lokacija	Izmjerena apsorbovana doza na 1 m iznad tla (nGy/h)	Izračunata apsorbovana doza (nGy/h)	Godišnja efektivna doza na osnovu izmjerene apsorbovane doze (mSv)	Godišnja efektivna doza na osnovu izračunate apsorbovane doze (mSv)
1	90±1	70.64±1.50	0.110±0.001	0.087±0.002
2	110±3	80.26±1.40	0.135±0.004	0.098±0.002
3	71±2	66.88±1.60	0.087±0.002	0.082±0.002
4	48±2	53.07±1.00	0.059±0.002	0.065±0.001
5	54±2	52.20±1.40	0.066±0.002	0.064±0.002
6	55±3	74.85±1.70	0.067±0.004	0.092±0.002
7	53±3	77.73±1.70	0.065±0.004	0.095±0.002
8	68±2	39.56±1.00	0.083±0.002	0.049±0.001
9	45±3	65.71±1.50	0.055±0.004	0.081±0.002
10	68±2	72.89±1.40	0.083±0.002	0.089±0.002
11	110±3	160.58±2.40	0.135±0.004	0.197±0.003