

UPORABA ERICA SOFTVERA ZA PROCJENU RADIOLOŠKOG RIZIKA ZA NELJUDSKU BIOTU

Karajko, Marijela

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:160:414350>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-26**



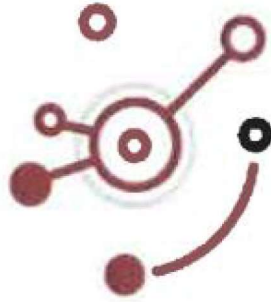
Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU

ODJEL ZA FIZIKU



MARIJELA KARAJKO

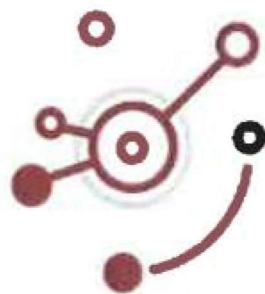
**UPORABA ERICA SOFTVERA ZA PROCJENU
RADIOLOŠKOG RIZIKA ZA NELJUDSKU BIOTU**

Diplomski rad

Osijek, 2024.

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU

ODJEL ZA FIZIKU



MARIJELA KARAJKO

**UPORABA ERICA SOFTVERA ZA PROCJENU
RADIOLOŠKOG RIZIKA ZA NELJUDSKU BIOTU**

Diplomski rad

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

Osijek, 2024.

„Ovaj diplomski rad je izrađen u Osijeku pod mentorstvom doc. dr. sc. Marine Poje Sovilj i prof. dr. sc. Branka Petrinca u sklopu Sveučilišnog diplomskog studija fizike i informatike na Odjelu za fiziku Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku.“

UPORABA ERICA SOFTVERA ZA PROCJENU RADIOLOŠKOG RIZIKA ZA NELJUDSKU BIOTU

MARIJELA KARAJKO

Sažetak: Alat ERICA softverski je program koji vodi korisnika kroz proces procjene, vodi evidenciju i izvodi potrebne izračune za procjenu ukupne brzine apsorbirane doze za odabrane referentne organizme. Element ocjenjivanja integriranog pristupa ERICA organiziran je u trima razinama. U ovom diplomskom radu procjenjivali smo radiološki rizik za neljudsku biotu na 8 lokacija Brodsko-posavske županije. Na razini 1 iz izbornika s popisom radionuklida odaberemo radionuklide: ^{137}Cs , ^{232}Th , ^{238}U , ^{226}Ra , ^{210}Pb , ^{235}U čije su vrijednosti koncentracija prethodno izmjerene. Alat uspoređuje upisane koncentracije u tlu s najrestriktivnijim EMCL-om za svaki radionuklid i određuje kvocijent rizika (RQ). Pošto je jedan $\text{RQ} > 1$, prešli smo na strožu provjeru u razinu 2. Na razini 2 odabrali smo sve referentne organizme na kopnu i faktor nesigurnosti $\text{UF}=3$. ERICA zatim računa transfer faktore radionuklida u svakom organizmu i procjenjuje koncentracije aktivnosti pojedinih radionuklida u svakom organizmu. Razina 2 ispisala je očekivane i konzervativne RQ-ove te ukupne težinske brzine doza. Za mahovine i lišajeve je očekivani $\text{RQ} < 1$, a konzervativni > 1 . Zbog toga se moralo dodatno istražiti o radiološkim učincima na njih.

(91 stranica, 48 slika, 31 tablica, 43 literaturna navoda)

Rad je pohranjen u knjižnici Odjela za fiziku

Ključne riječi: neljudska biota, apsorbirane brzine doza, kvocijent rizika, program ERICA

Mentor: doc. dr. sc. Marina Poje Sovilj

Komentor: prof. dr. sc. Branko Petrincec

Ocjenjivači: izv.prof.dr.sc. Vanja Radolić, doc.dr.sc. Marina Poje Sovilj, prof.dr.sc. Branko Petrincec, mr.sc. Slavko Petrinšak

Rad prihvaćen: 17. srpnja 2024.

USE OF ERICA SOFTWARE FOR RADIOLOGICAL RISK ASSESSMENT FOR NON-HUMAN BIOTA

MARIJELA KARAJKO

Abstract: The ERICA tool is a software program that guides the user through the assessment process, keeps records and performs the necessary calculations to estimate the total absorbed dose rate for selected reference organisms. The evaluation element of the ERICA integrated approach is organized in three levels. In this thesis, we assessed the radiological risk for non-human biota at 8 locations in the Brod-Posavina County. At level 1, from the menu with the list of radionuclides, select the radionuclides: ^{137}Cs , ^{232}Th , ^{238}U , ^{226}Ra , ^{210}Pb , ^{235}U whose concentration values were previously measured. The tool compares recorded soil concentrations with the most restrictive EMCL for each radionuclide and determines a risk quotient (RQ). Since one $\text{RQ} > 1$, we moved to a stricter check in level 2. At level 2, we selected all reference organisms on land and the uncertainty factor $\text{UF} = 3$. ERICA then calculates the transfer factors of radionuclides in each organism and estimates the activity concentrations of individual radionuclides in each organism. Level 2 printed expected and conservative RQs and total weighted dose rates. For mosses and lichens is the expected $\text{RQ} < 1$, and the conservative $\text{RQ} > 1$. That is why additional research had to be done on the radiological effects on them.

(91 pages, 48 pictures, 31 tables, 43 references)

Thesis deposited in Department of Physics library

Keywords: non-human biota, absorbed dose rates, risk quotient, ERICA program

Supervisors: Assistant Professor Marina Poje Sovilj, PhD; Professor Branko Petrinc, PhD

Reviewers: Associate Professor Vanja Radolić, PhD, Assistant Professor Marina Poje Sovilj, PhD, Professor Branko Petrinc, PhD, Slavko Petrinšak, MSc

Thesis accepted: July 17th, 2024

Sadržaj

1. UVOD	1
2. IONIZIRAJUĆE ZRAČENJE	3
2.1. IZLOŽENOST PRIRODNIM IZVORIMA ZRAČENJA	4
2.1.1. Kozmičko zračenje.....	4
2.1.2. Terestrijalno (zemaljsko) zračenje.....	7
2.2. IZLOŽENOST UZROKOVANA DJELOVANJEM ČOVJEKA	13
3. DOZIMETRIJSKE VELIČINE	17
4. UČINCI IZLOŽENOSTI ZRAČENJA NA BILJKE I ŽIVOTINJE	23
4.1. Kopnene biljke	23
4.2. Kopnene životinje	24
4.3. Vodeni organizmi.....	25
4.4. Učinci izloženosti zračenju na biotu nakon nuklearne nesreće u Černobilu	25
4.5. Akutne letalne doze za sve vrste organizama.....	27
4.6. FASSET	28
5. Mjerenje radionuklida na području Brodsko – posavske županije	31
5.1. Osnovni podaci o županiji.....	31
5.2. Materijali i metode mjerenja.....	32
5.3. Rezultati određivanja koncentracija aktivnosti radionuklida na tlu Brodsko – posavske županije i rasprava.....	35
6. ERICA SOFTVER	53
6.2. Struktura integriranog pristupa ERICA	56
6.2.1. Formulacija problema	56
6.3. Koncentracije aktivnosti radionuklida u okolišu i u bioti	58
6.5. Procjena brzine apsorbirane doze.....	60
7. Procjena radiološkog opterećenja biote dijela Brodsko-posavske županije	63
7.1. Procjena razine 1	63
7.2. Procjena razine 2	68
7.3. Procjena razine 3	78
8. ZAKLJUČAK	85
9. LITERATURA	87
10. ŽIVOTOPIS	91

1. UVOD

Radioekologija je znanstvena disciplina koja proučava kako se radioaktivne jezgre šire u prirodi (zrakom, vodom, ulaze i izlaze iz tla), međudjeluju sa živim organizmima, migriraju kroz hranidbeni lanac i na taj način utječu na ljude. Radionuklidi prisutni su svuda oko nas. U interesu radioekologije su oni radionuklidi kojima je vrijeme poluživota usporedivo sa starošću Zemlje te onih koji su prisutni u znatnim količinama. Neprestano smo izloženi visokoenergetskom *kozmičkom* zračenju koje dolazi iz svemira i zračenju koje je nastalo u trenutku nastanka Zemlje te dolazi iz Zemljine kore (*terestrijalno zračenje*). Kozmičko i terestrijalno zračenje *prirodni* su izvori zračenja i na njih smo se evolucijski prilagodili. Druga skupina izvora zračenja koji su jednako opasni za ljudski organizam jesu *antropogeni* radionuklidi, radioaktivne jezgre koje su ljudi stvorili. Toj skupini pripadaju radioaktivni elementi oslobođeni atmosferskim i podzemnim nuklearnim testiranjima, proizvodnjom nuklearnog oružja i nuklearne energije, proizvodnjom i korištenjem radioizotopa kao i nuklearnim nesrećama na različitim mjestima.

Znanstvenici su započeli istraživati i proučavati rasprostiranje ispuštenih radionuklida jer ih je zanimalo kakve će posljedice na ljudsko zdravlje i okoliš ostaviti velika količina radionuklida ispuštenih u stratosferu nakon nuklearnih testiranja i nesreća. Najosjetljivije biljke što se tiče ionizirajućeg zračenja jesu crnogorične biljke (bor), a od životinja sisavci, dok su najotpornije biljke mahovine i lišajevi, od životinja mekušci, a najotporniji organizmi općenito jesu virusi i bakterije [1].

U nekom ekosustavu možemo procijeniti rizik kontaminiranosti/izloženosti ionizirajućem zračenju. Od velike je važnosti procijeniti rizik jer nam je bitno zdravlje ljudi. Ljudi jedu biljke i životinje iz okoliša koje u sebe unose druge organizme i vodu kako bi se prehranile i preživjele. Hranidbenim lancem radioaktivne elemente unosimo u naše tijelo. Kako ne bismo vršili pokuse i izlagali biljke i životinje visokim dozama alfa, beta i gama zračenja, posebice zaštićene i ugrožene vrste, više od 60 europskih znanstvenika, regulatora, kreatora politike i stručnjaka za okoliš doprinijelo je razvoju integriranoga pristupa ERICA softvera.

Mjerenjem koncentracija aktivnosti radionuklida u nekom mediju (voda, tlo, zrak) i korištenjem ERICA alata utvrđuje se radiološko stanje na određenom prostoru metodom kvocijenta rizika te se ovisno o izračunatim vrijednostima kvocijenta rizika mogu donijeti važne zaštitne mjere kojima bi se zaštitile biljne i životinjske vrste, kao i ljudi koji tamo žive, ukoliko je to potrebno. Dakle, ERICA alat služi kako bi se utvrdilo radiološko stanje nekog područja. Uz to provjerom

radiološkog rizika mogu se donijeti važne odluke u cilju sprječavanja, smanjenja i kontrole potencijalnih izvora onečišćenja okoliša, osiguranja nuklearne sigurnosti kako bi se spriječio utjecaj na čovjeka i okoliš te se zaštitili specifični ekosustavi i vrste koje tamo žive [2].

Nedavno, 2018. godine provedena je procjena radiološkog rizika okoliša u slijevu srednjeg Dunava na temelju studije Parka prirode Kopački rit u suradnji Instituta za medicinska istraživanja i medicinu rada – Jedinice za zaštitu od zračenja te Laboratorija za niske radioaktivnosti Odjela za fiziku Sveučilišta u Osijeku u Hrvatskoj korištenjem alata ERICA. Kvocijenti rizika za ^{226}Ra bio je veći od 1 na razini 1, dok su kvocijenti rizika za ostale radionuklide ^{137}Cs , ^{232}Th , ^{238}U , ^{210}Pb bili ispod 1 što znači da samo ^{226}Ra predstavlja radiološki rizik za kopnenu biotu pa se procjena nastavila na razini 2. Konzervativni kvocijent rizika bio je veći od 1, a očekivani ispod 1 za lišajeve i briofite. Budući da su oni vrlo otporni na ionizirajuće zračenje, radiološki rizik smatra se zanemarivim pa je time završena procjena. Provedbom procjene zaključilo se da nema radiološkog opterećenja na neljudsku biotu [3].

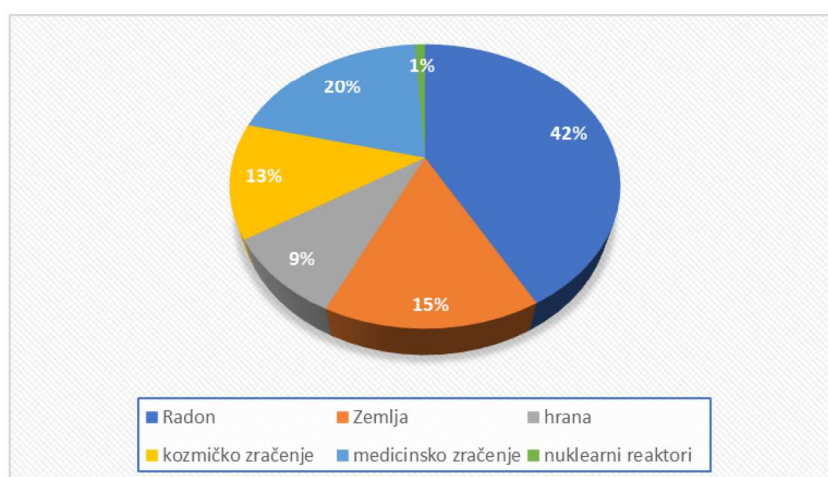
Radon (^{222}Rn) je prirodni radioaktivni plin koji daleko najviše pridonosi ukupnoj dozi koju prima opća populacija od izloženosti prirodnom pozadinskom zračenju. Nakon pušenja smatra se glavnim vodećim uzrokom raka pluća. Različitim transportnim mehanizmima, poput advekcije, konvekcije ili difuzije, kreće se prema površini i izdiže u atmosferu ili ulazi u građevine. Budući da koncentracija radona u zatvorenom prostoru ovisi o građevinskim značajkama zgrada (vrsti gradnje, stanju i starosti postojećih kuća), klimi, meteorološkim parametrima i životnim navikama ljudi te je jedinstvena za svaku pojedinu građevinu, koristi se geogeni radonski potencijal (GRP) [4] [5].

Cilj ovog diplomskog rada jest korištenjem ERICA programa metodom kvocijenta rizika procijeniti radiološku opterećenost neljudske biote (biljaka i životinja) koja živi na području Adžamovaca, Trnakovca, Davora, Rešetara, Šagovine Cerničke, Podvrška, Kapele/Batrine i Vrpolja te na temelju izmjerenih koncentracija aktivnosti radona iz tla u blizini škola i vrtića Brodsko-posavske županije izračunati GRP kako bi se on mogao povezati s kartom radona u zatvorenim prostorima.

2. IONIZIRAJUĆE ZRAČENJE

Opće je poznato da je sva materija sastavljena od atoma, sitnih čestica koje su građene od jezgre koju čine protoni i neutroni te elektronskog omotača, mnoštva elektrona koji slobodno kruže oko jezgre. Neki su atomi prirodno stabilni, dok su neki nestabilni. Atomi s nestabilnom jezgrom poznati su pod nazivom radionuklidi budući da im se jezgra transformira i oslobađa zračenje. Oslobođeno zračenje može biti u obliku čestica (elektroni, neutroni i α čestice) ili u obliku elektromagnetskog zračenja. X-zrake područje su emg zračenja, između ultraljubičastog i gama zračenja. Razlika između fotona X-zraka i gama fotona jest u mjestu nastanka. Gama fotoni nastaju u jezgri atoma, a fotoni X-zračenja nastaju iz elektronskog omotača. Gama zrake znatno su prodornije od rendgenskih zraka.

Udio u godišnjoj efektivnoj dozi koju primi svaki pojedinac od različitih izvora zračenja prema UNSCEARU 2008. jest:



Slika 1. Udio u godišnjoj efektivnoj dozi koju primi svaki pojedinac od prirodnih i umjetno (antropogeno ili ljudskim djelovanjem) stvorenih izvora zračenja [6]

Radionuklid ^{222}Rn (jednostavnije radon) svojim udjelom od 42 % najviše doprinosi udjelu u godišnjoj efektivnoj dozi koju primi svaki pojedinac od prirodnih i umjetno stvorenih izvora zračenja. Kada udahnemo radon, njegovi kratkoživući produkti koji nastaju njegovim daljnjim raspadom, zadržavaju se u plućima i zrače zdrave stanice respiratornog trakta. Radon nastaje radioaktivnim raspadom radija ^{226}Ra , a njegove razine prvenstveno ovise o sadržaju uranija ^{238}U i radija ^{226}Ra u tlu. Razine variraju ovisno i o propusnosti tla, konstrukciji zgrade, načinu života, klimi. Terestrijalno zračenje jest zračenje koje potječe iz tla. U tlu se nalaze primordijalni radionuklidi koji su nastali u trenutku nastanka Zemlje. Ono doprinosi godišnjoj efektivnoj dozi udjelom od 15 %.

efektivnoj dozi udjelom od 13 %. Značajno je prigušeno Zemljinom atmosferom i Zemljinim magnetskim poljem, koji su ključni u zaštiti ljudi i neljudske biote (biljaka i životinja). Zemljino magnetsko polje koje se proteže od Zemljine jezgre izvan ionosfere, tvoreći područje poznato kao magnetosfera, zakreće nabijene čestice prema magnetskim polovima Zemlje [7]. Taj nas mehanizam u velikoj mjeri štiti od sunčevog vjetra i kozmičkih zraka. Astročestice vrlo visokih energija, uglavnom protoni (jezgre vodikova atoma) i kozmičke gama-zrake, koje dolaze do Zemlje, redovito bivaju zaustavljene već u gornjim slojevima atmosfere. Visokoenergijski proton ili kozmička gama-zraka sudara se u gornjem sloju atmosfere s atomskom jezgrom dušika ili kisika. Na takav način atmosfera, tanki zračni omotač planeta, štiti život na Zemlji od pogubnog zračenja [8]. Dok same Sunčeve pjegice ne utječu na Zemlju, Sunčeve baklje i drugi poremećaji koji se šire oko našeg Sunca za vrijeme pojačane aktivnosti Sunčevih pjega dovode do povećanja broja čestica (elektrona i protona) i štetnog svjetlosnog zračenja (ultraljubičastih i rendgenskih zraka), poznatih kao Sunčev vjetar. Na razini mora kozmičko zračenje doprinosi s oko 15 % ukupne doze iz prirodnih izvora zračenja, ali na većim visinama predstavlja dominantan izvor zračenja. Građevinski materijali pružaju zaštitu od zemaljskog zračenja, ali isto tako mogu sadržavati radionuklide koji povećavaju izloženost. Primordijalni radionuklidi kao i radionuklidi nastali interakcijom kozmičkih zraka sa Zemljinom atmosferom prisutni su i u hrani i piću koje konzumiramo. Hrana doprinosi svojim udjelom od 9 % ukupnoj godišnjoj efektivnoj dozi. Većina doze koju čovjek primi unošenjem hrane je uslijed kalija ^{40}K . Starenjem populacije raste udio medicinskog zračenja u ukupnoj dozi. To se odnosi na dijagnostičku radiologiju, nuklearnu medicinu i radioterapiju. Medicinska izloženost čini oko 98 % doprinosa iz svih umjetnih izvora, predstavljajući približno 20 % ukupne godišnje efektivne doze koju primi svaki pojedinac. Proizvodnja električne energije u nuklearnim elektranama raste od 1956. godine. Nuklearne elektrane doprinose svega 1 % ukupnoj godišnjoj efektivnoj dozi.

2.1. IZLOŽENOST PRIRODNIM IZVORIMA ZRAČENJA

2.1.1. Kozmičko zračenje

Neprestano smo izloženi prirodnim izvorima zračenja. Glavni faktori izloženosti prirodnom zračenju jesu visokoenergetske čestice koje dolaze iz svemira i ulaze u zemljinu atmosferu te prirodni radionuklidi koji su prirodno prisutni posvuda u okolišu, uključujući i naše tijelo.

Primarno kozmičko zračenje sastoji se od dviju komponenti *galaktičke i solarne*. Galaktičke kozmičke zrake sastoje se od protona (88 %) i alfa čestica, tj. jezgara helija (11 %).

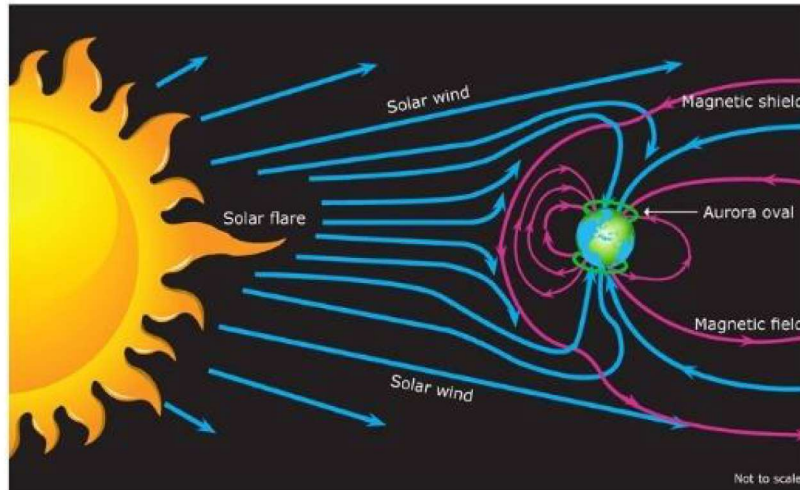
Energetski spektar primarnih kozmičkih čestica proteže se od 10^8 eV do 10^{20} eV. Najveća do sada izmjerena energija na Zemlji iznosi $3,2 \cdot 10^{20}$ eV. Znanstvenici smatraju da čestice najvećih energija koje dolaze do Zemlje potječu iz Zemljine galaksije. Solarna komponenta nastaje blizu površine Sunca zbog magnetskih poremećaja i potječe od Sunčevih baklji. Magnetska polja, koja stvaraju Sunčeve pjege, sprječavaju dopiranje dijela Sunčeve topline do površine Sunca. Kada sunčeve pjege međusobno djeluju, one uzrokuju eksplozije energije, tzv. Sunčeve baklje. Sunčeve baklje su velike erupcije energije koja dolazi sa Sunca i sadrže nekoliko različitih oblika energije: toplinu, magnetsku energiju i ionizirajuće zračenje. Sunčeve baklje češće su u razdobljima maksimalne Sunčeve aktivnosti, a najveće na kraju tih razdoblja [6] [9].

Solarne čestice uglavnom se sastoje od protona energija manjih od 100 MeV, samo rijetki broj čestica ima energiju iznad 10 GeV. Ove čestice mogu proizvesti značajne brzine doza na velikim visinama, ali samo čestice s najvećim energijama utječu na brzine doza na razini tla [10].

Naše Sunce nema uvijek isto magnetsko polje. Događaji unutar Sunca izravno utječu na Zemljino magnetsko polje. Periodična promjena sunčevog magnetskog polja, tj. Sunčev ciklus koji traje svakih 11 godina buđuci da se svakih 11 godina za vrijeme sunčevog maksimuma mijenjaju polovi sunčevog magnetskog polja, proizvodi slične promjene i u Sunčevom vjetru. Sunčev vjetar je visoko ionizirana plazma koju emitira Sunce u svim smjerovima. U vrijeme najveće sunčeve aktivnosti, sunčevo je magnetsko polje najveće, ali je intenzitet galaktičkog kozmičkog zračenja manji jer čestice teže dopiru do Zemlje pa su ujedno i manje doze zračenja.

Zemljino magnetsko polje djelomično smanjuje intenzitet kozmičkog zračenja koje dopire do vrha atmosfere. Silnice Zemljinog magnetskog polja (magnetska indukcija B) imaju oblik magnetskog polja štapićastog magneta - dipolnog karaktera koje izvire iz sjevernog magnetskog pola i poniru u južni magnetski pol, najjače su u području ekvatora, a najslabije u blizini Sjevernog i Južnog zemljinog pola pa je i intenzitet kozmičkog zračenja najjači na polovima jer Sunčev vjetar stvara tlak na magnetske silnice magnetskog polja Zemlje te ih deformira. Ubrzani elektroni slijede Zemljino magnetsko polje sve do polarnih područja gdje se sudaraju s molekulama kisika i dušika u gornjoj Zemljinoj atmosferi. U tim sudarima elektroni predaju svoju energiju atmosferi čime pobuđuju atome i molekule u viša energetska stanja (apsorpcija). Kada se atomi i molekule vraćaju u stanja niže energije, otpuštaju (emitiraju) svoju energiju u obliku svjetlosti [11]. Kao posljedicu na polovima možemo

primijetiti polarnu svjetlost. Zelena boja u polarnoj svjetlosti karakteristična je za kisik, dok su naznake ljubičaste, plave ili ružičaste karakteristične za plin dušik. Ružičasta boja polarne svjetlosti znak je onečišćenja atmosfere.



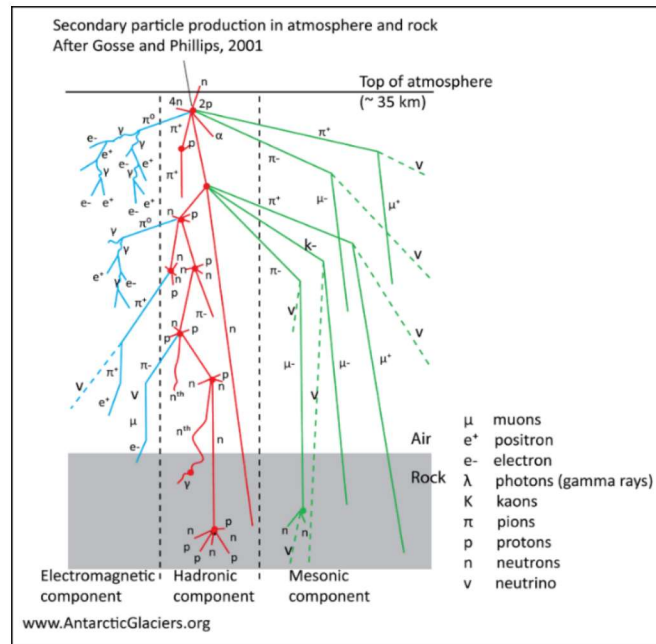
Slika 2. Utjecaj Solarnog vjetra na Zemljino magnetsko polje¹

Sekundarno kozmičko zračenje inducira se tako što visokoenergetske čestice primarnog zračenja (protoni i jezgre helija) međudjeluju s česticama i molekulama atmosfere (N_2 , O_2 , CO_2 , vodenom parom, ...). Stvara se skup sekundarnih nabijenih i nenabijenih čestica tzv. kozmički pljusak: sekundarni nukleoni (protoni i neutroni), elektroni, pozitroni, pioni, mioni, fotoni, niže Z-jezgre.

Kozmički pljusak koji nastaje sastoji se od triju komponenti:

1. **foton/elektronske (elektromagnetske)** komponente - neutralni pioni (π) i kaoni (K) raspadaju se gotovo trenutno i proizvode visokoenergetske fotone (γ) i mione (μ^+ , μ^-); mioni i fotoni zatim se raspadaju i formiraju elektrone (e^-) i pozitrone (e^+) koji se nalaze na srednjim visinama
2. **hadronske** komponente – sekundarni nukleoni stvaraju više nukleona (protona i neutrona) u atmosferi, na nižim visinama dominiraju neutroni energija između 50 i 500 MeV, dok neutroni nižih energija od 1 MeV nastaju nuklearnim isparavanjem
3. **mezonske komponente** – čine ju kaoni i pioni koji se razgrađuju na mione (mase 105,7 MeV/c²), elektrone (mase 0,511 MeV/c²) i tau čestice (mase 1777,8 MeV/c²) [12].

¹ <https://www.sciencelearn.org.nz/images/247-solar-wind-plasma-and-the-magnetosphere>, (preuzeto 23.6.2023.)



Slika 3. Komponente sekundarnog kozmičkog zračenja (kozmički pljusak) [12]

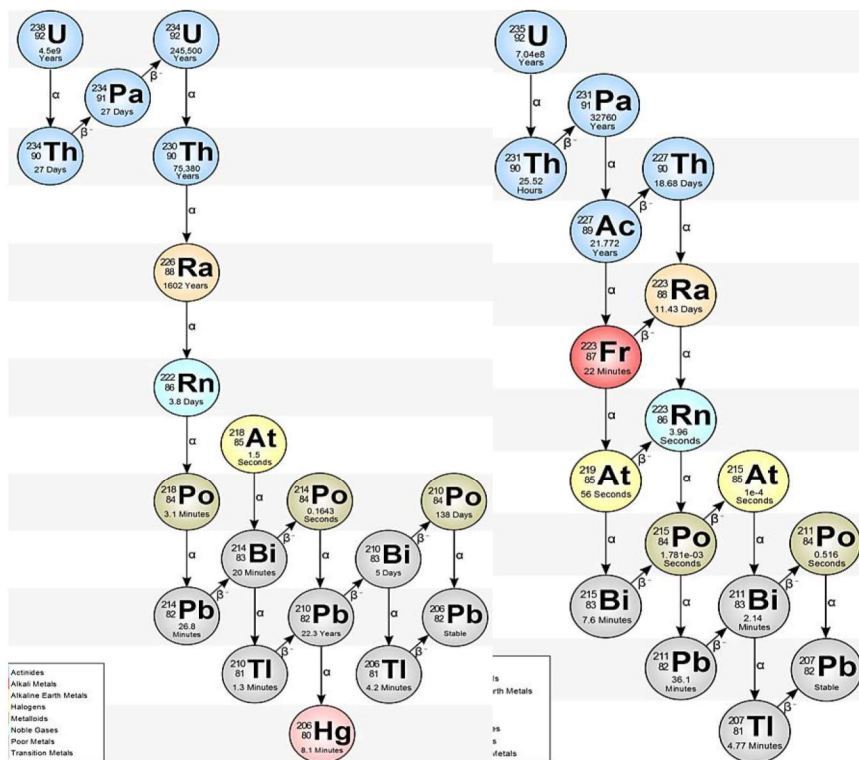
Na razini tla mioni s energijama između 1 GeV i 20 GeV najviše doprinose brzini apsorbirane doze u slobodnom zraku od izravnog ionizirajućeg zračenja (oko 80 %). Ostatku doprinose elektroni iz elektromagnetske kaskade. Porastom nadmorske visine, elektroni postaju sve važniji čimbenici doprinosa brzini apsorbirane doze [10].

Najznačajniji kozmogeni radionuklidi jesu: ^3H , ^{10}Be , ^{14}C , ^{26}Al , ^{36}Cl , ^{129}I . Radi se uglavnom o laganim radionuklidima kratkih i srednjih poluživota koji s padalinama i/ili kao aerosoli dolaze do tla [10]. ^{14}C i ^{22}Na imaju važnu metaboličku ulogu u ljudskome tijelu. ^3H ugrađuje se u vodu i postaje dio kruženja vode (kišnica, podzemne vode,..).

2.1.2. Terestrijalno (zemaljsko) zračenje

Prirodni radionuklidi zemaljskog podrijetla prisutni su u svim medijima u okolišu uključujući i samo ljudsko tijelo. Ozračivanje ljudskog tijela iz vanjskih izvora uglavnom pripada gama zračenju iz radionuklida iz serije ^{238}U , ^{232}Th i ^{40}K [10]. Također ozračuju ljudske organe alfa i beta česticama. Uz ova tri, još je jedan radionuklid od iznimne važnosti u radioekologiji, a to je ^{235}U . Svi oni imaju dugo vrijeme poluživota: $t_{1/2} = 1,25 \cdot 10^9$ godina (za ^{40}K), $t_{1/2} = 704 \cdot 10^6$ godina (za ^{235}U), $t_{1/2} = 4,47 \cdot 10^9$ godina (za ^{238}U) i $t_{1/2} = 1,40 \cdot 10^{10}$ godina (za ^{232}Th). Pojavljuju se u stijenama i tlu te u građevinskim materijalima koji se dobivaju njihovom preradom. Torij ^{232}Th i uranij ^{235}U jesu jezgre roditelji svojih vlastitih lanaca radioaktivnih raspada [10]. Svaki od ovih lanaca sastoji se od 12 – 15 radionuklida i završava stabilnim izotopom olova Pb: lanac ^{238}U završava stabilnim izotopom ^{206}Pb , lanac ^{235}U završava

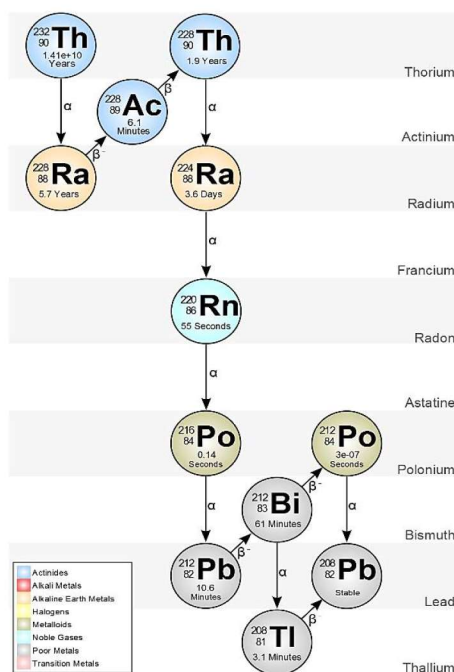
izotopom ^{207}Pb , dok lanac ^{232}Th završava stabilnim izotopom ^{208}Pb . Povećana koncentracija bilo kojeg člana ovih nizova štetna je ne samo zbog ionizirajućeg zračenja, nego i kemijske toksičnosti teških metala. Uz to, neki od izotopa imaju dvostruki negativni učinak na žive organizme: emitiraju α zračenje što ih čini opasnim za unutarnju izloženost, ali i raspadaju se do radona – plemenitog radioaktivnog plina koji lako ulazi u tijelo inhalacijom i/ili ingestijom [10].



Slika 4. Lanci radioaktivnog raspada ^{238}U i ^{235}U ^{2 3}

² <https://metadata.berkeley.edu/nuclear-forensics/images/U238.png>, (preuzeto 13.1.2024.)

³ <https://metadata.berkeley.edu/nuclear-forensics/images/U235.png>, (preuzeto 13.1.2024.)



Slika 5. Lanac radioaktivnog raspada ^{232}Th ⁴

Ljudi su izloženi gama i beta zrakama koje nastaju raspadom prirodno prisutnih radionuklida u tlu i u otvorenom i u zatvorenom prostoru. Znanstvenici su izravno mjerili brzine doze u zraku od prirodno prisutnih radionuklida u većini naseljenih regija svijeta (zemlje u kojima živi 3/5 svjetskog stanovništva). Na neka vanjska mjerenja možda je utjecala prisutnost zgrada u blizini. Građevinski materijali djeluju kao izvori zračenja, ali isto tako štite od vanjskog zračenja. Zgrade izgrađene od cigli, betona ili kamena učinkovito apsorbiraju vanjske gama zrake. Brzina apsorbirane doze u zatvorenom prostoru stoga ovisi o koncentracijama aktivnosti prirodnih radionuklida u građevinskim materijalima i koncentraciji radona. Zbog toga je brzina apsorbirane doze u zatvorenom prostoru viša [10].

Izloženost udisanjem (inhalacija)

Udisanje radionuklida u zraku može biti rezultat kratkotrajnog ili kontinuiranog procesa ispuštanja kontaminiranih čestica. Glavni kozmogeni radionuklidi ^{14}C i ^3H ravnomjerno su raspršeni u atmosferi tako da je izloženost udisanjem ovih radionuklida potpuno zanemariva u odnosu na izloženost ingestijom. Radionuklidi koji izlaze iz tla prisutni su u zraku u različitim količinama ovisno o uvjetima tla, vjetrova i vlage. Zrak sadrži i određeni udio organske tvari (leteći pepeo) koja sadrži manje uranija u odnosu na tlo, međutim leteći pepeo sadrži puno veće

⁴ https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/2/25/Decay_Chain_Thorium.svg/300px-Decay_Chain_Thorium.svg.png, (preuzeto 13.1.2024.)

koncentracije uranija. Na obalnim mjestima je koncentracija uranija za red veličine niža nego u kontinentalnim ili industrijaliziranim područjima [10].

Vrlo važan doprinos inhalacijskoj izloženosti daju radon ^{222}Rn i kratkotrajni produkti njegovog raspada. Radon je radioaktivni plemeniti plin bez boje, mirisa i okusa, lakši od zraka pa izlazi iz tla gradijentom tlaka i temperature. Ulaskom u zatvorene prostorije može postići visoke koncentracije. Poznato je da taloženje duž stjenki ljudskih dišnih puteva kratkoživućih produkata njegovog raspada i u manjoj mjeri produkata raspada torona (^{220}Rn) osigurava glavni put za izlaganje pluća štetnom zračenju. Ovu izloženost uglavnom proizvode alfa čestice produkata radona, iako se u manjoj mjeri emitiraju beta čestice i gama zračenje. Alfa čestice imaju malen domet, desetak mikrometara, ali su masivne čestice koje sadrže energiju do nekoliko MeV. Kada govorimo o radonu ^{222}Rn uglavnom su energije od 4-9 MeV. Oštećenje stanica dišnoga sustava ovisi o vremenu poluraspada $t_{1/2}$. Produkti radona, polonij ^{218}Po i ^{214}Po imaju relativno kratko vrijeme poluraspada 3,05 min i 164 μs što znači da nemaju mnogo vremena za putovanje od mjesta nastanka do neposredne okoline ljudi u odnosu na vrijeme poluraspada olova ^{214}Pb (26,8 min) i bizmuta ^{214}Bi (19,9 min) što im omogućuje taloženje na površinama i vezivanje za čestice aerosola iz okoline. Uz to jedan od razloga zašto se lako vežu za sitne čestice prašine u zraku jest što imaju električni naboj. Udahnute čestice lijepe se za ovojnice pluća gdje uzrokuju radijacijsko oštećenje stanica i na taj način negativno utječu na zdrave stanice što na kraju može dovesti do raka. Pedesetih godina prošlog stoljeća uzrok raka pluća pripisivan je potomcima radona. Procjenjuje se da je radon odgovoran za između 3 % i 14 % svih slučajeva raka pluća, ovisno o prosječnoj razini radona u pojedinoj zemlji i duljini boravka u takvom prostoru. Za najveći broj ljudi do ozračenja radonom dolazi u zatvorenim prostorima. Glavni izvori radona u zatvorenim prostorima su: tlo neposredno ispod građevine (85-90 %), građevinski materijal (5-10 %), podzemne vode (oko 5 %) i zemni plin (< 1 %). Države članice Europske Unije uspostavile su nacionalne referentne razine za koncentracije radona u zatvorenim prostorima i na radnim mjestima. Referentna razina za godišnju prosječnu koncentraciju aktivnosti u zraku ne smije biti viša od 300 Bq/m^3 . Navedena referentna razina prenesena je u hrvatsko zakonodavstvo Pravilnikom o granicama ozračenja, preporučenom doznom ograničenju i procjenjivanju osobnog ozračenja [13].

Godine 1998. Nacionalna akademija znanosti (NAS) procijenila je da se između 3000 - 32000 smrtnih slučajeva od karcinoma pluća godišnje u SAD-u može pripisati potomcima ^{222}Rn . Ne postoji donja granica koncentracije aktivnosti ispod koje radon ne predstavlja rizik od

karcinoma pluća jer čak i male koncentracije aktivnosti mogu rezultirati povećanjem rizika za razvijanje karcinoma pluća [14] [10].

Izloženost unošenjem hrane i pića (ingestijom)

Osim što udišemo radionuklide lanaca raspada ^{238}U i ^{232}Th , također smo izloženi unosu radioaktivnih čestica ingestijom. Doze ingestijom uglavnom su uzrokovane radionuklidima ^{40}K i također onima iz već spomenutih serija lanaca raspada ^{238}U i ^{232}Th koji su prisutni u hrani i vodi za piće. Unos prirodnih radionuklida u ljudsko tijelo ingestijom ovisi o količini konzumirane hrane i vode te o koncentraciji radionuklida. Koncentracije u hrani različite su zbog različite klime, poljoprivrednih uvjeta koji prevladavaju te različitih vrijednosti pozadinskog zračenja [10].

Kalij ^{40}K nalazimo u svim živim organizmima. Samo 0,012 % od ukupnog kalija pripada ovom izotopu. On je stalni unutarnji izvor aktivnosti i neophodan je za normalan rad srčanog mišića. [10] [15]. Element je koji najviše utječe na kvalitetu povrća jer povećava sadržaj šećera, škroba i ostalih organskih spojeva koji čine suhu tvar. Neophodan je i za ostale životno važne procese u biljci kao i fosfor koji osigurava, pohranjuje i prenosi energiju unutar biljke [16]. Jedan je od tri glavna elementa (uz dušik N i fosfor P) koja se koriste u gnojivu NPK. Ono je namijenjeno za gnojidbu plodovitog (rajčica, paprika, tikvice, patlidžan, krastavci, dinja, lubenica...) i lukovičastog povrća koje može biti osjetljivo na malo povišenu koncentraciju klora u otopini tla kao i za korjenaste i mahunaste vrste povrća. Prirodno je prisutan u hrani kao što su banane, krumpir, avokado, bijeli grah. Nakon unosa hranom više-manje se ravnomjerno raspoređuje u tijelu. Aktivnost 1 g kalija iznosi 31 Bq. Njegova je koncentracija u organizmu pod homeostatskom kontrolom. Neki ljudi ne smiju koristiti kuhinjsku sol (NaCl) u svojoj prehrani pa zbog toga koriste drugu sol KCl. Ova se sol koristi i kao umjetno gnojivo, u spektroskopiji, prilikom proizvodnje stakla, ali isto tako u hitnim slučajevima može se dati u otopini kao spora infuzija [17].

Znanstvenici su proveli u nekoliko država (Njemačka, Italija, Poljska, Ujedinjeno Kraljevstvo, Kina, Indija, Japan, SAD, Kanada) istraživanje godišnjih unosa radionuklida koji nastaju raspadom uranijevog i torijevog lanca u prehrani (mliječni proizvodi, mesni proizvodi, proizvodi od žitarica, lisnato povrće, voće i korjenasto povrće, riba i riblji proizvodi, pitka voda). Na temelju dobivenih rezultata dokazano je da olovo ^{210}Pb i ^{210}Po imaju najviše koncentracije, dok ^{230}Th i ^{232}Th imaju najniže koncentracije. ^{226}Ra i ^{238}U imaju srednju vrijednost koncentracije [10].

Procjena unutarnjih doza od ingestije radionuklida uranijevog i torijevog lanca prikazana je u Tablici 1.

Tablica 1. Godišnji unos i efektivna doza od ingestije radionuklida uranijevog i torijevog niza [10]

Table 18 Annual intake and effective dose from ingestion of uranium and thorium series radionuclides										
Radio-nuclide	Activity intake ^a (Bq)			Effective dose coefficient [12, 121] ($\mu\text{Sv Bq}^{-1}$)			Committed effective dose ^b (μSv)			
	Infants	Children	Adults	Infants	Children	Adults	Infants	Children	Adults	Age-weighted
²³⁸ U	1.9	3.8	5.7	0.12	0.068	0.045	0.23	0.26	0.25	0.25
²³⁴ U	1.9	3.8	5.7	0.13	0.074	0.049	0.25	0.28	0.28	0.28
²³⁰ Th	1.0	2.0	3.0	0.41	0.24	0.21	0.42	0.48	0.64	0.58
²²⁶ Ra	7.8	15	22	0.96	0.80	0.28	7.5	12	6.3	8.0
²¹⁰ Pb	11	21	30	3.6	1.9	0.69	40	40	21	28
²¹⁰ Po	21	39	58	8.8	2.6	1.2	180	100	70	85
²³² Th	0.6	1.1	1.7	0.45	0.29	0.23	0.26	0.32	0.38	0.36
²²⁸ Ra	5.5	10	15	5.7	3.9	0.69	31	40	11	21
²²⁸ Th	1.0	2.0	3.0	0.37	0.15	0.072	0.38	0.30	0.22	0.25
²³⁵ U	0.1	0.2	0.2	0.13	0.071	0.047	0.011	0.012	0.012	0.011
Total							260	200	110	140

^a Consumption rates from Table 13 and concentrations in foods and water (reference values) from Table 15.

^b Committed effective dose from the annual intake. Age distribution for weighted values: infants 0.05, children 0.3, adults 0.65.

Ukupna težinska vrijednost prema dobi iznosi 140 μSv . Ukupna efektivna doza od inhalacije i ingestije terestrijalnih radionuklida iznosi 310 μSv , od čega je 170 μSv od ⁴⁰K, a preostalih 140 μSv od dugoživućih radionuklida u nizu uranija i torija. Uranij ²³⁸U se u tijelu zadržava posebno u kosturu. Dokazano je da su koncentracije približno slične u različitim vrstama kostiju (rebra, kralješci). Nakon unosa ingestijom i inhalacijom, torij se uglavnom taloži na površini kostiju u zadržava duže vremena. Olovo ²¹⁰Pb nakuplja se također u kostima, dok se ²¹⁰Po raspoređuje u mekim tkivima (jetri i bubrezima) [10].

Tablica 2. Prosječna svjetska izloženost prirodnim izvorima zračenja [10]

Source of exposure	Annual effective dose (mSv)	
	Average	Typical range
Cosmic radiation		
Directly ionizing and photon component	0.28 (0.30) ^a	
Neutron component	0.10 (0.08)	
Cosmogenic radionuclides	0.01 (0.01)	
Total cosmic and cosmogenic	0.39	0.3–1.0 ^d
External terrestrial radiation		
Outdoors	0.07 (0.07)	
Indoors	0.41 (0.39)	
Total external terrestrial radiation	0.48	0.3–0.6 ^e
Inhalation exposure		
Uranium and thorium series	0.006 (0.01)	
Radon (²²² Rn)	1.15 (1.2)	
Thoron (²²⁰ Rn)	0.10 (0.07)	
Total inhalation exposure	1.26	0.2–10 ^d
Ingestion exposure		
⁴⁰ K	0.17 (0.17)	
Uranium and thorium series	0.12 (0.06)	
Total ingestion exposure	0.29	0.2–0.8 ^e
Total	2.4	1–10

^a Result of previous assessment [U3] in parentheses.

^b Range from sea level to high ground elevation.

^c Depending on radionuclide composition of soil and building materials.

^d Depending on indoor accumulation of radon gas.

^e Depending on radionuclide composition of foods and drinking water.

Bitno je istaknuti da ukupna godišnja efektivna doza od ^{222}Rn iznosi 1,15 mSv od čega na efektivnu dozu od radona i produkata njegova raspada prisutnih u zraku iz svih izvora otpada 1,1 mSv, 0,05 mSv dolazi od plina radona otopljenog u krvi i 0,02 mSv od plina radona koji se unosi u naše tijelo vodom iz slavine [10].

2.2. IZLOŽENOST UZROKOVANA DJELOVANJEM ČOVJEKA

Ljudske aktivnosti poput rudarenja, prerade ruda i proizvodnja energije izgaranjem ugljena uzrokuju dodatnu izloženost radioaktivnom zračenju. Okoliš se onečišćuje ispuštanjem velikih količina radioaktivnog otpada iz nuklearnih elektrana i drugih nuklearnih postrojenja koji nastaje tijekom njihovog rada i razgradnje. Također proizvodnja nuklearnog materijala u vojne svrhe kao i testiranje nuklearnog oružja izlaže ljude radijaciji na globalnoj razini. Posebice su izloženi ljudi koji žive u blizini postrojenja koja ispuštaju radioaktivni otpad. Fisija uranija rezultira mnogobrojnim radionuklidima: neki od njih su teški (maseni broj im je između 80 i 100 ili između 130 i 150) s dugim vremenom poluživota: ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu i ^{241}Am . Vrijeme poluživota varira od nekoliko dana do nekoliko desetaka godina [10].

Glavne industrije koje iskopavaju i prerađuju sirovine bogate prirodno prisutnim radionuklidima i otpad koji ispuštaju:

- 1. prerada fosfata** – proizvodi se fosforna kiselina koja se koristi u proizvodnji gnojiva, toplinskim se procesom (upotrebom koksa i silicija) proizvodi otpad troska (CaSiO_2)
- 2. prerada metalne rude** – kositar, tantalit, željezo, kolumbit prerađuju se, a troska koja se dobije preradom koristi se u proizvodnji cementa, dok se katranski ugljen koristi u proizvodnji čađavog ulja i mješavine katrana za cestu
- 3. vađenje uranija** – radiološki otpad sadržan u jalovini mora se odlagati pod posebnim mjerama
- 4. vađenje nafte i plina, građevinska industrija te industrija starog željeza**

Radionuklidi koji se emitiraju u zrak i vodu iz ovih industrija jesu oni iz serije ^{238}U i ^{232}Th . Industrije fosfata i cementa, vađenje plina i nafte, industrije koje koriste prirodni plin u zrak najviše ispuštaju ^{222}Rn . U industriji fosfata primijećeno je da su povećane koncentracije radona između 35 i 780 Bq/m^3 . Industrija proizvodnje elementarnog fosfora, željeza i čelika u zrak ispušta ^{210}Pb , dok se proizvodnjom cementa oslobađa ^{210}Po . Svi ovi radionuklidi raspršuju se

na velikim udaljenostima. Najveća ispuštanja radionuklida u vodu i zraku jesu iz industrija prerade fosfata, proizvodnje nafte i plina te primarne proizvodnje željeza i čelika. Zagađenje zraka u Slavonskom Brodu posljedica je rada Rafinerije nafte Brod koja je smještena u Brodu u entitetu Republike Srpske, u BiH. Rafinerija je stavljena u pogon 2008. godine što se navodi kao početak zagađenja zraka u Slavonskom Brodu. Prerada ruske nafte s visokim udjelom sumpora, između 2 i 2,5 %, za razliku od arapske ili hrvatske nafte s nižim udjelom sumpora, oko 1% dovodi do ispuštanja štetnih tvari u zrak predstavljajući velik rizik za okoliš i ljude. 2015. godine nastavilo se zagađenje sumporovodikom, a razina lebdećih PM10 čestica često je premašila dopušteno dnevno ograničenje. U 2016. situacija je bila još gora. Što se tiče istraživanja radiološke komponente zagađenosti okoliša, u srpnju i kolovozu 2016. godine provedena su mjerenja brzine ambijentalnog doznog ekvivalenta na 150 lokacija. Mjerene vrijednosti ne prelaze 120 nSv/h, a njihova srednja vrijednost iznosi 80 nSv/h. Gamaspektrometrijska mjerenja uzoraka vode iz rijeke Save i uzoraka tla s područja grada nisu pokazala povišene vrijednosti radioaktivnosti. Drugim riječima, nije pronađen trag koji bi upućivao na radiološku zagađenost opasnu za zdravlje građana [10] [18] [19].

2.2.1. Proizvodnja i testiranje nuklearnog oružja

Testiranja nuklearnog oružja u atmosferi, koja su se odvijala od 1945. do 1980. uključivala su nekontrolirano ispuštanje radioaktivnih materijala izravno u okoliš i uzrokovala najveću kolektivnu dozu do sada od umjetnih izvora zračenja. Proizvodnja nuklearnog oružja uključuje osiguravanje količine uranija ili plutonija za njihovu fisiju te tricija i deuterija za fuzijske uređaje. Gorivni ciklus za vojne svrhe sličan je procesu za proizvodnju nuklearne električne energije: rudarenje i mljevenje uranija, obogaćivanje, proizvodnju goriva, rad reaktora i ponovnu obradu. Do ispuštanja radionuklida može doći u najrazličitijim fazama, ali posebno tijekom ponovne obrade i odvajanja plutonija. Ispuštanja, a time i izloženosti radioaktivnim tvarima bile su najveće u prvim godinama kada su se uspostavljali nuklearni arsenali. Najaktivnije godine testiranja bile su 1954., 1958., 1961. i 1962. Ukupni broj atmosferskih ispitivanja u svim zemljama bio je 543, a ukupni prinos bio je 440 Mt. Ispitivanja nuklearnog oružja provedena su na raznim lokacijama na i iznad zemljine površine [10].

Radioaktivni otpad ušao je u lokalni, regionalni ili globalni okoliš ovisno o mjestu eksplozije (nadmorska visina i širina). Za ispitivanja provedena na zemljinoj površini, dio radioaktivnog otpada odlaže se na mjestu ispitivanja i regionalno do nekoliko tisuća km niz vjetar. Ovaj udio varira od testa do testa ovisno o meteorološkim uvjetima, visini na kojoj se odvija testiranje, vrsti površine i okolnom materijalu (voda, tlo, toranj, ...). Za refraktorne radionuklide kao što

je ^{95}Zr i ^{144}Ce , pretpostavlja se da se 50% krhotina taloži lokalno u neposrednoj blizini mjesta ispitivanja i daljnjih 25% regionalno. Za hlapljive radionuklide kao što su ^{90}Sr , ^{137}Cs i ^{131}I pretpostavlja se da se prosječno 50% prinosa fisije taloži lokalno i regionalno. Ostatak krhotina i sve krhotine od zračnih eksplozija široko su raspršene u atmosferi. Glavni doprinos vanjskom izlaganju tijekom testiranja pridonio je kratkoživući radionuklid ^{95}Zr i njegov produkt ^{95}Nb , dok su od manjeg značaja bili ^{106}Ru , ^{54}Mn i ^{144}Ce . ^{137}Cs najvažniji je doprinositelj i jedini radionuklid koji i danas doprinosi kontinuiranoj vanjskoj izloženosti još od davne 1996. godine. Ovaj je radionuklid uz ^{90}Sr još uvijek prisutan u gornjim slojevima atmosfere. Iz atmosfere dolaze do površine [10].

Najopasniji **antropogeni** (ljudski stvoreni) radionuklidi jesu upravo fisijski produkti ^{90}Sr (β emiter, $t_{1/2} = 28,9$ godina), ^{137}Cs (β i γ emiter, $t_{1/2} = 30,2$ godine), ^{134}Cs (β i γ emiter, $t_{1/2} = 2,06$ godine) i ^{131}I (β i γ emiter, $t_{1/2} = 8,03$ dana) jer se stvaraju u velikim količinama, lako ulaze u živi organizam inhalacijom ili ingestijom i mogu oponašati neke biogene elemente. ^{137}Cs i ^{134}Cs mogu zamijeniti kalij [10].

Ingestijska izloženost javlja se unutar tjedan ili mjesec dana nakon taloženja radionuklida za kratkotrajne radionuklide (^{131}I , ^{140}Ba , ^{89}Sr). ^{90}Sr dugotrajno se i kontinuirano prenosi prehranom, stoga se i duže zadržava u ljudskome tijelu (kostima) te lako može zamijeniti kalcij. ^{131}I može zamijeniti neradioaktivni jod. Lako se prenosi i zračnim masama te prelazi velike udaljenosti prije nego se raspadne.

Inhalacijskoj izloženosti najviše pridonose ^{144}Ce , ^{137}Cs te kratkoživući transuranijski radionuklidi ^{106}Ru , ^{91}Y , ^{95}Zr i ^{89}Sr čije je taloženje, a samim time i koncentracije ovih radionuklida opalo nakon prestanka atmosferskih ispitivanja 1980. Za dugoživuće radionuklide koji su nastali raspadom uranija izloženost udisanjem postala je beznačajna nakon 1985. godine.

Zemlje s najvećom proizvodnjom nuklearnog oružja jesu Sjedinjene Američke Države, Ruska Federacija, Velika Britanija, Francuska i Kina [10].

2.2.2. Proizvodnja nuklearne energije

Od početka industrije 1956. rasla je proizvodnja električne nuklearne energije. Proizvodnja se relativno brzo širila od 1970. do 1985. godine, nakon čega je usporila. Krajem 1997. radilo je 437 nuklearnih reaktora u 31 zemlji. Ukupna snaga iznosila je 352 GW. Ciklus nuklearnog goriva uključuje rudarenje i mljevenje uranijeve rude, pretvorbu u nuklearno gorivo, izradu gorivih elemenata, proizvodnju energije u nuklearnom reaktoru, skladištenje goriva ili ponovnu

obradu te skladištenje i odlaganje radioaktivnog otpada. Ciklus uključuje i transport materijala između postrojenja [10].

2.2.3. Rudarenje i obrada uranija

Rudarstvo uranija uključuje uklanjanje velikih količina rude bogate uranijem kao i produktima njegovog raspada. 40 % ukupne svjetske proizvodnje proizveli su podzemni rudnici, 30% otvoreni rudnici, dok je 13% svjetskog uranija proizvedeno nakon vađenja ispiranjem *in situ*. Kao nusproizvod druge prerade minerala dobiveno je preostalih 8%. Iskopavanje i mljevenje provodilo se u nekoliko zemalja: Australiji, Kanadi, Kazahstanu, Namibiji, Nigeriji, JAR-u, SAD-u, Uzbekistanu i tadašnjoj Ruskoj Federaciji. Procesi rudarenja i mljevenja stvaraju različite ostatke otpada (jalovinu) uz uranijev proizvod. Jalovina se sastoji od zdrobljene i mljevene stijene zajedno s kemikalijama i tekućinama nakon procesa vađenja minerala. Dugoživi produkti ^{230}Th ($t_{1/2} = 80\,000$ godina) i ^{226}Ra ($t_{1/2} = 1600$ godina) radioaktivnog raspada ^{238}U prisutni su u jalovini i predstavljaju dugoročni izvor otpuštanja radona u atmosferu. Pod pretpostavkom da kolektivnu dozu primi stanovništvo unutar 100 km od rudnika i tvornica, procjenjuje se da godišnja doza iznosi 40 μSv . Uz pažljivo upravljanje jalovištima i njihovim pokrivanjem, ova se izloženost može i smanjiti [10].

2.2.4. Rad nuklearnog reaktora

Reaktori koji se koriste za proizvodnju električne energije svrstavaju se prema svojim rashladnim sustavima i moderatoru: reaktori s lakom vodom i hlađeni pod tlakom ili kipućom vodom (PWRs, BWRs), teškom vodom hlađeni i umjereni reaktori (HWRs), plinom hlađeni i grafit - umjereni reaktori (GCRs) i lakom vodom hlađeni grafit - umjereni reaktori (LWGRs). Sve su ovo toplinski reaktori koji koriste moderatorski materijal koji usporava brze neutrone nastale fisijom. PWRs reaktor ispušta plemenite plinove, a među njima dominiraju ^{133}Xe ($t_{1/2} = 5,3$ dana) i ^{135}Xe ($t_{1/2} = 9,2$ h). Sastav ispuštanja radionuklida PWRs reaktora varira od reaktora do reaktora. Uz ^{133}Xe i ^{135}Xe obično su prisutni izotopi kobalta ^{58}Co i ^{60}Co kao i izotopi cezija ^{134}Cs i ^{137}Cs . Reaktor BWRs ispušta raznolikiji sastav plemenitih plinova, većinom su to radionuklidi kriptona i ksenona [10].

3. DOZIMETRIJSKE VELIČINE

Opći cilj zaštite od zračenja je zaštita ljudi i okoliša od štetnog utjecaja ionizirajućeg zračenja zbog vanjske i unutrašnje ozračenosti. Razvijene su (ICRP – Međunarodna komisija za radiološku zaštitu, engl. *International Commission on Radiological Protection*) specifične zaštitne dozimetrijske veličine koje omogućavaju kvantifikaciju vanjskog ozračenja ionizirajućim zračenjem kako cijelog tijela tako i pojedinog organa, ali i unutrašnjeg ozračenja udisanjem ili unošenjem prehranom radionuklida u organizam. Sustav zaštite od zračenja uključuje i operativne veličine koje se koriste u monitoringu i praktičnim primjenama u specifičnim situacijama vezanim uz vanjska i unutarnja ozračenja ljudi u „profesionalno izloženim skupinama odnosno zanimanjima”. Ove se veličine temelje na pretpostavljenoj predanoj energiji organima odnosno tkivu [20].

3.1. Dozimetrijske veličine i utjecaj ionizirajućeg zračenja na čovjeka

Osnovna dozimetrijska veličina koja se koristi jest **apsorbirana doza D**. Definira se kao omjer srednje energije $d\bar{\epsilon}$ predane ionizirajućim zračenjem u elementu volumena V i mase dm tvari u tom volumenu. SI jedinica za apsorbiranu dozu jest Jkg^{-1} , a ima poseban naziv Gray (**Gy**). Mjerljiva je veličina.

$$D = \frac{d\bar{\epsilon}}{dm}$$

Ona odražava karakteristike polja zračenja kao i sve interakcije tog zračenja s materijom u određenom volumenu. Njome se ne opisuje atomska struktura same materije (biološkog tkiva) u kojoj dolazi do ionizacije kao posljedice interakcije sa zračenjem kao ni samo svojstvo interakcije s materijom. Neke vrste zračenja nanose veću štetu tkivu u odnosu na neku drugu vrstu zračenja [20].

Low-LET (elektroni, rendgenske zrake, fotoni ili gama zrake) raspršuje se na zraku i zbog toga vrlo malo prenose energiju. Stanice ljudskog tijela mogu se oporaviti nakon izlaganja niskom LET zračenju.

High-LET zračenje (alfa čestice i neutroni) ne raspršuje se, širi se u obliku uskog snopa i prenosi ogromne količine energije zbog čega napravi veliku štetu na stanicama nakon koje se stanice ne mogu oporaviti.

Ponašanje teških nabijenih čestica (alfa čestica i protona) razlikuje se od ponašanja lakših nabijenih čestica kao što su elektroni i pozitroni. Energetski nabijene čestice međudjeluju s

materijom Coulombovom (elektrostatskom) silom i gube kinetičku energiju *ekscitacijom* i *ionizacijom*. Ekscitacija i ionizacija nastaju kada nabijene čestice gube energiju u interakciji s orbitalnim elektronima u mediju. Ovi interakcijski gubici nastaju zbog Coulombovih sila koje djeluju na nabijene čestice kada prolaze u blizini električnog polja koje stvaraju elektroni i protoni atoma (tvari kroz koju prolaze). Elektroni slijede vijugavi put u materiji kao rezultat višestrukih raspršenja uzrokovanih elektrostatskim silama (odbijanje i/ili privlačenje) zbog čega je duljina puta elektrona veća od njegova dometa (dubina prodiranja čestice kroz materiju). S druge strane, veća masa teške nabijene čestice rezultira gustim i obično linearnim ionizacijskim putem (udaljenost koju čestica prijeđe) [21] [22].

Ionizirajuće zračenje kada prolazi kroz tvar gubi energiju prema Bethe-Blochovoj formuli koja opisuje gubitak energije po prijeđenom putu koji je proporcionalan kvadratu naboja čestice. Ta se energija prenosi na atome tvari koja je izložena zračenju zbog čega se molekule tvari ioniziraju. Naboj alfa čestice iznosi +2 u odnosu na naboj beta čestice (+1 ili -1). To znači da alfa čestica ima veću zaustavnu moć, tj. predaje više energije tvari s kojom međudjeluje u odnosu na beta česticu. Budući da alfa čestice imaju veću masu od beta čestica, alfa čestice imaju manju kinetičku energiju pa im je i doseg u materiji kraći [23].

Ionizirajuće zračenje neće jednako djelovati na sve ljude i neljudsku biotu (biljke i životinje). Postoji 6 faktora koji odlučuju kako će neko tijelo u cjelini reagirati na ionizirajuće zračenje: količina primljene doze, vrijeme izlaganja, dio tijela koji se izlaže, vrsta stanice i tkiva, opće zdravstveno stanje i životna dob, vrsta ionizirajućeg zračenja. Glavni problem utjecaja ionizirajućeg zračenja jest oštećenje DNA u jezgri stanice. Specifična je za svaki živi organizam i u njoj je zapisano sve što je potrebno za funkcioniranje same stanice. Jedan trak ionizirajućeg zračenja može uzrokovati pucanje oba lanca DNA i u odsutnosti potpuno efikasnog načina oporavka može rezultirati dugotrajnim oštećenjem čak i pri niskim dozama zračenja. Oštećenje ostalih dijelova stanice također može utjecati na funkcioniranje same stanice, ali i razvoj malignog stanja. Tri su ishoda nakon ozračivanja DNA:

- 1) u slučaju manjih oštećenja zbog manjih doza izlaganja, DNA se može popraviti
- 2) u slučaju izlaganja većim dozama zračenja stanice tkiva i organa s vremenom odumiru te naposljetku ljudi umru, tj. životinje uginu, a biljke uvenu
- 3) u slučaju izlaganja većim dozama zračenja stanice se mogu popraviti, ali s greškom (mutacijom) koja može biti nasljedna ili jako loša što ponovno dovodi do smrti stanice. Protoonkogeni (geni koji se mogu aktivirati i zatim sudjelovati u razvoju tumora) i tumor-

supresorski geni kontroliraju složene biokemijske putove uključene u rast stanica, genomsku stabilnost, interakciju stanica. Mutacija tih gena može ugroziti te kontrole i pridonijeti razvoju raka u više faza. Narušavanjem biokemijske ravnoteže, mutirane stanice umjesto da budu ubijene ili provjerene, nastavljaju se dijeliti [10].

Dakle, ionizirajuće zračenje ima dakle dvojake efekte na ljude i neljudsku biotu:

a) determinističke

b) stohastičke.

Deterministički efekti kao što su opadanja kose, akutnog radijacijskog sindroma, opekline kože, javljaju se nakon visokih doza koje se normalno isporučuju tijekom kratkog vremenskog razdoblja, što ubija veliki broj stanica, mogućeg oštećenja tkiva, velikih učinaka na tjelesne funkcije pa čak i smrti. Većina determinističkih učinaka javlja se ubrzo nakon izlaganja (iako se neki mogu pojaviti u kasnijim životnom vijeku) iznad granične doze od 100 mGy za izloženo tkivo. Godišnja efektivna doza ne smije biti 20 mSv/god jer se pri toj dozi javlja rizik od determinističkih efekata za ljude koji rade u polju ionizirajućeg zračenja. Kada ozračimo oči dozom od 2 Gy, dolazi do zamucivanja očne leće. Osip se javlja pri dozi od 6 Gy nakon ozračivanja cijeloga tijela, a trajni sterilitet pri dozi od 4 Gy [1] [24].

Stohastički (slučajni, probabilistički) efekti javljaju se slučajno nakon što se abnormalne stanice pogrešno poprave ili ne poprave, mogu dovesti do nasljednih učinaka kod potomaka ili razvoja raka. Indukcija raka zračenjem niskim LET-om čvrsto je dokazana u rasponu doza od oko 100 Gy i više, ali su studije o popravku DNA dokazale da ne postoji dovoljno niska doza zračenja koja ne bi mogla prouzrokovati neki negativni učinak na organizam. Nije dokazano da je svaka nasljedna bolest izazvana zračenjem, ali postoje značajni dokazi iz studija na životinjama o nasljednom oštećenju zametnih stanica (jajnih stanica i spermija). Pojava stohastičkih učinaka ovisi o dozi. Opća je pretpostavka radiološke zaštite da rizik od stohastičkih učinaka raste u rasponu niskih doza linearno s dozom, bez praga (LNT model) [20].

Težinska doza zračenja (Ekvivalentna doza), H_T jest suma svih srednjih apsorbiranih doza koje potječu od zračenja R u organu ili tkivu T pomnožena s težinskim faktorima zračenja, w_R :

$$H_T = \sum_R w_R \cdot D_{T,R}$$

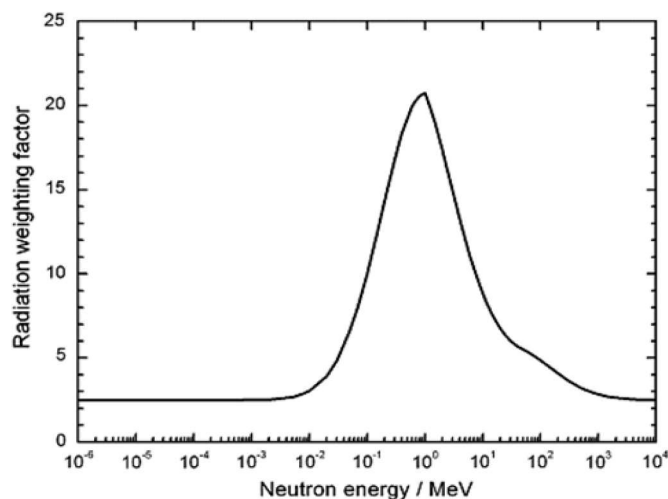
SI jedinica za ekvivalentnu dozu također je J/kg, ali ima poseban naziv: Sivert (Sv). Bezdimenzijska veličina w_R govori o tome koje će vrste zračenja imati veći RBE, relativni

biološki učinak specifičnih vrsta zračenja, a koje manji. Vrijednosti w_R odabrane su uglavnom na temelju eksperimentalnih podataka o RBE-u različitih vrsta zračenja određenih za biološke krajnje točke povezane sa stohastičkim učincima (rak, nasljedni učinci). Vrijednosti RBE određuju se eksperimentalno i predstavljaju omjer doza ispitnog zračenja i referentnog zračenja niskog linearnog prijenosa energije (LET) koje proizvode istu razinu promatranog učinka. Njegove vrijednosti rastu do maksimuma (RBEM) sa smanjenjem doze zračenja. Što je veći RBE, veći je postotak preživljavanja stanica ljudskoga tkiva i neljudske biote [20] [25].

Različita tkiva izlagana su različitim vrstama zračenja kako bi se moglo zaključiti koja vrsta zračenja uzrokuje najveću štetu, a koja najmanju.

Tablica 3. Težinski faktori zračenja [14]

Vrste i energije zračenja	Težinski faktori zračenja, w_R
Fotoni svih energija	1
Elektroni i mioni svih energija	1
Protoni energije > 2 MeV	5
α -čestice, fisijski fragmenti, teške jezgre	20
Neutroni energije < 10 keV	5
Neutroni energije od 10 keV do 100 keV	10
Neutroni energije > 100 keV do 2 MeV	20
Neutroni energije > 2 MeV do 20 MeV	10
Neutroni energije > 20 MeV	5



Slika 6. Težinski faktor zračenja za neutrone u odnosu na energiju neutrona [20]

Vrijednost težinskog faktora za fotone ista je za X-zrake i gama zrake svih energija. Fotoni, elektroni i mioni jesu zračenja s LET vrijednostima manjim od 10 keV/ μm i pripadaju niskom LET-u. Njihov w_R iznosi 1, dok za alfa čestice on iznosi 20. Ljudi mogu biti izloženi alfa česticama iz inhaliranih potomaka radona ili progutanih alfa-emitirajućih radionuklida kao što su izotopi plutonija, radija, torija i uranija. Alfa čestice, teški ioni i neutroni energija od 100 keV do 2 MeV uzrokuju najveću štetu na tkivu jer su alfa čestice masivne čestice (imaju otprilike četiri puta veću masu od mase protona) i duboko prodiru kroz tkivo, a neutroni nemaju naboja, električki su neutralni. Za razliku od protona i elektrona, neutroni, budući da su nenabijene čestice, ne mogu uzrokovati ekscitaciju i ionizaciju interakcijom s orbitalnim elektronima pomoću električnog polja. Oni, međutim, mogu djelovati u interakciji s atomskim jezgrama, ponekad oslobađajući nabijene čestice ili nuklearne fragmente koji mogu izravno uzrokovati ekscitaciju i ionizaciju [21].

Efektivna doza zračenja

Ozračenje različitih organa ili tkiva u tijelu dat će različite vjerojatnosti za pojedine ozljede i različite stupnjeve štetnosti. Da bi se uvažila ta različitost učinka težinskih doza zračenja na pojedino tkivo uvode se težinski faktori tkiva (odražavaju relativni rizik od nastanka karcinoma ili pojave nekih nasljednih bolesti u prvoj generaciji nakon jednolike ozračenosti cijelog tijela).

Efektivna doza, E jest suma težinskih doza zračenja H_T u svim organima i tkivima T pomnožena s težinskim faktorima tkiva, w_T :

$$E = \sum_T w_T \cdot H_T = \sum_T w_T \cdot \sum_R w_R \cdot D_{T,R}$$

SI jedinica za efektivnu dozu jest Sivert (Sv). Suma svih težinskih faktora tkiva iznosi 1. Zbroj se izvodi za sve organe i tkiva ljudskoga tijela za koje se smatra da su osjetljivi na pojavu stohastičkih efekata. Težinski faktori tkiva navedeni su u Tablici 4. i predstavljaju srednje vrijednosti za referentnu osobu (nestvarnog čovjeka jer se razlikuju težinski faktori muškarca i žene) [20] [26].

Tablica 4. Težinski faktori tkiva [26]

Organ	Težinski faktori tkiva, w_T		
	ICRP 30, 1979.	ICRP 60, 1991.	ICRP 103, 2008.
Gonade	0,25	0,20	0,08
Koštana srž	0,12	0,12	0,12
Debelo crijevo		0,12	0,12
Pluća	0,12	0,12	0,12
Želudac		0,12	0,12
Mjehur		0,05	0,04
Grudi	0,15	0,05	0,12
Jetra		0,05	0,04
Jednjak		0,05	0,04
Štitnjača	0,03	0,05	0,04
Koža		0,01	0,01
Površina kostiju	0,03	0,01	0,01
Mozak			0,01
Ostatak	0,30	0,05	0,12

Na temelju preporučenih težinskih faktora tkiva iz 2008. godine možemo vidjeti da je najveća vrijednost 0,12 za grudi, mjehur, trbuh, pluća, debelo crijevo i koštanu srž. Hematopoetski organi (krvotvorni) i organi probavnog sustava najosjetljiviji su na zračenje jer se stanice brzo dijele i osjetljive su na zračenje, jednostavno su građene. Zbog toga lako mutiraju te dolazi do razvoja tumora pluća, jetre i leukemije.

Grafična doza za opću populaciju iznosi 1 mSv što znači da pojedini stanovnik ne smije godišnje primiti efektivnu dozu veću od 1 mSv. U slučaju nuklearne nesreće, čovjek ne smije unosom hrane primiti efektivnu dozu od 10 mSv godišnje [20] [26].

4. UČINCI IZLOŽENOSTI ZRAČENJA NA BILJKE I ŽIVOTINJE

Studije učinaka izloženosti ionizirajućem zračenju na biljke i životinje započele su nakon otkrića radioaktivnosti. Nakon prvih nuklearnih testiranja postojala je široka zabrinutost zbog utjecaja izloženosti okoliša kao i zanimanje za ponašanje radioaktivnih materijala u okolišu. Provedene su zbog toga brojne studije koje su proučavale biljne i životinjske vrste. Na populacijama su ispitivani atributi koji bi bili značajni na razini populacije: smrtnost (uključujući stohastički učinak somatske mutacije i njezinu moguću posljedicu za indukciju raka kao i determinističke učinke u određenim tkivima i organima), plodnost (smanjen reproduktivni uspjeh), morbiditet (uključujući učinke na imunološki sustav i posljedice oštećenja središnjeg živčanog sustava zbog izloženost zračenja embrija u razvoju) te izazivanje mutacija kako bi se moglo doći do podataka i zaključaka o izloženosti zračenju pri niskim brzinama doze [1].

4.1. Kopnene biljke

Oštećenje zračenjem u biljkama izražava se kao abnormalan oblik ili izgled, smanjen rast ili prinos, gubitak reproduktivne sposobnosti, venuće i smrt pri visokoj izloženosti. Akutne letalne doze (velike smrtonosne doze pri kojima se izlaže cijelo tijelo u kratkom vremenu) za više biljke kretale su se od 10 do 1000 Gy (približne srednje apsorbirane doze u prosjeku za cijelu biljku). Kod biljaka i životinja doza se izražava u Gy budući da nemamo težinske faktore tkiva za sve biljke i životinje. Biljke poput mahovina, lišajeva i jednostaničnih vrsta vrlo su otporne na izlaganje zračenju, dok su drvenaste biljke najosjetljivije. U 12 vrsta drvenastih biljaka koje su bile izlaganje 10-14 mjeseci, utvrđeno je da su letalne doze bile u rasponu od 8-96 Gy. Bor je bio najosjetljiviji jer je nakon kratkotrajnih apsorbiranih doza od 10 Gy doživio smrtnost. Rast je bio ozbiljno zaustavljen pri 50-60 % smrtonosne doze, zaustavljanje cvjetanja uočeno je pri 40-50 % smrtonosne doze, a neuspjeh u postavljanju sjemena pri 25-35 %. Održanje biljne populacije, dakle, može biti narušeno i pri akutnim dozama koje su niže od doza koje izazivaju smrt. Biljke su zadržale normalan izgled ispod 10% smrtonosne doze.

Biljne vrste također su se razlikovale po svojoj toleranciji na kroničnu izloženost zračenju (izlaganje malim dozama zračenja tijekom dužeg perioda). Za osjetljive vrste bora, brzine doze veće od 3 mGy/h tijekom 3-4 godine smanjile su rast iglica. Bijeli hrastovi koji su kronično izlagani gama zračenju, stabla su bila osjetljivija na zarazu lisnim ušima pri dozama većim od 4 mGy/h. S obzirom na učinke na najosjetljivije biljke kod kronične izloženosti pri brzinama

doza od 1-3 mGy/h i nekih specifičnih promjena zabilježenih pri brzinama doza od 0,4-2 mGy/h procijenjeno je da bi kronične brzine apsorbirane doze od ili ispod 400 μ Gy/h (10 mGy/d) trebale imati samo neznatne učinke na osjetljive biljke, ali je malo vjerojatno da će proizvesti bilo kakve značajne štetne učinke na širi raspon biljaka prisutnih u prirodnim biljnim zajednicama [1].

4.2. Koprnene životinje

Učinci na sisavce opsežno su proučavani u radiobiološkim pokusima na laboratorijskim životinjama (miševi, štakori, psi i majmuni) i domaćoj stoci (svinje, ovce, koze, magarci i goveda). Osim u slučaju izloženosti koja uključuje visoke doze, oštećenje zračenjem ili smrtnost kod sisavaca posljedica je poremećaja u hematopoetskom sustavu i probavnom sustavu jer su matične stanice najosjetljivije na radioaktivno zračenje. Znanstvenici su primijetili da su sve vrste pokazale postupno povećanje letalne doze, tj. tolerirane su veće ukupne doze, smanjenim brzinama doze zračenja s niskim LET-om. To je značilo da se stanice učinkovito popravljaju pri nižim brzinama doza. Primijećeno je da na temelju dostupnih podataka, kronične brzine doza ispod 400 μ Gy/h (10 mGy/d) ne bi ozbiljno utjecale na njihovu smrtnost od determinističkih i stohastičkih efekata. Proučavani su i učinci izloženosti zračenju na reprodukciju. Brzina doze od 420 Gy/h tijekom trudnoće (gestacije) prouzročila je smanjenje zametnih stanica u gonadama sisavaca. Najniža brzina doze pri kojoj je uočeno oštećenje iznosila je 10 μ Gy/h zbog tricija koji se nalazi u ženskom embriju šišmiša, dok se pri dozi od 420 μ Gy/h uočilo smanjenje mase neonatalnog mozga.

Akutne letalne doze za 50% jedinki malih sisavaca u 30 dana iznosile su od 6-10 Gy te 1,5-2,5 Gy za veće životinje i domaću stoku. Mala je vjerojatnost da bi doze ispod 400 μ Gy/h povećale mortalitet u populaciji. Uočeno je da izloženost zračenju dovodi do povećanja steriliteta kod sisavaca. Tako je kod najosjetljivijeg proučavanog sisavca, psa bigla, brzina doze od 180 μ Gy/h uzrokovala sterilitet u roku od nekoliko mjeseci, ali brzina doze od 36 μ Gy/h tijekom cijelog života nije proizvela nikakvu štetu. Zaključeno je da brzina doze zračenja manja od 40 μ Gy/h za najizloženiju jedinku u populaciji vjerojatno neće imati utjecaj na reproduktivnu sposobnost, plodnost populacije sisavaca kao posljedicu učinka izloženosti. Pokazalo se da su učinci izloženosti zračenju na ptice slični onima na male sisavce. Gmazovi i beskralježnjaci bili su manje osjetljivi na izlaganje zračenju. Izloženost zračenju negativno i štetno utječe posebno na razvoj spolnih stanica kod odraslih beskralježnjaka, ali što se tiče smrtnosti kao posljedice izloženosti zračenju, možemo ju zanemariti [1].

4.3. Vodeni organizmi

Među vodenim organizmima, ribe su bile najosjetljivije na učinke izloženosti zračenju; posebno su osjetljivi riblji embriji u razvoju. LD_{50} (letalna doza za 50 % jedinki) za akutno zračenje morske ribe bio je u rasponu 10-25 Gy za razdoblja procjene do 60 dana nakon izlaganja, dok su za morske beskralješnjake (školjkaši, koralji, puževi, rakovi, glavonošci) letalne doze za akutno zračenje iznosile više od 100 Gy. Letalna doza za 50% embrija lososa u 60 dana iznosila je svega 0,16 Gy što znači da su vrlo osjetljivi na akutno izlaganje. Kronična izloženost dozama od 10-30 mGy/h nije imala utjecaja na smrtnost puževa, morskih kapica, školjkaša i plavih rakova, ali se pokazalo da je kronično izlaganje pri brzinama doza u rasponu od 3,2 do 17 mGy/h smanjilo reproduktivnu sposobnost slatkovodnog puža. Brzina doze od 1 mGy/h nema nikakav efekt na reprodukciju riba, a kronično ozračivanje pri brzini doze od 0,4 mGy/h nema značajniji štetni utjecaj na populaciju [1].

4.4. Učinci izloženosti zračenju na biotu nakon nuklearne nesreće u Černobilu

Nakon nuklearne nesreće u Černobilu, stručna skupina Černobilskog foruma za okoliš (EGE) primijetila je da bi učinke Černobilske nesreće trebalo proučavati u određenim vremenskim razdobljima. Identificirane su tri različite faze izloženosti zračenju. U prvih 20 dana izloženost zračenju bila je akutna zbog velikih količina kratkoživućih radionuklida prisutnih u prolaznom oblaku (^{99}Mo , ^{133}Xe , ^{131}I). Većina tih visoko radioaktivnih nuklida taložila se na površine biljaka i tla, što je rezultiralo dozom gama zračenja do oko 20 Gy/d. Međutim, za površinska tkiva i male biološke mete (npr. zrele iglice i rastući pupoljci borova) došlo je do značajne dodatne brzine doze zbog beta zračenja iz taloženih radionuklida. Visoke doze štitnjače kraljevnjaka također su se dogodile tijekom prvih dana/tjedana nakon nesreće zbog udisanja i gutanja radioaktivnih izotopa joda ^{131}I i njihovih radioaktivnih potomaka [1].

Druga faza izloženosti zračenju protekla se kroz ljeto i jesen 1986. godine, tijekom kojeg su se vremena kratkoživućih radionuklida raspadali, a dugoživućih radionuklidi fizikalnim, kemijskim i biološkim procesima prenosili u različite komponente okoliša. Dominantni transportni procesi uključivali su prijenos radionuklida s biljnih površina na tlo izazvan kišom i bioakumulaciju kroz biljna tkiva. Brzine doza na površini tla pale su na mnogo manje od 10 % početnih vrijednosti zahvaljujući radioaktivnom raspadu kratkoživućih radionuklida, ali su se ukupne štetne doze i dalje akumulirale. Otprilike 80 % ukupne doze zračenja koju su akumulirale biljke i životinje primljeno je unutar 3 mjeseca od nesreće, a više od 95 % toga bilo je zbog izloženosti beta zračenju [1].

Tijekom treće (kontinuirane) faze izloženosti zračenju dolazi do raspadanja kratkotrajnih radionuklida i migracije velikog dijela preostalog radionuklida ^{137}Cs .

BILJKE

Taloženje beta-emitirajućih radionuklida na kritična biljna tkiva dovelo je do toga da su primila značajno veću dozu nego životinje koje žive u istom okolišu. Do kolovoza 1986. počeli su nicati usjevi koji su bili posijani prije nesreće. Uočeni su problemi s rastom i razvojem biljaka u poljima s gustoćom taloženja od 0,1-2,6 GBq/m² ukupne beta aktivnosti, a procijenjene brzine apsorbirane doze koje su biljke početno primile dosegnule su 300 mGy/d. Uočene su točkaste nekroze (odumiranje) na lišću, osušeni vrhovi lišća, zaustavljanje fotosinteze, transpiracije. Četinari su već bili poznati kao među radioosjetljivijim biljkama, a borove šume, 1,5-2 km zapadno od černobilske nuklearne elektrane, primile su dovoljne doze, više od 80 Gy, pri dozama koje su prelazile 20 Gy/d te su uzrokovale smrtnost. Prvi znakovi radijacijske ozljede bili su žutilo i odumiranje iglica na borovima u neposrednoj blizini nuklearne elektrane [1].

DOMAĆE ŽIVOTINJE

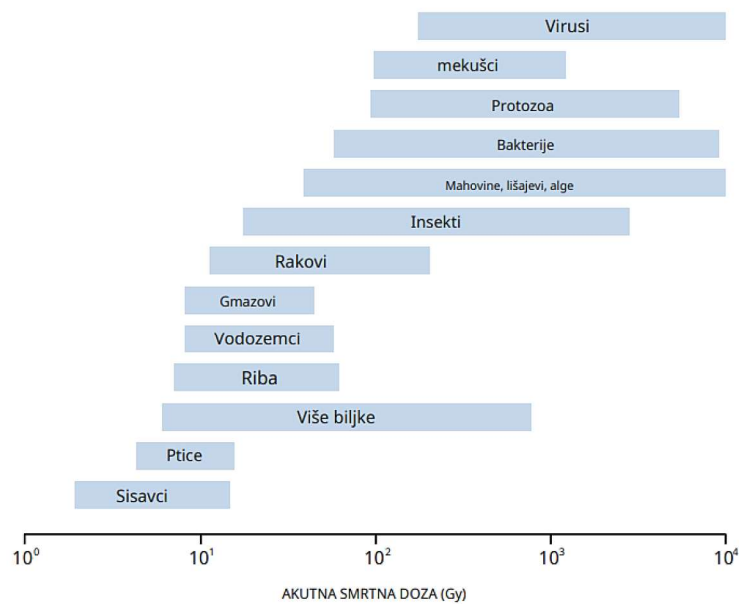
Preživači, kako domaći (goveda, koze i ovce), tako i divlji (losovi i jeleni), uglavnom primaju relativno visoke doze u radioaktivno onečišćenim sredinama jer konzumiraju velike količine vegetacije, a u njihovim se tijelima nakupljaju mnogi radionuklidi. Primjerice, jedna krava dnevno pojede oko 75 kg svježe trave. U razdoblju nedugo nakon nesreće, domaća stoka u zoni od 30 km bila je izložena visokim razinama radioaktivnog joda ^{131}I i ^{133}I (s poluživotima od 8 dana odnosno 21 sat). To je rezultiralo značajnim unutarnjim i vanjskim dozama zbog izloženosti beta i gama zračenju. Doza od oko 76 Gy dovoljna je da uzrokuje oštećenje štitnjače. U uvjetima endemskog nedostatka stabilnog joda, prijenos radioaktivnog joda iz krvi u štitnjaču može biti 2-3 puta veći od normalnog. Koncentracija hormona štitnjače u krvi goveda bila je niža od fiziološke norme tijekom cijelog razdoblja laktacije. Oštećenje štitnjače zračenjem potvrđeno je histološkim studijama. U Ukrajini su primijećene životinje bez tkiva štitnjače [1].

Do jeseni 1986. neke su od tih životinja uginule, a one koje su preživjele imale su oslabljen imunološki sustav, sniženu tjelesnu temperaturu i kardiovaskularne poremećaje. Hipotireoza je trajala do 1989. i mogla je biti odgovorna za reproduktivne neuspjehe kod životinja koje su primile doze veće od 180 Gy. Potomci visoko izloženih krava imali su smanjenu težinu, smanjene dnevne priraste i znakove patuljastog rasta. Četiri mjeseca nakon nesreće, identificirano je pedesetak vrsta ptica, uključujući neke rijetke; sve su izgledale normalno u izgledu i ponašanju. Mrtve ptice nisu pronađene, a utvrđeno je da lastavice i kućni vrapci

proizvode potomstvo koje se također čini normalnim. Psi i kokoši pokazivali su znakove sindroma kronične radijacije (smanjena tjelesna masa; smanjene rezerve masti; povećana masa limfnih čvorova, jetre i slezene; prisutni hematomi u jetri i slezena i zadebljanje sluznice donjeg crijeva). U gnijezdima kokoši, kao ni u njihovim jajnicima, nisu pronađena jaja [1].

4.5. Akutne letalne doze za sve vrste organizama

Postoji širok raspon doza u kojem su organizmi bili osjetljivi na smrtonosne učinke izlaganja zračenju. Shematski prikaz ukupne osjetljivosti različitih vrsta organizama na široki raspon akutnih letalnih doza zračenja prikazan je na Slici 7.



Slika 7. Akutne letalne doze za sve organizme [1]

Sisavci su najosjetljiviji organizmi jer će akutno izlaganje od 2-30 Gy rezultirati njihovom smrću, dok su virusi najotporniji na kratkotrajno izlaganje visokim dozama ionizirajućeg zračenja. Uz viruse, bakterije, mahovine, lišajevi i alge također mogu preživjeti kratkotrajno izlaganje visokim dozama zračenja.

Povećanje otpornosti biljnih vrsta na zračenje najčešće je uzrokovano manjom veličinom kromosoma, normalnih centromera i malim brojem kromosoma u odnosu na druge vrste. Dugo intermitotsko vrijeme i spore stope mejoze povezani su s visokom radioosjetljivošću biljaka. Osim toga, osjetljivost biljaka na zračenje varira s vremenom zbog sezonskih procesa, npr. mirovanja ili početka rasta u proljeće [27]. Mekušci su razvili mehanizam obrane DNA od radioaktivnog zračenja koji se zove apoptoza, proces aktivacije genetski određenog programa za eliminaciju zahvaćenih stanica što se može uočiti u svim fazama staničnog ciklusa. Apoptoza

sprječava nakupljanje mutacija u generacijama stanica što se smatra prilagodbom na nepovoljne čimbenike [28]. Ključni čimbenici koji utječu na otpornost mikrobnih stanica na ionizirajuće zračenje jesu veličina organizma (što je manji genom organizma, to je otporniji na zračenje) i specifične biološke karakteristike (tj. pigmentacija, stanična stjenka) [29]. Kako bi se suprotstavili štetnim učincima uzrokovanim izlaganjem zračenju, organizmi otporni na zračenje (bakterije) koriste niz obrambenih sustava, kao što su promjene u koncentraciji unutarstaničnih kationa, izvrsni sustavi za popravak DNK te učinkoviti enzimski i neenzimski antioksidativni sustavi [30].

4.6. FASSET

Skupina koja radi na Okviru za procjenu utjecaja na okoliš (FASSET – engl. the Framework for Assessment of Environmental Impact), izvijestila je o širokom rasponu pitanja relevantnih za zaštitu neljudske biote od ionizirajućeg zračenja, uključujući dozimetrijske informacije i podatke o učincima zračenja na neljudsku biotu. Projekt FASSET razvio je bazu podataka (FASSET Radiation Effects Database - FRED) o učincima izloženosti zračenju na neljudsku biotu pod četiri široke kategorije učinaka:

- a) Morbiditet (uključujući stopu rasta, učinke na imunološki sustav i posljedice oštećenja središnjeg živčanog sustava zbog izloženosti zračenju embrija u razvoju)
- b) Smrtnost (uključujući stohastički učinak somatske mutacije i njezine moguće posljedice za indukciju raka, kao i determinističke učinke u određenim tkivima ili organima koji bi promijenili stopu smrtnosti ovisnu o dobi)
- c) Smanjeni reproduktivni uspjeh (uključujući plodnost i fekunditet)
- d) Mutacije (inducirane u zametnim i somatskim stanicama)

Morbiditet je nezdravo stanje pojedinca, gubitak funkcionalnih sposobnosti i općenito se očituje kao smanjena kondicija, dok smrtnost predstavlja određeni broj umrlih u populaciji.

Fekunditet predstavlja fiziološku plodnost, odnosno sposobnost sudjelovanja muške i ženske jedinice u reprodukciji potomaka za razliku od fertiliteta/plodnosti koja označuje ostvarenje te fiziološke plodnosti, stvaran broj rođenih potomaka. Učinci uočeni na sisavcima prikazani su u Tablici 5. Svaka od ovih tablica daje kratak opis učinka, odgovarajuću krajnju točku i brzinu doze koja rezultira učinkom [1].

Tablica 5. Učinci kroničnog zračenja na sisavce [1]

Brzina doze (μGy/h)	Vrsta	Zračenje	Opisani učinci	Krajnja točka
< 10 ²	miš štakor	gama	nisu opisani nikakvi štetni učinci	morbidityet, smrtnost, reprodukcija
(1-10) · 10 ²	pas	gama	skraćivanje života	smrtnost
	miš	gama	skraćivanje života	smrtnost
	miš	neutroni	skraćivanje života	smrtnost
	svinja	gama	prenatalno zračenje smanjilo je broj primitivnih matičnih zametnih stanica te težinu jajnika i testisa	reprodukcija
	štakor	gama	smanjenje broja A1 spermatogonija	reprodukcija
	miš	beta	zračenje od začeca do 14 dana starosti smanjilo je broj primarnih oocita	reprodukcija
	miš	gama	smanjenje prosječnog broja legla po ženki; veća smrtnost između rođenja i odbijanja od dojenja; smanjenje broja primarnih oocita, zračenje tijekom triju uzastopnih generacija povećalo je % sterilnih miševa i % ranih uginuća te smanjilo srednju veličinu legla, terenska studija: povećan % sterilnih parova; smanjena srednja vrijednost potomstva i odviknutih od dojke	reprodukcija
sob	gama	povećan broj kromosomskih aberacija	mutacija	
(1-5) · 10 ³	jarac	gama	skraćivanje života	smrtnost
	miš	gama	povećan omjer smrtnosti (učinak ovisio o korištenom soju miševa); smanjena srednja vrijednost nakon preživljavanja	smrtnost
	miš	neutroni	skraćivanje života	smrtnost

	jarac	gama	zmanjen broj živorodjenih po ženki u 3. generaciji i smanjena ukupna proizvodnja sperme	reprodukcija
	miš	gama	zračenje tijekom 2. tjedna nakon poroda, smanjila je plodnost i veličinu legla značenje tijekom 4-90 dana smanjilo je plodnost, broj zametnih stanica po jajniku i masu testisa	reprodukcija
	štakor	beta	prenatalno zračenje smanjilo je veličinu legla i povećalo postotak resorpcije	reprodukcija
	štakor	gama	smanjen broj spermatogonija i masa testisa, prenatalno zračenje smanjilo je broj jajnih stanica i spermija	reprodukcija
	miš	gama	povećana učestalost mutacija na 7 specifičnih mjesta u spermatogoniju	mutacija
$(5-10) \cdot 10^3$	ovca	beta	smanjenje broja leukocita u perifernoj krvi	morbiditet
	štakor	gama	smanjena težina mozga i volumen cinguluma	morbiditet
	miš	gama	skraćenje života nakon izlaganja od 68 dana ili dulje, povećana stopa mutacije očinskog proširenog jednostavnog tandemskog ponavljanja (ESTR) i očeve mutacije po pojasu potomka na lokusima MMS10 plus Ms6-hm plus Hm-2	smrtnost mutacija
$> 10^4$	pas	beta	smanjeno preživljavanje	smrtnost
	miš	gama	povećani omjer smrtnosti (ovisno o soju)	smrtnost
	štakor	gama	prenatalno zračenje smanjilo je duljinu i težinu embrija te povećalo postotak smrtnosti, smanjenje mase jajnika i testisa	reprodukcija

5. Mjerenje radionuklida na području Brodsko – posavske županije

5.1. Osnovni podaci o županiji

U južnom dijelu Slavonske nizine, na prostoru između planina Psunj, Požeškog i Diljskog gorja sa sjevera i rijeke Save s juga, koja je ujedno i državna granica prema Bosni i Hercegovini u dužini od 163 km nalazi se Brodsko – posavska županija. Unutar Republike Hrvatske graniči na zapadu sa Sisačko-moslavačkom županijom, na sjeveru s Požeško-slavonskom, na sjeveroistoku s Osječko-baranjskom i na istoku s Vukovarsko-srijemskom županijom. U sastavu Brodsko-posavske županije nalazi se 28 jedinica lokalne samouprave i to 2 grada (Slavonski Brod i Nova Gradiška) i 26 općina (Bebrina, Brodski Stupnik, Bukovlje, Cernik, Davor, Donji Andrijevc, Dragalić, Garčin, Gornja Vrba, Gornji Bogičevci, Gundinci, Klakar, Nova Kapela, Okučani, Oprisavci, Oriovac, Podcrkavlje, Rešetari, Sibinj, Sikirevci, Slavonski Šamac, Stara Gradiška, Staro Petrovo Selo, Velika Kopanica, Vrbje, Vrpolje) s ukupno 184 naselja [31].



Slika 8. Općine Brodsko – posavske županije [32]

Možemo ju podijeliti u tri reljefne cjeline: brdsku, ravničarsku i nizinsku.

Poljoprivredne površine u Županiji obuhvaćaju oko 58 %, a obradive površine oko 51 % ukupnog područja Županije. U strukturi ukupnih površina Županije najviše su zastupljene oranice s udjelom 41,8 %. Poljoprivredno zemljište ima slijedeću strukturu: oranice imaju udjel 72 %, voćnjaci 2,5 %, vinogradi 1,2 %, livade 11,6 %, pašnjaci 10,8 % i ribnjaci 1,5 %. Šume i šumsko zemljište zauzimaju površinu od 59.831,64 ha. Od toga je površina pod šumama (obrasla šumska površina) na 56 669,07 ha, 1202,57 ha su proizvodne čistine, a 1892,33 ha je neplodno (neproizvodno) šumsko zemljište (vode, močvare, putovi, kamenolomi itd.) [31].

U strukturi zasijanih površina najveći dio čine žitarice (65 %), industrijsko bilje (12,7 %), krmno bilje (11,6 %) te povrće (10,7 %). Osobito vrijedna obradiva tla na kojima se odvija poljoprivredna proizvodnja, razmještena su prostorom cijele županije. Uz ratarstvo, stočarska

proizvodnja zauzima važno mjesto u strukturi dohotka gospodarstva županije. Unutar stočarske proizvodnje najvažnije mjesto zauzima govedarska proizvodnja iza čega slijede svinjogojska i peradarska proizvodnja [31] [33].

5.2. Materijali i metode mjerenja

Uzorak tla uzorkovan je na 8 lokacija dobiven je iz 10 slučajnih uzoraka pomoću cilindrične jezgre (promjera 10 cm) za prikupljanje najvišeg sloja zemlje debljine 10 cm. Uzorak je zatim ostavljen da se suši na sobnoj temperaturi nekoliko dana, zatim usitnjen, prosijan na veličinu čestica od 2 mm (kako bi se uklonile nečistoće poput kamenja, korijenja i trave), ponovno osušen na 105 °C do konstantne mase. Zatim je homogeniziran, zatvoren u plastičnu posudu (100 ili 200 ml) i ostavljen da odstoji najmanje 30 dana, kako bi se postigla sekularna ravnoteža unutar lanaca raspada uranija i torija. Budući da je tlo obično vlažno, izmjerene vrijednosti koncentracija aktivnosti (c) mogu varirati ovisno o sadržaju vode u uzorku. Sušenje uzorka tla iznad 100 °C najlakši je način potpunog uklanjanja vode iz uzorka. Uzorci tla korišteni su za spektrometriju gama zraka. Koncentracije aktivnosti najvažnijih prirodnih (^{40}K , ^{232}Th , ^{238}U , ^{235}U , ^{226}Ra , ^{222}Rn , ^{210}Pb) i antropogenih (^{137}Cs) radionuklida mjerene su korištenjem gama spektrometra visoke rezolucije, High-Purity Germanium (HPGe) Coaxial Photon Detector System detektorom ORTEC (rezolucija 2,24 keV na 1,33 MeV ^{60}Co i relativna učinkovitost od 74,2% pri 1,33 MeV ^{60}Co .) Detektorski sustav mjeri gama zrake u energetsom rasponu od 40 do 2000 keV, koji pokriva emisije gama zraka proučavanih radionuklida. Kalibracije energije i učinkovitosti provedene su korištenjem certificiranih izvora kalibracije dobivenih od Češkog mjeriteljskog instituta. Vrijeme mjerenja iznosilo je 80 000 s ili dulje, ovisno o aktivnosti uzorka, a spektri su analizirani softverom ORTEC Gamma Vision [3] [4].

Vrijednosti koncentracije aktivnosti u tlu (c) istraživanih radionuklida određeni su kako slijedi. ^{40}K , ^{210}Pb i ^{137}Cs korištene su njihove gama emisije na 1460.75, 661.62 keV, odnosno 46.52 keV. Koncentracije aktivnosti ^{232}Th , ^{238}U , ^{235}U , ^{226}Ra određene su pod pretpostavkom sekularne ravnoteže s prvim potomkom koji emitira gama zračenje. Stoga je koncentracija za ^{232}Th određena iz emisije ^{228}Ac na 338.40, 911.07 i 968.90 keV. Koncentracija ^{238}U određena je iz emisije ^{234}Th na 63.29, 92.38 i 92.80 keV, a ^{226}Ra iz emisije ^{214}Pb na 295.22 i 351.99 keV [3].

Koncentracije plina radona ^{222}Rn u tlu (c_{Rn}) na području Brodsko-posavske županije mjerene su 2015. i 2016. godine mjernim sustavom RM-2 proizvođača Radon v.o.s, Češka. Radon

detektor RM-2 sastoji se od skupa od petnaest ionizacijskih komora IK-250, čitača ERM-3 i seta za uzorkovanje tla (sonde i šprice). Uzorci plina iz tla uzeti su s dubine od 80 cm ispod površine tla pomoću sonde za tlo i šprice od 150 ml. Prikupljeni uzorci tada su stavljeni u ionizacijske komore, a mjerenja su obavljena 15 minuta nakon uzorkovanja plina kako bi se raspao toron te prema protokolu i tri sata nakon uzorkovanja. Alfa zračenje radona u uzorku tla inducira ionizacijsku struju u ionizacijskoj komori, koja se mjeri 120 s. Ionizacijska komora sastoji se od pozitivne elektrode i stjenke komore između kojih se nalazi električno polje (razlika potencijala). Kada ionizirane α čestice visokih energija prođu kroz stjenku komore, one predaju veliku količinu energije neutralnim česticama plina (čestice plina apsorbiraju zračenje). Nastaju ionizacijski parovi: elektroni i pozitivni ioni koji se prikupljaju i kao signal pojačavaju. Unaprijed programirani, potpuno automatski čitač ERM-3, s instaliranom kalibracijskom konstantom, prikazuje koncentraciju radona u kBq/m^3 [4] [34] [35].



Slika 9. RM-2 detektor radona [34]

Uzorkovanje uzoraka plina u tlu općenito se provodilo na istoj sondi za tlo neposredno nakon mjerenja propusnosti tla obavljenih uređajem Radon-JOK također proizvođača Radon v.o.s. Zapravo, propusnost tla (k) izračunata je iz Darcyjevog zakona prema mjerenju vremena potrebnog za povlačenje određene količine zraka iz tla pomoću negativnog tlaka utvrđenog Radon-JOK mjernim uređajem. Za mjesta s vrlo visokom ili vrlo niskom propusnošću, vremena za izvlačenje zraka mogu biti ili prekratka (ispod 6 s) ili preduga (više od sata). U tim slučajevima, granice vrijednosti propusnosti tla od $1,8 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2$ i $5,2 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$ uzete su prema preporuci proizvođača [4]. Mjerenja koncentracije aktivnosti radona i propusnosti tla obavljena su na 13 mjesta u Brodsko-posavskoj županiji, uglavnom u blizini škola i vrtića.

Geogeni radonski potencijal (GRP) bitan je parametar koji opisuje tlo kao glavni izvor koncentracije radona u zatvorenom prostoru neovisno o građevinskim značajkama zgrada (vrsti

gradnje, stanju i starosti postojećih kuća), klimi, meteorološkim parametrima i životnim navikama ljudi. Istraživanje i evaluacija GRP-a temelji se na terenskim mjerenjima koncentracije radona u tlu i propusnosti tla. Takav je pristup preporučljiv ako nisu dostupne informacije o koncentracijama radona u zatvorenom prostoru, a geološki uvjeti prilično nehomogeni u velikim dijelovima zemlje [4] [36]. Propusnost tla važan je čimbenik u određivanju GRP-a jer veća propusnost omogućuje povećanu migraciju radona iz tla u kuće. Na primjer, u njemačkoj studiji slučaja 1988.-1989. otkriveno je da visoke razine radona u tlu uzrokuju visoke koncentracije u zatvorenom prostoru ako postoje laki putevi u kuće kroz pukotine zidova, vodu i slično [37]. Izloženost radonu u zatvorenim prostorima izaziva zabrinutost zbog njegovog utjecaja na zdravlje, odnosno njegove poznate veze s rakom pluća. Neka su istraživanja pokazala da se čak i u situacijama kada su koncentracije radona u zatvorenim prostorima niže, može pronaći tendencija, iako manja, za pojavu negativnih utjecaja na učestalost pojave raka pluća [38]. GRP koristi se kao mjera geogenog hazarda „onog što Zemlja isporučuje“ u smislu radona. Iako postoji nekoliko vrlo različitih definicija i značenja GRP-a u literaturi, koristimo češki pristup, parametar „Neznalov“ GRP koji je razvijen iz radonskog indeksa gradilišta (RI). Taj GRP definiran je na sljedeći način:

$$GRP = \frac{c}{-\log_{10} k-10}, \quad (1)$$

gdje je c koncentracija aktivnosti radona u tlu (kBq/m^3), a k propusnost tla (m^2). U Češkoj se koriste tri klase GRP-a i one su u korelaciji s radonskim indeksom: nizak ($GRP < 10$), srednji ($10 \leq GRP < 35$) i visok ($35 \leq GRP$) kao što je prikazano u Tablici 6. [4].

Tablica 6. Potklasifikacija geogenog radonskog potencijala [5]

GRP – češki pristup	Klasa	Radonski indeks	GRP – „hrvatska“ podjela	Klasa	Opis
GRP < 10	1	Nizak	GRP < 5	1	Vrlo nizak
			$5 \leq GRP < 10$	2	Nizak
$10 \leq GRP < 35$	2	Srednji	$10 \leq GRP < 22.5$	3	Srednji niži
			$22.5 \leq GRP < 35$	4	Srednji viši
GRP ≥ 35	3	Visok	$35 \leq GRP < 60$	5	Visok
			$60 \leq GRP < 125$	6	Vrlo visok
			GRP ≥ 125	7	Izuzetno visok

Ova definicija i uporaba GRP-a u bliskoj je vezi s konceptom i definicijom područja sklonih radonu prema postojećoj Direktivi o osnovnim sigurnosnim standardima 2013/59/ EURATOM. Prema ovom dokumentu, škole i vrtići su radna mjesta od posebnog značaja, budući da mnogi ljudi (osobito djeca) tijekom svog života provode puno vremena u tim objektima. Potklasifikacija GRP-ova uvedena je i opravdana zbog raznolike geološke građe kao i klimatskih uvjeta u Hrvatskoj. Škole i vrtići u mnogim ruralnim sredinama u Hrvatskoj smješteni su u zgradama koje su građene na isti način kao i kuće u kojima živi okolno stanovništvo. Ovi objekti nalaze se u neposrednoj blizini ostalih stambenih objekata u naseljima i kao takvi smješteni su iznad tla koje je primarni izvor radona i u zatvorenim prostorima. Zbog lošeg održavanja koncentracije radona u zatvorenim prostorima obično su veće nego u okolnim stanovima. Istodobna mjerenja u objema vrstama zgrada (stanovi, škole i vrtići) mogu dovesti do uspostavljanja funkcionalnog odnosa između koncentracija aktivnosti radona u zatvorenim prostorima u tim objektima. Škole i vrtići mogli bi predstavljati pravi model procjene godišnje izloženosti stanovništva radonu unutar nekog područja [4] [5].

5.3. Rezultati određivanja koncentracija aktivnosti radionuklida na tlu Brodsko – posavske županije i rasprava

U uzorcima tla u mjestima Adžamovci, Trnakovac, Davor, Rešetari, Šagovina Cernička, Podvrško, Kapela Batrina i Vrpolje mjerene su koncentracije aktivnosti najvažnijih prirodnih (^{40}K , ^{232}Th , ^{238}U , ^{235}U , ^{226}Ra , ^{210}Pb) i antropogenih (^{137}Cs) radionuklida.



Slika 10. Karta lokacija mjesta uzorkovanja (izrađena u ArcGIS)⁵

Redni broj lokacije na karti odgovara nazivima lokacija iz Tablice 17. Alat ArcGIS omogućava predikciju na podatke koje upisujemo. U alat se unose koncentracije aktivnosti najvažnijih prirodnih i antropogenih radionuklida te se upisuju geografske koordinate lokacija na kojima

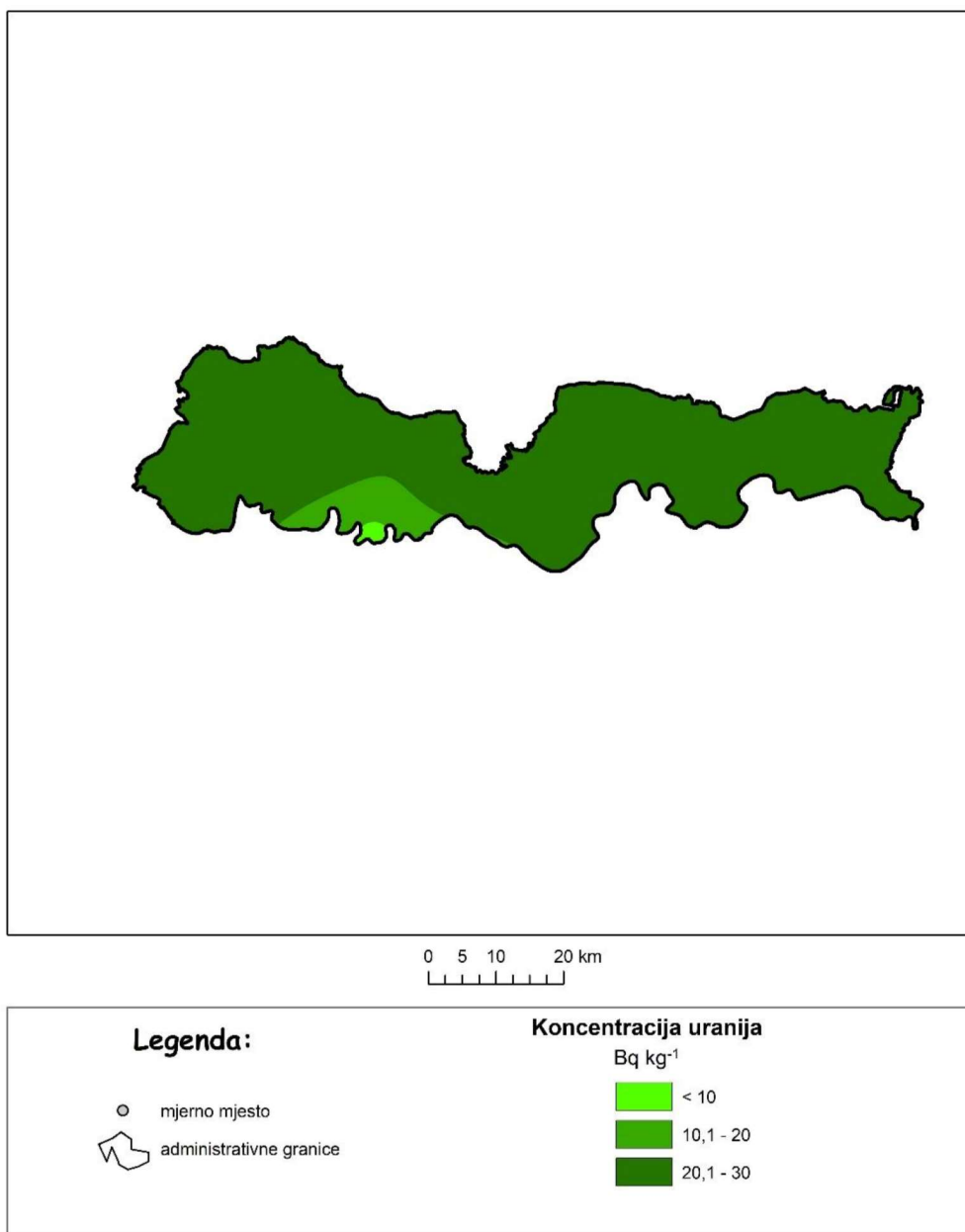
⁵ Izradio predavač Igor Miklavčić

se uzorkovalo. Program pomoću geostatističkih metoda radi predviđanje koncentracija aktivnosti za one lokacije na kojima se nisu izvršila mjerenja i na temelju njih crta kartu. Što imamo više izmjerenih koncentracija aktivnosti, predviđanja su preciznija. Metoda koju smo koristili zove se IDW (Inverse Distance Weighting), prevedeno na hrvatski interpolacija ponderiranja obrnute udaljenosti. Ova metoda koristi mjerene vrijednosti oko točke predikcije kako bi predvidjeli promatranu vrijednost na lokaciji na kojoj nije izvršeno mjerenje. Metoda se temelji na pretpostavci da su bliže točke međusobno sličnije od udaljenijih. Interpolirane točke procjenjuju se na temelju njihove udaljenosti od poznatih vrijednosti ćelije. Točke koje su bliže poznatim vrijednostima bit će pod većim utjecajem od točaka koje su dalje [39]. Da bi se odredile nepoznate koncentracije, program računa prema sljedećoj formuli:

$$c_{nep} = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{c_i}{d_i^p} \right)}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{d_i^p} \right)}$$

gdje je c_{nep} nepoznata koncentracija koju program predviđa, c_i su poznate izmjerene vrijednosti, a d_i^p su poznate udaljenosti od svake poznate koncentracije aktivnosti čiju lokaciju znamo do lokacije za koju program procjenjuje koncentraciju aktivnosti.

Zemljovid koncentracije ^{238}U u tlu
Brodsko - posavske županije
metodom IDW

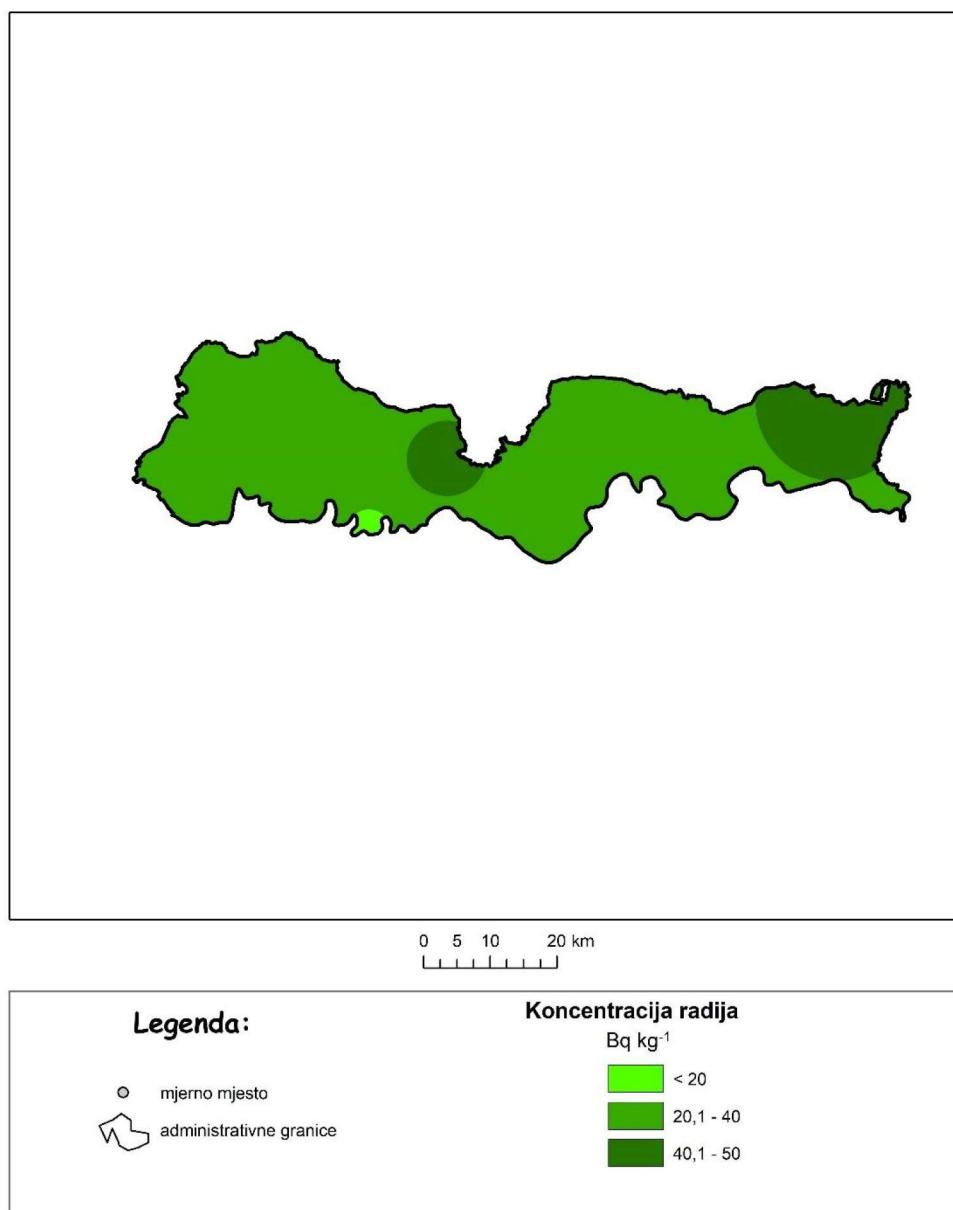


Odjel za fiziku Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, lipanj 2024.

Slika 11. Zemljovid koncentracije ^{238}U u tlu Brodsko-posavske županije metodom IDW ⁶

⁶ Izradio predavač Igor Miklavčić

Zemljovid koncentracije ^{226}Ra u tlu
Brodsko - posavske županije
metodom IDW

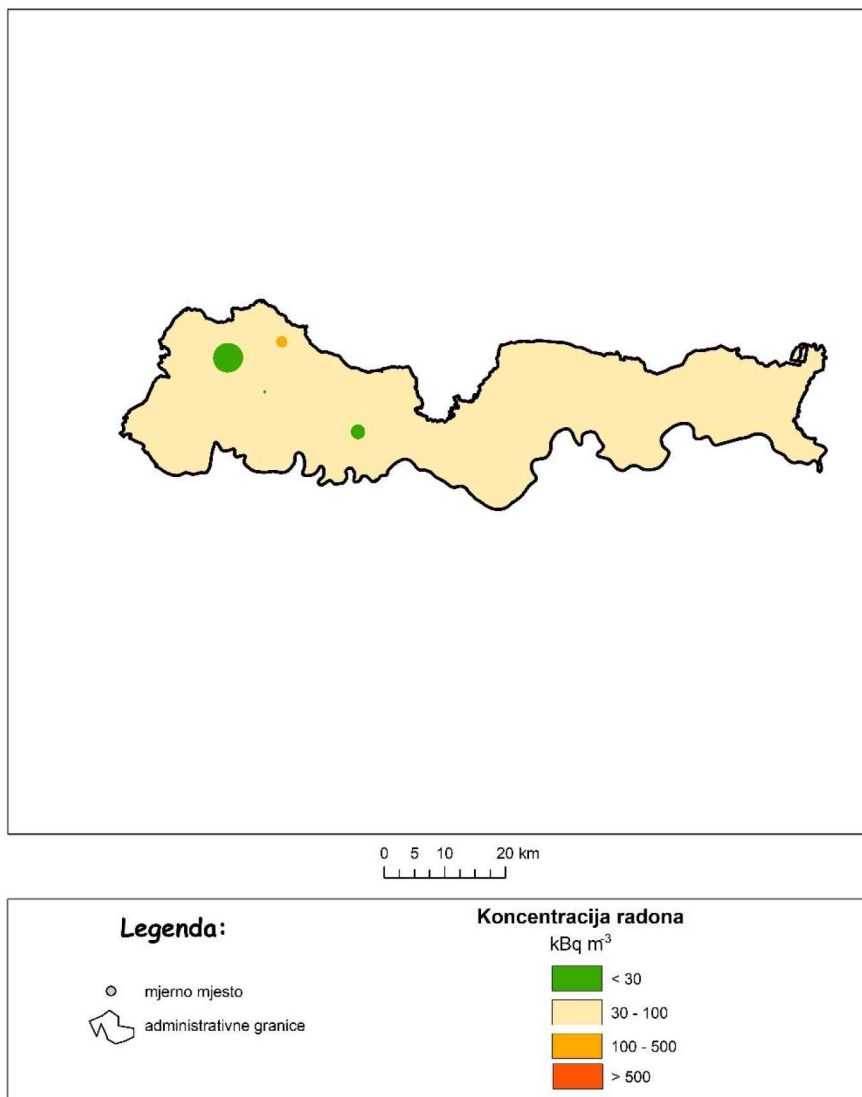


Odjel za fiziku Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, lipanj 2024.

Slika 12. Zemljovid koncentracije ^{226}Ra u tlu Brodsko-posavske županije metodom IDW ⁷

⁷ Izradio predavač Igor Miklavčić

Zemljovid koncentracije radona u tlu
Brodsko - posavske županije
metodom IDW

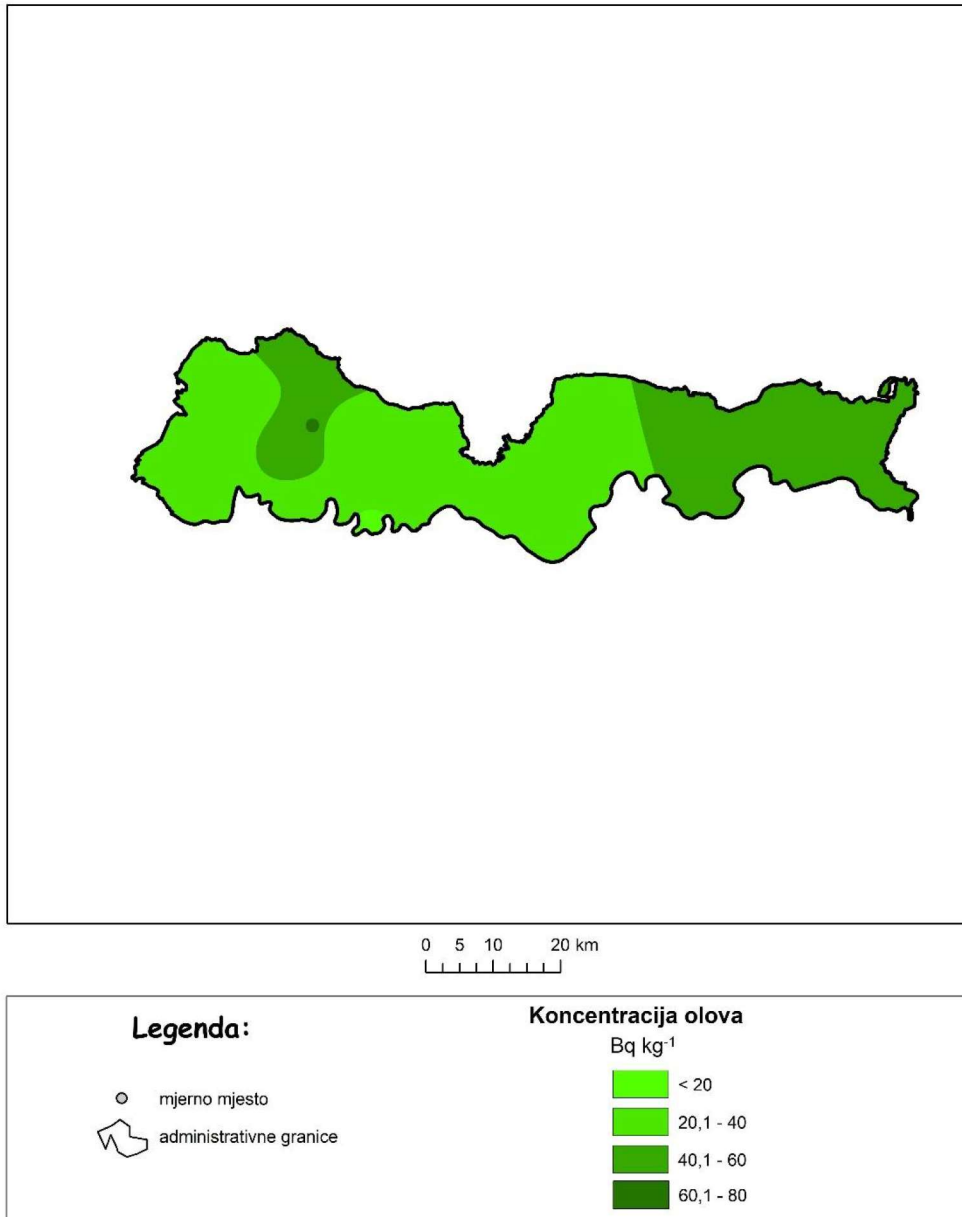


Odjel za fiziku Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, lipanj 2024.

Slika 13. Zemljovid koncentracije ^{222}Rn u tlu Brodsko-posavske županije metodom IDW ⁸

⁸ Izradio predavač Igor Miklavčić

Zemljovid koncentracije ^{210}Pb u tlu
Brodsko - posavske županije
metodom IDW

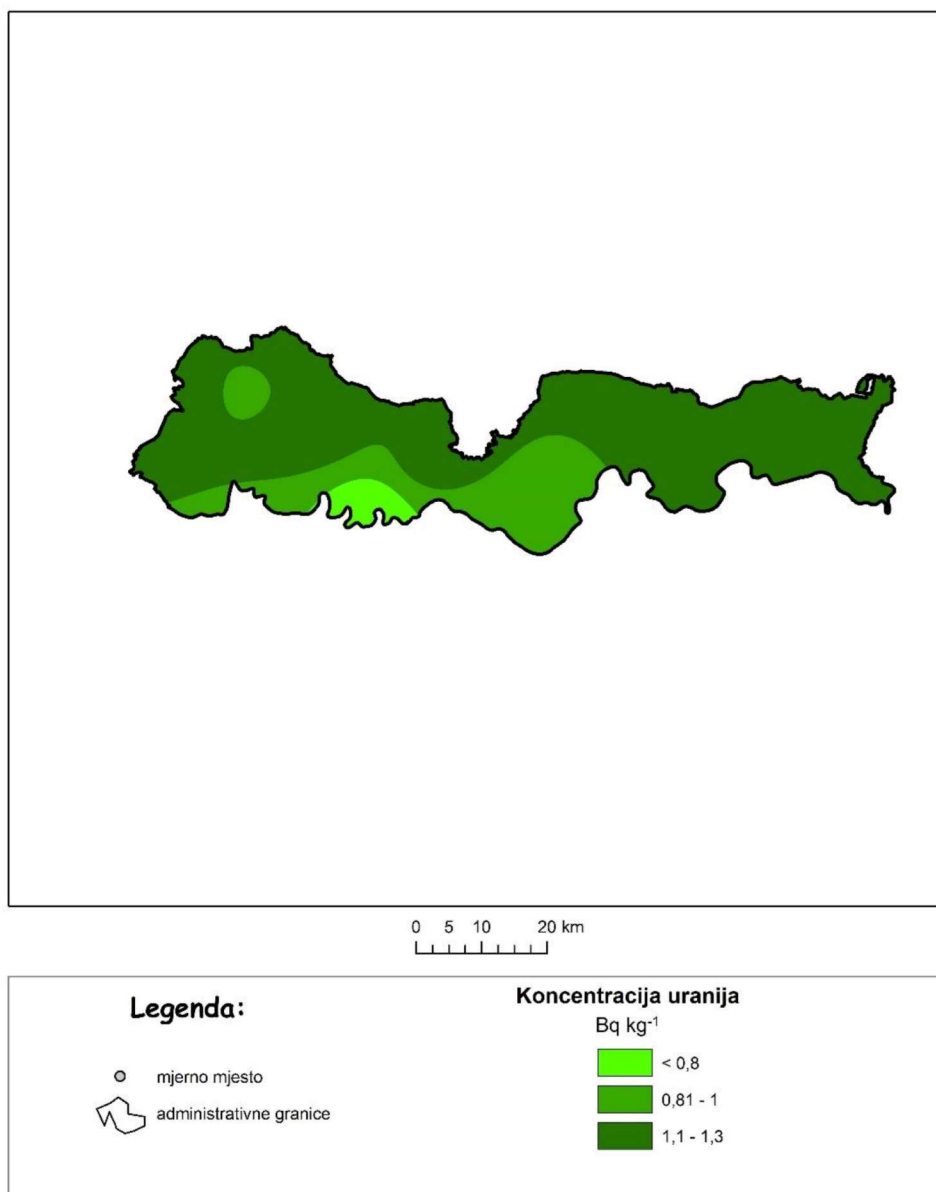


Odjel za fiziku Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, lipanj 2024.

Slika 14. Zemljovid koncentracije ^{210}Pb u tlu Brodsko-posavske županije metodom IDW ⁹

⁹ Izradio predavač Igor Miklavčić

Zemljovid koncentracije ^{235}U u tlu
Brodsko - posavske županije
metodom IDW

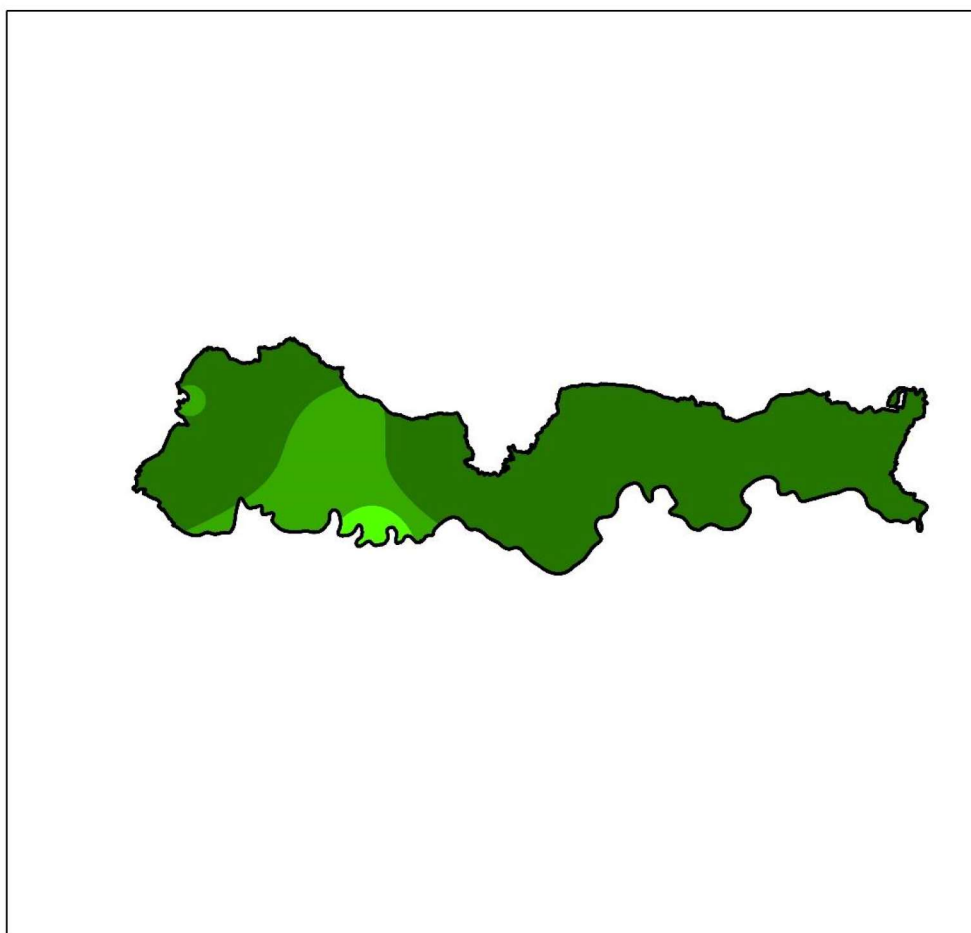


Odjel za fiziku Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, lipanj 2024.

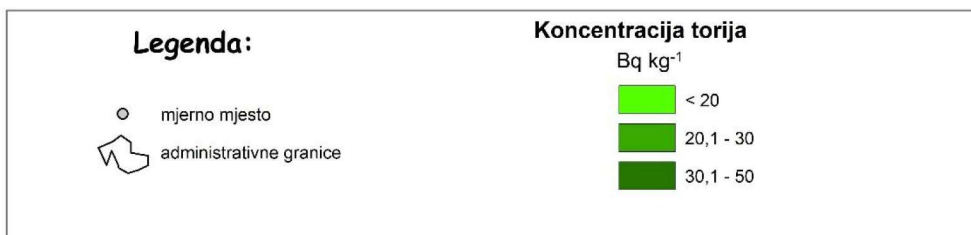
Slika 15. Zemljovid koncentracije ^{235}U u tlu Brodsko-posavske županije metodom IDW ¹⁰

¹⁰ Izradio predavač Igor Miklavčić

Zemljovid koncentracije ^{232}Th u tlu
Brodsko - posavske županije
metodom IDW



0 5 10 20 km
|-----|-----|-----|-----|

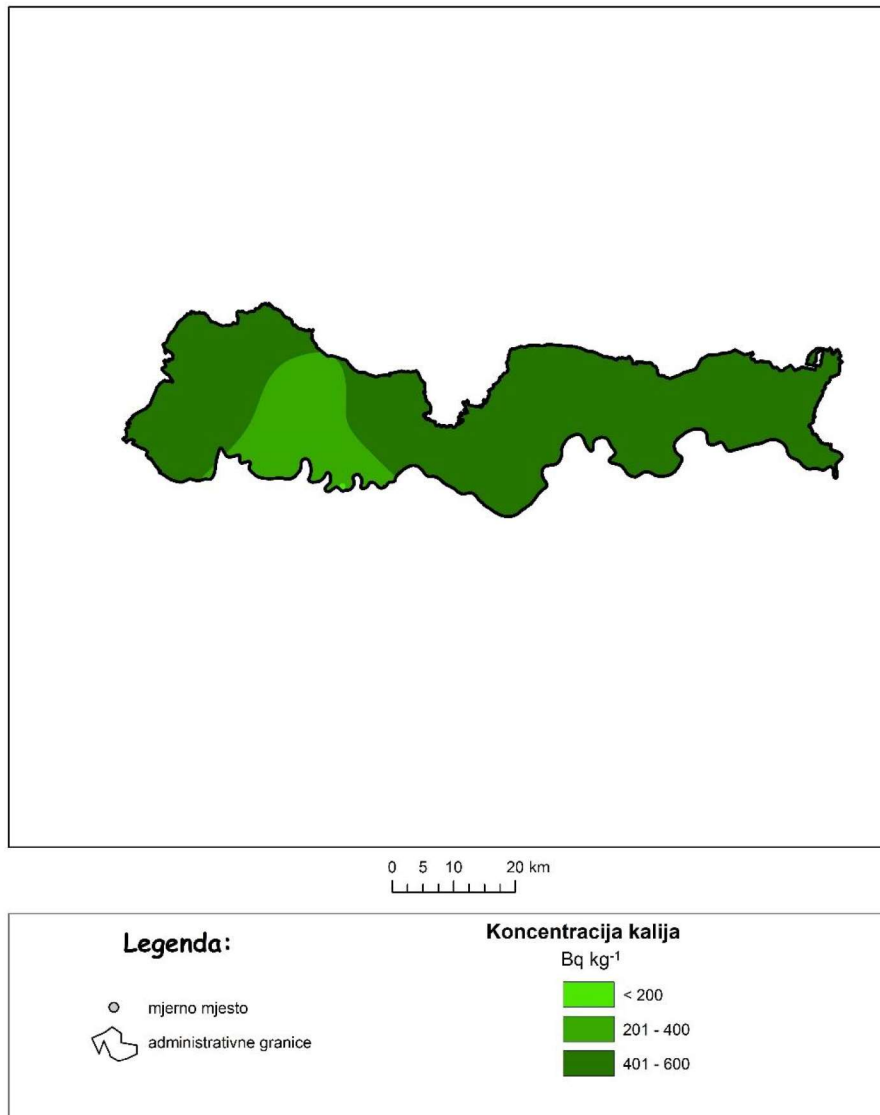


Odjel za fiziku Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, lipanj 2024.

Slika 16. Zemljovid koncentracije ^{232}Th u tlu Brodsko-posavske županije metodom IDW ¹¹

¹¹ Izradio predavač Igor Miklavčić

Zemljovid koncentracije ^{40}K u tlu
Brodsko - posavske županije
metodom IDW

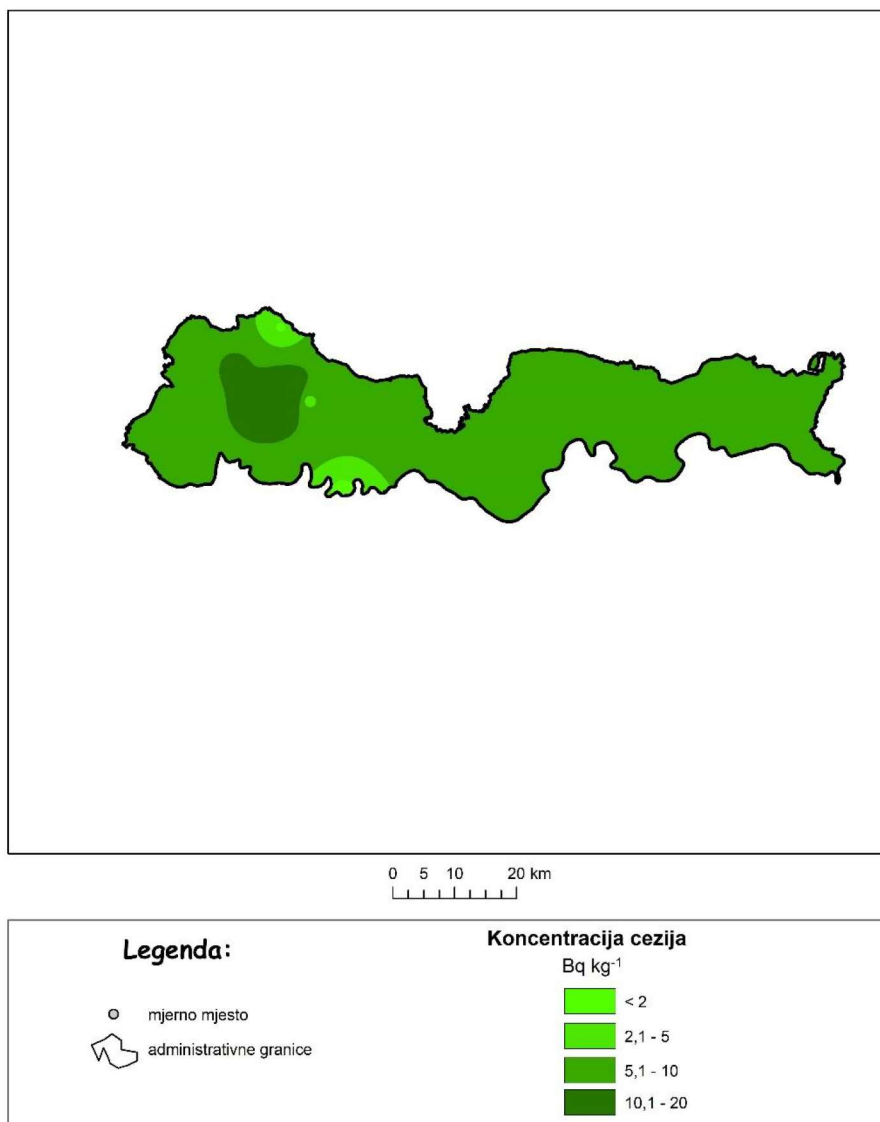


Odjel za fiziku Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, lipanj 2024.

Slika 17. Zemljovid koncentracije aktivnosti ^{40}K u tlu Brodsko-posavske županije metodom IDW ¹²

¹² Izradio predavač Igor Miklavčić

Zemljovid koncentracije ^{137}Cs u tlu
Brodsko - posavske županije
metodom IDW



Odjel za fiziku Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, lipanj 2024.

Slika 18. Zemljovid koncentracije aktivnosti ^{137}Cs u tlu Brodsko-posavske županije metodom IDW ¹³

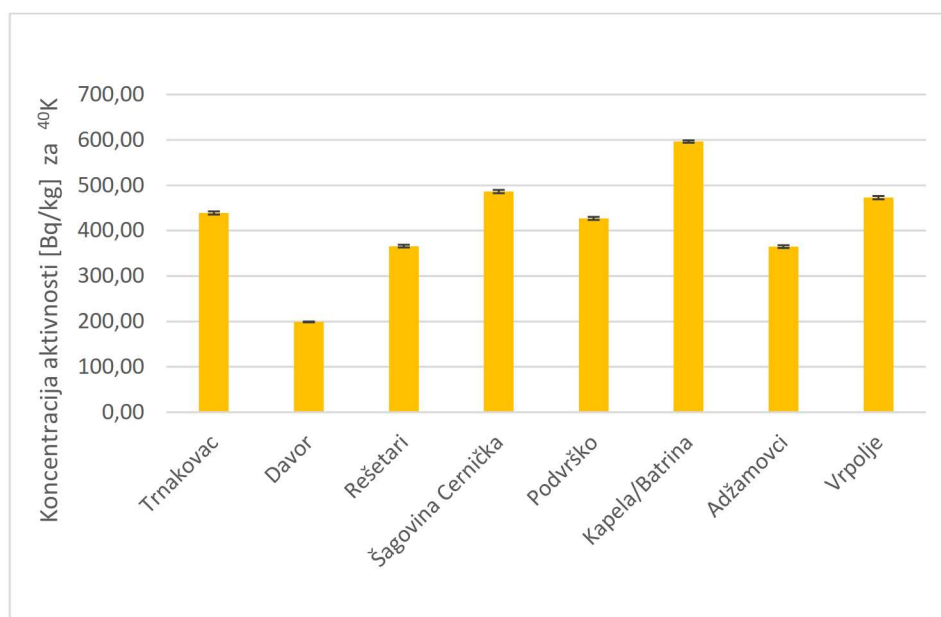
Iako je broj mjerenja mali ($N = 13$), željelo se vidjeti može li ArcGIS izračunati dosta dobru statističku vjerojatnost koncentracija radona i ostalih radionuklida u tlu na mjestima na kojima nisu mjerene koncentracije aktivnosti radionuklida na području Brodsko-posavske županije.

¹³ Izradio predavač Igor Miklavčić

Tablica 7. Izmjerene koncentracije aktivnosti prirodnih radionuklida (^{40}K , ^{210}Pb , ^{232}Th , ^{238}U , ^{235}U , ^{226}Ra) i antropogenog (^{137}Cs) u tlu na području Brodsko-posavske županije s pripadajućim izmjerenim pogreškama (2 standardne devijacije)¹⁴

	Trnakovac	Davor	Rešetari	Šagovina Cernička	Podvrško	Kapela/Batrina	Adžamovci	Vrpolje
Radionuklidi	Koncentracije aktivnosti u tlu [Bq/kg]							
^{40}K	438,99	198,97	365,97	486,21	427,07	596,36	364,90	472,83
^{137}Cs	8,45	1,57	19,68	10,54	1,86	7,31	3,89	6,84
^{232}Th	29,46	10,88	25,83	42,31	30,80	42,37	27,85	37,90
^{238}U	22,54	8,48	25,08	20,13	25,81	23,37	22,63	23,90
^{226}Ra	33,69	16,70	29,97	38,71	33,66	45,71	30,21	41,14
^{210}Pb	29,58	16,62	63,82	33,43	51,77	35,54	25,36	51,36
^{235}U	1,05	0,40	1,17	0,94	1,20	1,09	1,06	1,12

$2\sigma_{^{40}\text{K}}$ [Bq/kg]	3,45	0,96	2,99	3,62	3,35	2,63	3,01	3,65
$2\sigma_{^{232}\text{Th}}$ [Bq/kg]	0,68	0,20	0,57	0,79	0,74	0,49	0,61	0,88
$2\sigma_{^{226}\text{Ra}}$ [Bq/kg]	0,88	0,35	0,60	0,67	0,67	0,56	0,75	0,69
$2\sigma_{^{210}\text{Pb}}$ [Bq/kg]	5,83	1,25	7,01	3,67	7,02	2,61	3,63	5,96
$2\sigma_{^{235}\text{U}}$ [Bq/kg]	0,08	0,02	0,08	0,08	0,09	0,05	0,08	0,09
$2\sigma_{^{238}\text{U}}$ [Bq/kg]	1,72	0,41	1,70	1,64	1,86	1,11	1,67	1,89
$2\sigma_{^{137}\text{Cs}}$ [Bq/kg]	0,25	0,08	0,30	0,26	0,17	0,15	0,19	0,23

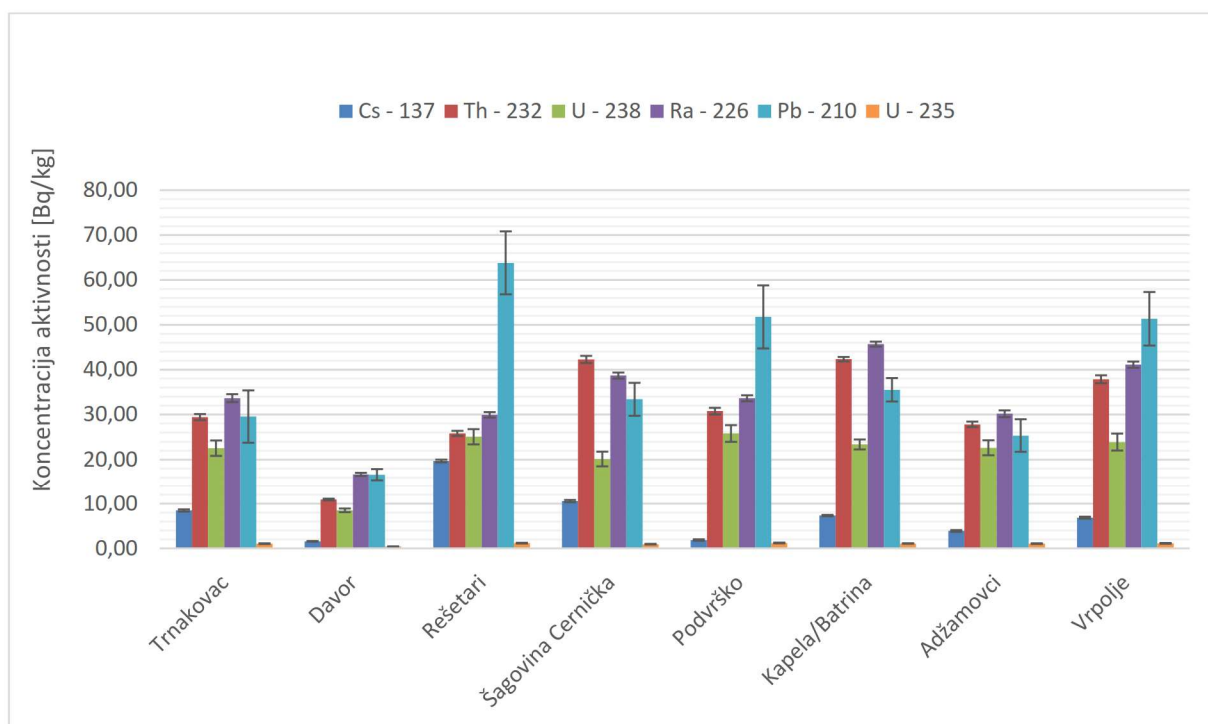


Slika 19. Koncentracije aktivnosti ^{40}K s pripadajućim pogreškama (2 standardnim devijacijama) za lokacije Trnakovac, Davor, Rešetari, Šagovina Cernička, Podvrško, Kapela/Batrina, Adžamovci i Vrpolje

Rezultati mjerenja koncentracija aktivnosti radionuklida slijede normalnu (Gaussovu) funkciju gustoće raspodjele vjerojatnosti. Širina Gaussove krivulje jest distribucija podataka. Za svaku lokaciju 10 puta mjerene su koncentracije aktivnosti najvažnijih radionuklida. Na temelju tih

¹⁴Prof.dr.sc. Branko Petrinec izmjerio koncentracije aktivnosti radionuklida na gama detektoru na Zavodu za zaštitu od zračenja Instituta za medicinska istraživanja i medicinu rada.

mjerenja izračunata je srednja vrijednost (očekivanje) koncentracija aktivnosti svakog pojedinog radionuklida (za svaku lokaciju), vrijednost koja je najbliža stvarnoj vrijednosti (ona se nikada ne može s točnom sigurnošću potvrditi i pogoditi). Standardna devijacija posljedica je širine distribucije podataka. Korištene su 2 standardne devijacije jer se s jako velikom sigurnošću od 96 % tvrdi da su prikupljena sva mjerenja, osim dvaju ekstrema za koje se pretpostavlja da su rezultat stohastičnosti mjerenja.



Slika 20. Koncentracije aktivnosti ^{137}Cs , ^{232}Th , ^{238}U , ^{226}Ra , ^{210}Pb i ^{235}U s pripadajućim pogreškama (2 standardnim devijacijama) za lokacije Trnakovac, Davor, Rešetari, Šagovina Cernička, Podvrško, Kapela/Batrina, Adžamovci i Vrpolje

Na temelju izmjerenih koncentracija u tlu na području Vrpolja, Kapela/Batrine, Podvrška, Šagovine Cernovačke, Rešetara, Davora, Trnakovca i Adžamovaca možemo zaključiti da su najveće koncentracije kalija ^{40}K u tlu u rasponu 199-596 Bq/kg, a najmanje za ^{235}U u rasponu 0,39-1,20 Bq/kg. Najveća koncentracija cezija izmjerena je u Rešetarima i iznosi oko 20 Bq/kg.

Budući da je ^{40}K biogeni element, njegova koncentracija u tlu ne predstavlja prijetnju živim organizmima, dok ^{137}Cs nasuprot tome, predstavlja ozbiljnu radioekološku prijetnju zbog unosa u hranidbene lance. Budući da su koncentracije ^{40}K veće od koncentracija ^{137}Cs , biljke nemaju tendenciju preuzeti element sličnih elektronskih struktura i kemijskih svojstava (^{137}Cs je sličan kaliju) [40].

Većina ^{137}Cs u Hrvatskoj posljedica je ispuštanja radionuklida nakon Černobilske nesreće 1986. godine. Također možemo zaključiti da su koncentracije kalija visoke u odnosu na radiološki cezij ^{137}Cs najvjerojatnije zbog gnojidbe poljoprivrednih i drugih obradivih površina dušikovim, fosforim, kalijevim (NPK) gnojivima i vapnom. Obrada tla također smanjuje unos radiocezija (i radiostroncija). Postupak može uključivati oranje, ponovnu sjetvu. Oranje razrjeđuje radioaktivni sadržaj u gornjim slojevima tla gdje većina korijena biljaka apsorbira svoje hranjive tvari [1] [40].

Gornje rezultate za koncentraciju aktivnosti u tlu možemo koristiti za procjenu radiološkog rizika uslijed vanjske izloženosti gama zračenju iz tla. Doprinos ^{137}Cs i ^{235}U možemo zanemariti zbog njihovih prilično niskih izmjerenih koncentracija aktivnosti kao što je i prikazano na Slici 15.

Usredotočit ćemo se stoga samo na prirodne radionuklide ^{40}K , ^{232}Th , ^{238}U . Za njih postoje dva parametra, koja su široko prihvaćena kao mjera radiološke opasnosti od vanjskog gama zračenja: radijev ekvivalent aktivnosti Ra_{eq} i indeks vanjske opasnosti H_{ex} koji se računaju prema sljedećim formulama:

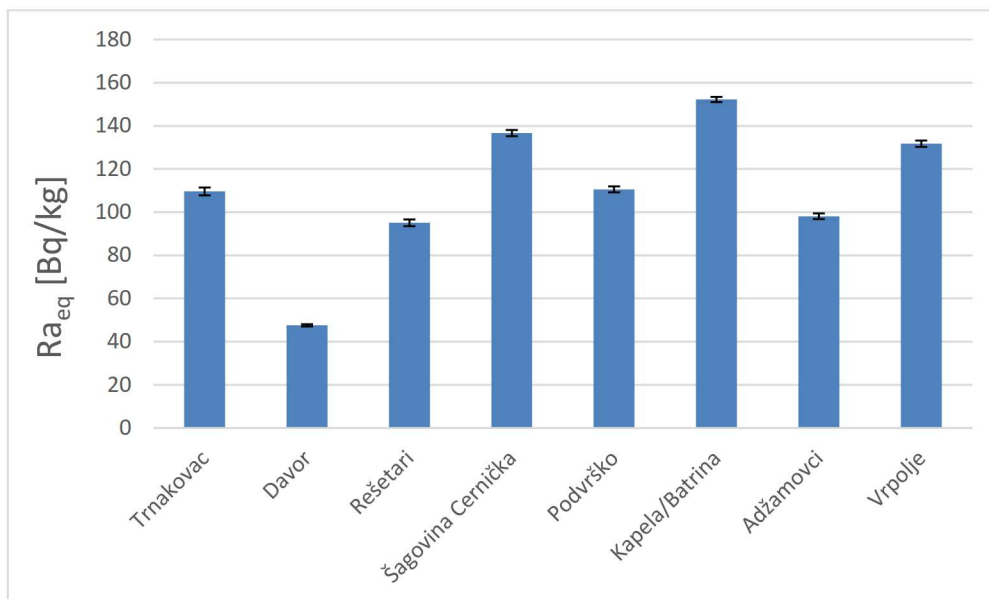
$$Ra_{eq} = c(^{226}\text{Ra}) + 1,43 \cdot c(^{232}\text{Th}) + 0,077 \cdot c(^{40}\text{K})$$

$$H_{ex} = \frac{c(^{226}\text{Ra})}{370} + \frac{c(^{232}\text{Th})}{259} + \frac{c(^{40}\text{K})}{4810}$$

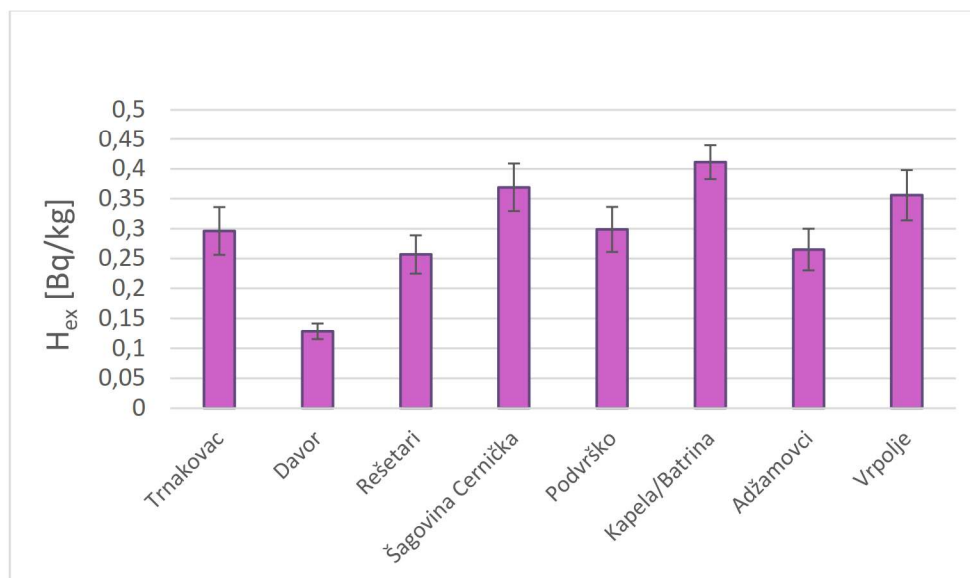
gdje je c koncentracija aktivnosti radionuklida u tlu dana u Bq/kg suhe mase. Radiološka opasnost zbog vanjske izloženosti gama zračenju smatra se niskom ako $Ra_{eq} < 370$ Bq/kg i $H_{ex} < 1$ Bq/kg [3].

Tablica 8. Izračunati Ra_{eq} i H_{ex} za svih 8 lokacija i izračunate pogreške (varijance)

	Trnakovac	Davor	Rešetari	Šagovina Cernička	Podvrško	Kapela/Batrina	Adžamovci	Vrpolje
Ra_{eq} [Bq/kg]	109,6205	47,5845	95,0887	136,6456633	110,581	152,2085754	98,137417	131,733
H_{ex} [Bq/kg]	0,296067	0,12852	0,25682	0,369048177	0,29866	0,411086972	0,2650529	0,35579
$Ra_{eq\sigma}$ [Bq/kg]	1,8124	0,5206	1,5512	1,4416	1,3871	1,2056	1,3186	1,4621
$H_{ex\sigma}$ [Bq/kg]	0,0399	0,013	0,032	0,0398	0,0376	0,0283	0,0348	0,042



Slika 21. Radijeva ekvivalentna aktivnost s pripadajućim pogreškama (varijance)



Slika 22. Indeks vanjske opasnosti s pripadajućim pogreškama (varijance)

Možemo vidjeti u Tablici 8. i iz Slika 16. i 17. da su Ra_{eq} i H_{ex} ispod graničnih vrijednosti $Ra_{eq} = 370 \frac{\text{Bq}}{\text{kg}}$ i $H_{ex} = 1 \text{ Bq/kg}$, što kvantitativno pokazuje da tlo u Brodsko – posavskoj županiji ne predstavlja nikakvu radiološku opasnost.

Dobiveni rezultati mjerenja radona u tlu na području Brodsko-posavske županije kao i oba GRP-a, prvi koji je izračunat (prema jednadžbi (1)) i drugi koji je konstruiran (prema hrvatskoj klasifikaciji opisanoj u Tablici 6.) sažeti su u Tablici 9.

Tablica 9. Vrijednosti koncentracija aktivnosti radona u tlu s pripadajućim pogreškama (standardnom devijacijom), izračunate vrijednosti propusnosti tla s pogreškama (varijancom) te izračunate vrijednosti geogenog radonskog potencijala s pripadajućim pogreškama (varijancom) i potklasifikacija GRP-a ¹⁵

Lokacija	c (kBqm ⁻³)	σ_c (kBq m ⁻³)	k (m ²)	σ_k (m ²)	GRP Neznal	σ_{GRP}	GRP HR - klasa
1 - OŠ Rešetari	51,30	2,4	$1,4 \cdot 10^{-13}$	$2,6 \cdot 10^{-16}$	18,00	0,90	3
2 - OŠ Cernik	43,20	2,20	$1,1 \cdot 10^{-11}$	$2,8 \cdot 10^{-12}$	44,40	29,70	5
3 - SŠ Nova Gradiška	59,70	2,60	$8,7 \cdot 10^{-14}$	$9,7 \cdot 10^{-17}$	19,50	0,90	3
4 - DV Maslačak Nova Gradiška	27,00	1,70	$5,3 \cdot 10^{-12}$	$5,3 \cdot 10^{-13}$	21,20	5,20	3
5 - Podvrško	52,00	2,40	$4,2 \cdot 10^{-13}$	$2,2 \cdot 10^{-15}$	21,90	1,10	3
6 - Opatovac	112,40	3,50	$1,4 \cdot 10^{-12}$	$5,2 \cdot 10^{-14}$	61,10	4,70	6
7 - Cerničke Šagovine	12,10	1,20	$1,7 \cdot 10^{-14}$	$3,9 \cdot 10^{-18}$	3,20	0,30	1
8 - Trnakovac	34,90	2,00	$3,0 \cdot 10^{-14}$	$1,1 \cdot 10^{-17}$	9,90	0,60	2
9 - Baničevac	70,80	2,80	$1,5 \cdot 10^{-12}$	$5,2 \cdot 10^{-14}$	38,60	3,20	5
10 - OŠ Komarnica	26,20	1,70	$2,3 \cdot 10^{-12}$	$1,3 \cdot 10^{-13}$	15,90	2,30	3
11 - OŠ Adžamovci	55,00	2,50	$7,3 \cdot 10^{-12}$	$7,1 \cdot 10^{-13}$	48,30	11,70	5
12 - OŠ Staro Petrovo Selo	95,20	3,30	$5,4 \cdot 10^{-13}$	$3,7 \cdot 10^{-15}$	41,90	1,70	5
13 - OŠ Batrina/Kapela	49,00	2,30	$1,7 \cdot 10^{-14}$	$3,9 \cdot 10^{-18}$	13,00	0,60	3
14 - OŠ Davor	-	-	-	-	-	-	-
15 - OŠ Vrpolje	-	-	-	-	-	-	-

Tablica 10. Osnovna statistička analiza rezultata mjerenja radona u tlu i geogenog radonskog potencijala (GRP Neznal) izračunati prema jednadžbi (1) i konstruiran prema potklasifikaciji opisanoj u Tablici 6. (GRP klasa), AM je aritmetička sredina, SD = standardna devijacija, GM = geometrijska sredina, GSD = geometrijska standardna devijacija, Min je minimalna izmjerena vrijednost dok je Max maksimalna. ¹⁶

	c (kBqm ⁻³)	GRP Neznal	GRP HR - klasa
broj mjesta na kojima se mjerilo	13,0	13,0	13,0
AM	53,0	27,4	3,6
SD	27,70	17,40	1,4
Medijan	51,3	21,2	3,0
GM	46,0	21,60	3,30
GSD	1,80	2,20	1,60
Min-Max	12,1 - 112,4	3,2 - 61,1	1 - 6

Uzeta su u obzir i prikazana samo ona mjesta (N = 13) na kojima su mjerena oba parametra. Mjerenja radona u tlu i propusnosti tla uglavnom su izvedena u blizini škola i dječjim vrtićima u sklopu ciljanih istraživanja radona u zatvorenim prostorima. Aritmetička sredina svih mjerenja radona u tlu iznosi 53 kBq/m³ sa standardnom devijacijom od 28 kBq/m³, dok

¹⁵ Vrijednosti mjerenja izmjerio izv.prof.dr.sc. Branka Petrinceca s pripadajućim pogreškama

¹⁶ Izračunate pogreške



prosječni GRP sa svojom standardnom devijacijom iznosi 27 ± 17 . Prema hrvatskoj potklasifikaciji geogenski radonski potencijal svrstava se u srednji viši (4) GRP.

STATISTIČKI Shapiro-Wilkov test:



Provjera normalnosti

Shapiro – Wilkov test koristi se za provjeravanje normalne distribucije podataka. Ta je informacija ključna jer o distribuciji podataka ovisi i izbor statističkog testa. Ovaj je test primijenjen na tri niza podataka: koncentracije aktivnosti uranija ^{238}U , radija ^{226}Ra i radona ^{222}Rn u tlu. Provedeni testovi pokazali su da radij i radon imaju normalnu distribuciju jer su njihove p vrijednosti bile: 0,7305 za radij, odnosno 0,06 za radon, što je veće u usporedbi s razinom značajnosti $\alpha = 0,05$. Izračunata p vrijednost kod uranija ^{238}U iznosi 0,006 što je u usporedbi s razinom značajnosti $\alpha = 0,05$ značajno manje čime smo dokazali odstupanje od normalne distribucije. Rezultati provedenih testova prikazani su u Tablicama 11., 12. i 13.



Tablica 11. Rezultati Shapiro – Wilkova testa za koncentracije aktivnosti ^{226}Ra

Parametar	Vrijednost
P-vrijednost	0,7305
W	0,9441
Veličina uzorka (n)	8
Prosjek (\bar{x})	33.7237
Medijan	33.675
Standardna devijacija uzorka (S)	8.7813
Zbroj kvadrata	539.784
b	22.5743
Iskrivljenost	-0,7809
Oblik zakrivljenosti	 Potencijalno simetrično (pval=0,299)
Prekomjerna kurtoza	1.3632
Kurtosis oblik	 Potencijalno Mesokurtic , normalno kao repovi (pval=0,357)
Outliers	

Tablica 12. Rezultati Shapiro – Wilkova testa za koncentracije aktivnosti ²³⁸U

Parametar	Vrijednost
P-vrijednost	0,006066
W	0,7094
Veličina uzorka (n)	8
Prosjek (\bar{x})	21.4925
Medijan	23
Standardna devijacija uzorka (S)	5.5344
Zbroj kvadrata	214.4047
b	12.3329
Iskrivljenost	-2,3103
Oblik zakrivljenosti	 Asimetrično , lijevo/negativno (pval=0,002)
Prekomjerna kurtoza	5.7848
Kurtosis oblik	 Leptokurtic , dugi teški repovi (pval=0)
Outliers	8.48

Tablica 13. Rezultati Shapiro – Wilkova testa za koncentracije aktivnosti ²²²Rn

Parametar	Vrijednost
P-vrijednost	0,05963
W	0,7878
Veličina uzorka (n)	6
Prosjek (\bar{x})	42.3833
Medijan	50.15
Standardna devijacija uzorka (S)	16.4197
Zbroj kvadrata	1348.0283
b	32.5885
Iskrivljenost	-1,6464
Oblik zakrivljenosti	 Potencijalno simetrično (pval=0,051)
Prekomjerna kurtoza	2.2854
Kurtosis oblik	 Potencijalno Mesokurtic , normalno kao repovi (pval=0,189)
Outliers	

Nakon provedenih testova normalnosti željeli smo statistički provjeriti razliku između dviju grupa varijabli: koncentracija aktivnosti radija i radona u tlu i postavljene su nul-hipoteza i alternativna hipoteza:

H_0 : ne postoji statistički značajna razlika između koncentracija aktivnosti radionuklida koji pripadaju istom lancu radioaktivnog raspada – radija i radona

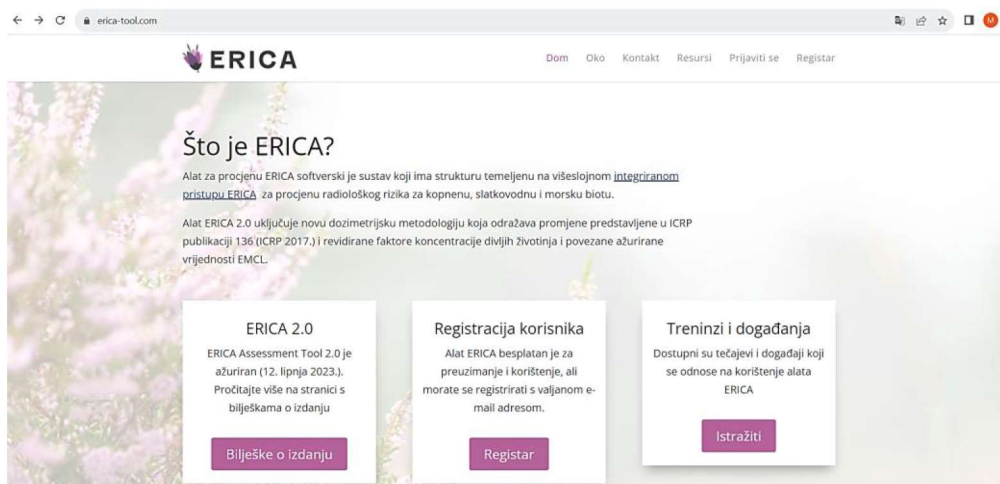
H_1 : postoji statistički značajna razlika između koncentracija aktivnosti radionuklida koji pripadaju istom lancu radioaktivnog raspada – radija i radona.

U tu svrhu proveden je t-test s uobičajenom razinom značajnosti $\alpha = 0,05$. Kao rezultat t-testa dobivena je p vrijednost od 0,3459 i t vrijednost ($df = 10$) od 0,9891. Budući da je t izračunato je manje od t tablični (koji iznosi 2,23 za $df = 10$ i $\alpha = 0,05$) prihvaćamo nul-hipotezu i zaključujemo da ne postoji statistički značajna razlika između ovih dvaju setova podataka čime je potvrđena fizikalna povezanost između radija i radona (jezgra roditelj – jezgra potomak).

6. ERICA SOFTVER

Alat ERICA 2.0 je računalni i softverski sustav koji ima strukturu temeljenu na integriranom pristupu ERICA u svrhu procjene radiološkog rizika za neljudsku biotu (biljke i životinje). U interakciji je s brojnim bazama podataka i funkcijama koje pomažu procijeniti koncentracije aktivnosti medija u okolišu ukoliko ona nisu mjerena, u samoj bioti kao i brzine doze za biotu. Alat vodi korisnika kroz proces procjene, bilježi informacije i odluke te omogućuje izvođenje potrebnih izračuna koje imaju glavne ciljeve: procijeniti radiološki rizik za čovjeka i na temelju procjene donijeti odgovarajuće odluke o njegovoj zaštiti ukoliko je ugrožen, zaštititi specifične ekosustave, vrste koje su pred izumiranjem te medije okoliša (vodotoke, jezera, more, tlo). Može se primijeniti u planiranim i postojećim situacijama izloženosti, iako primarno nije namijenjen hitnim situacijama izloženosti.

Kako bismo mogli skinuti sam softver na svoje računalo, najprije moramo pristupiti stranici erica-tool.com, a zatim se registrirati na stranicu Erica alat za procjenu ili prijaviti ukoliko već imamo korisnički račun.



Slika 23. Stranica Erica-tool

Nakon prijave na stranicu, u gornjem desnom kutu kliknemo na **Preuzimanje Erica** i ponovno na **Preuzimanje**. Program zatim pokrenemo.

19. listopada 2021

preuzimanje datoteka	
Verzija	2.0.221
preuzimanje datoteka	2306
Veličina datoteke	90 MB
Broj datoteka	1
Stvori datum	19. listopada 2021
Zadnje ažurirano	12. lipnja 2023

Postavljanje ERICA 2.0

Verzija : ERICA Assessment Tool 2.0, verzija 2.0.121 (ažurirano 12. lipnja 2023.).

Naziv datoteke : ERICA-2.0.121-setup.exe

Zahjevni sustava : 32/64 bitni Windows 7/8.1/10 ili noviji; 128 MB RAM (preporučeno: 512 MB RAM ili više); Najmanje 205 MB slobodnog prostora na tvrdom disku. Imajte na umu da je ova verzija uključivala Java RE kako bi se omogućilo pokretanje alata na osobnim računalima koja nerado instaliraju Java ažuriranje.

Slika 24. Preuzimanje Erica 2.0 verzije programa

Kada otvorimo ERICA alat za procjenu, odaberemo opciju NEW PROJECT na alatnoj traci ili u izborniku FILE. Uz 'New project' postoji nekoliko drugih stavki izbornika pod FILE. Stavke koje nudi ova opcija su sljedeće:

- stvaranje novog projekta (procjene, engl. Assessment),
- otvaranje postojećeg projekta za moguće uređivanje, pregled ili dovršavanje
- spremanje trenutno odabrane procjene
- spremanje trenutno odabrane procjene, ali s novim nazivom datoteke
- zatvaranje trenutno odabrane procjene
- potpuno zatvaranje ERICA alata za ocjenjivanje i svih procjena.

Kada kreiramo ili otvorimo procjenu, opcije koje na izborniku ASSESSMENT postaju dostupne jesu sljedeće:

- *Details* - prečac za detalje procjene trenutno odabrane procjene i razine gdje se unose osnovni podaci za procjenu
- *Stakeholders* - prečac do zaslona dionika trenutno odabrane procjene i razine
- *Context* - prečac do zaslona konteksta procjene trenutno odabrane procjene i razine gdje za mogućnost odabira ekosustava, organizama i radionuklida za koje procjenjujemo rizik
- *Radioecology* - prečac do zaslona s detaljima radioekologije trenutno odabrane procjene i razine gdje se mogu unijeti informacije o omjerima koncentracije (Kds) i koeficijentima distribucije (CRs).

- *Occupancy* - prečac do zaslona s detaljima o zauzetosti trenutno odabrane procjene i razine gdje se unose informacije o faktorima zauzetosti za svaki referentni organizam i moguće izmjene zadanih težinskih faktora zračenja
- *Inputs* - prečac do zaslona s unosima trenutno odabrane procjene i razine za unošenje informacija za svoj medij i/ili koncentraciju u organizmu
- *Results* - prečac do zaslona s rezultatima trenutno odabrane procjene i razine
- *Show Report* - prikaz prozora izvješća koji pruža detalje svih ulaza i izlaza za određenu procjenu i može se spremati i izvesti za korištenje u drugim programskim paketima.

Izbornik DATABASE omogućuje pristup prikazima baze podataka. Opcije koje nudi ovaj izbornik:

- *Parameters Database* - omogućuje pristup bazama podataka parametara koji podupiru alat za procjenu ERICA (informacije o omjeru koncentracije koje se nalaze u alatu ERICA zajedno sa zadanim EMCL-ovima koji su izračunati na temelju vrijednosti probira od 10 mGyh, potpunosti informacije o faktorima itd.)
- *Radionuclides* - prikazuje prikaz radionuklida s punim popisom radionuklida
- *Organisms* – prikazuje prikaz organizama s punim popisom referentnih organizama.

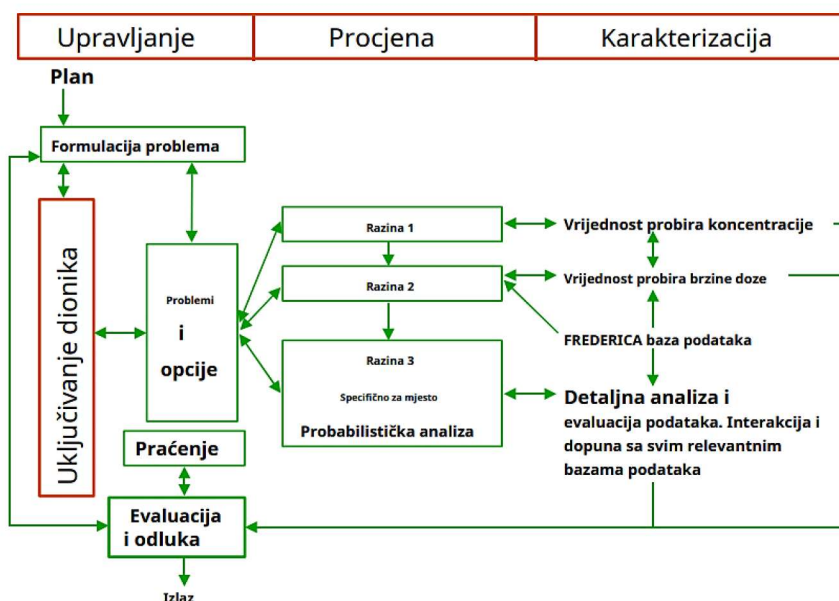
Posljednji popis opcija je za opciju HELP na traci izbornika. Unutar ovog izbornika nalaze se sljedeće opcije:

- *Welcome* - ova opcija vraća korisnika na početni ekran s pozadinskim informacijama za alat za procjenu ERICA
- *Help contents* - ova opcija prikazuje sadržaj pomoći
- *Print contents*- ova opcija otvara verziju za ispis dokumentacije pomoći.
- *Glossary* - poveznica na pojmovnik proizveden u okviru ERICA projekta koji daje kratku definiciju i opis ključnih riječi koje se koriste u cijelom ERICA alatu
- *About* - pruža informacije o verziji alata i licenci
- *Release notes* - ova opcija prikazuje bilješke o izdanju i ažuriranjima
- *Update* - provjerava ažuriranja
- *Contacts* - pruža informacije i adrese e-pošte za prijavu grešaka, problema ili problema s alatom za procjenu ERICA; web adresa za prijavu problema s alatom: putem obrasca za kontakt na <http://erica-tool.com/contact-us/>.

6.2. Struktura integriranog pristupa ERICA

Kako bi se mogle donijeti važne odluke vezane uz učinke ionizirajućeg zračenja na okoliš, kombinirana su tri glavna elementa u integrirani pristup ERICA:

1. UPRAVLJANJE - proces donošenja odluka prije, tijekom i nakon procjene (odluke o specifičnim tehničkim pitanjima povezanim s provedbom procjene, opće odluke koje se odnose na interakciju s dionicima i odluke nakon procjene). Alat ne propisuje koje odluke donijeti.
2. PROCJENA IZLOŽENOSTI BIOTE –procjena ili mjerenje koncentracija aktivnosti u okolišnim medijima i organizmima, definiranje uvjeta izloženosti i procjenu doze zračenja za odabranu biotu.
3. KARAKTERIZACIJA RIZIKA - sinteza informacija dobivenih tijekom procjene rizika za korištenje u upravljačkim odlukama. To bi trebalo uključivati procjenu vjerojatnosti (ili učestalosti) i veličine (ili ozbiljnosti) štetnih učinaka koji bi se mogli pojaviti u populaciji ili dijelu okoliša, zajedno s identifikacijom nesigurnosti [2].



6

Slika 25. Struktura integriranog pristupa ERICA¹⁷

6.2.1. Formulacija problema

Proces formuliranja problema u bilo kojoj situaciji (razgradnja i zbrinjavanje nuklearnog objekta te radioaktivnog otpada, izloženost nakon nezgode, nezgode u transportu radioaktivnih materijala, zlonamjerna uporaba (kao i terorizam) radioaktivnih tvari) ključan je za provođenje

¹⁷ <https://ars.els-cdn.com/content/image/1-s2.0-S0265931X07003104-gr1.jpg>, (preuzeto 30.8.2023.)

i tumačenje rezultata procjene. Njegova je svrha potaknuti korisnika da pažljivo razmisli o procjeni koju treba provesti i dokumentira sve pretpostavke i odluke na jasan i transparentan način. Na primjer, važno je utvrditi je li potpuna procjena rizika za okoliš (odabir razine 3) prikladna ili zahtijeva li zakonodavni kontekst provođenje procjene razine 3 [2].

Ključni elementi za formulaciju problema:

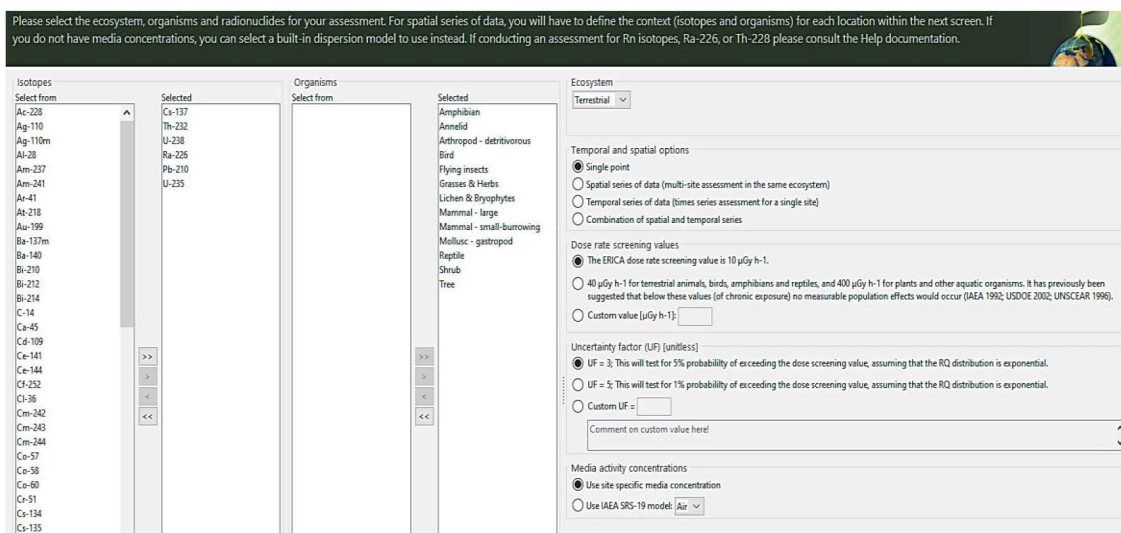
- ▶ Definirati cilj studije – jesu li granice ozračenja postavljene za ljude dovoljno dobre i za okoliš? Ugrožavaju li trenutni ispusti okoliš?
- ▶ Vremenski i prostorni okvir (detaljan opis rada) – što se uzorkovalo (voda/sediment/zrak), na kojim lokacijama, u kojem vremenskom razdoblju, ...
- ▶ Stavovi sudionika (Javnost, neovisni stručnjaci (istraživački i akademski), međunarodni predstavnici, nevladine organizacije,...) - postoje li socijalna ili ekonomska pitanja koja bi trebalo uzeti u obzir u procjeni, tko je sve zainteresiran i zašto za naš rad?
- ▶ Karakteristike izvora zračenja – vremenska i prostorna promjenjivost sastava ispusta, monitoring, pozadinska izloženost (Koji radionuklidi? Doprinos njihovih potomaka?)
- ▶ Mjerenje koncentracije aktivnosti u okolišu – Kolika je? Je li ta informacija dostupna za svako mjesto i svaki radionuklid?
- ▶ Referentni organizmi - odabrani za integrirani pristup ERICA definirani su i korišteni za izvođenje geometrijskih odnosa između izvora zračenja i organizama, kao i za razmatranje dozimetrije vanjske i unutarnje izloženosti, grupirani su u tri općim kategorijama ekosustava: kopneni, slatkovodni i morski ekosustav, ne predstavljaju stvarnu biotu, već organizme koji približno opisuju stvarne organizme budući da neke vrste nisu istražene i nema dovoljno podataka za njih [1] [2] .

Alat ERICA pruža nekoliko početnih ekrana za snimanje i obrazloženje formulacije problema unutar računalne datoteke za procjenu:

- detaljan opis procjena
- opise putova prijenosa (tlo-biljka, zemlja-biljke-životinje, ...) i krajnje točke procjene (morbiditet, mortalitet, reproduktivna sposobnost, mutacija)
- učitavanje konceptualnog modela
- odabir ekosustava (slatkovodni, morski ili kopneni)
- unutar razine 2 i 3 odaberite referentne organizme koje treba uzeti u obzir

- odabir radionuklida za uključivanje u procjenu
- davanje podataka o koncentracijama medijskih aktivnosti
- odabir brzine doze probira s kojom će se uspoređivati rezultati razina 1 i 2 [2].

Program traži unos podataka/odabir radionuklida i referentnih organizama.



Slika 26. Odabir radionuklida i referentnih organizama za procjenu unutar razine 2

6.3. Koncentracije aktivnosti radionuklida u okolišu i u bioti

Izloženost zračenju procjenjuje se kao **brzina apsorbirane doze** (količina energije koju ionizirajuće zračenje prenosi jedinici mase organizma po jedinici vremena, mjerna jedinica je $\mu\text{Gy/h}$). Da bi se ona mogla odrediti, potrebne su koncentracije aktivnosti u mediju i bioti.

Koncentracija aktivnosti radionuklida u mediju i/ili bioti može biti poznata ili ju je potrebno procijeniti. Koncentracije aktivnosti radionuklida u medijima (voda, sediment, tlo ili zrak) osnovni su unosi potrebni u svim trima razinama alata ERICA. Međutim, nije uvijek dostupno dovoljno podataka. U tom slučaju koncentracije medijske aktivnosti moraju se procijeniti korištenjem disperzijskih modela SRS-19. Razvijeni su u svrhu provjere radioaktivnih ispuštanja u kontekstu radiološke zaštite ljudi. Modeli ugrađeni u alat ERICA su generički i uzimaju u obzir razrjeđivanje i disperziju u okolišu, koristeći minimalne ulazne podatke specifične za lokaciju. Zadane vrijednosti omjera koncentracije pohranjene su u bazama podataka za prijenos alata (baza podataka "Radioecology"), dajući vrijednost za svaki element i referentni organizam [2] [41].

Koncentracije aktivnosti radionuklida u referentnom organizmu, unutar ERICA alata, predviđaju se iz umnoška koncentracije aktivnosti medija i omjera ravnotežnih koncentracija

(CR) ili transfer faktora. Za vodene sredine, koeficijent distribucije (K_d) koristi se za povezivanje ravnotežnih koncentracija aktivnosti u sedimentima s onima u vodi [41].

$$CR = \frac{\text{Koncentracija aktivnosti u cijelom tijelu biote } \left(\frac{Bq}{kg} \text{ žive mase}\right)}{\text{Koncentracija aktivnosti u tlu } (Bq/kg)}$$

$$K_d = \frac{\text{Koncentracija aktivnosti u cijelom tijelu biote } \left(\frac{Bq}{kg} \text{ suhe mase}\right)}{\text{Koncentracija aktivnosti u vodi } (Bq/l)}$$

Tablica 14. Određivanje CR-a u procjeni 2

Please review and edit the radioecology parameter: Concentration Ratio (CR).
The default CR values presented are empirically derived means (not 95th percentile values).

Concentration Ratio (CR) (Bq kg⁻¹ (f.w.) per Bq kg⁻¹ soil (d.w.) or Bq m⁻³ air for H, C and noble gases)

Nuclide	Amphibian	Annelid	Arthropod - detritivorous	Bird	Flying insects	Grasses & Herbs	Lichen & Bryophytes	Mammal - large	Mammal - small-burrowing	Mollusc - gastropod	Reptile
Cs	4.51E-1	4.15E-2	1.27E-1	5.47E-1	1.28E-1	1.13E0	3.94E0	2.85E0	2.85E0	4.81E-2	6.18E-2
Th	5.70E-4	1.12E-2	1.12E-2	4.69E-4	2.96E-3	1.50E-1	3.77E-1	1.11E-3	1.11E-3	1.12E-2	9.55E-2
U	4.52E-4	2.41E-2	9.55E-2	1.46E-3	5.20E-3	1.16E-1	9.11E-1	2.84E-3	2.84E-3	3.41E-2	3.07E-2
Ra	2.00E-1	2.05E-1	2.05E-1	3.47E-2	5.31E-2	1.66E-1	7.10E-1	8.92E-2	8.92E-2	2.74E-2	2.00E-2
Pb	4.60E-2	4.36E-1	7.02E-1	5.92E-2	1.73E-2	1.15E-1	2.60E0	3.85E-2	3.85E-2	6.89E-3	4.74E-2

Select a cell to edit

Edit Value | Edit Distribution

Edit value and comment for selected cell(s)

Select ERICA default CR values

Method used to derive ERICA default CR value when no empirical data:

A Bayesian approach or methods to derive a missing SD value applied to empirical datasets

1 Similar reference organism

2 From published review

3 Modelling approaches

4 Element of similar biogeochemistry for reference organism

5 Element of similar biogeochemistry for similar reference organism

6 Highest transition metal for reference organism

7 Estuarine data

8 Highest animal value

9 Highest plant/algae value

10 Combined methods*

Select/Unselect all check boxes

*Using a combination of the above approaches.

S desne strane sučelja nalaze se pristupi korišteni za određivanje CR vrijednosti koncentracije zbog nedostatka empirijskih podataka. Postoji skup pravila koja su osmišljena kako bi se ispunila matrica podataka, potrebna za izračune CR vrijednosti na razinama 2 i 3. Npr. *Upotrijebite dostupnu vrijednost CR za sličan referentni organizam (preferirani pristup)* – na primjer, dostupne CR vrijednosti za jedan referentni organizam kralježnjaka primijenjene su na druge referentne organizme kralježnjaka.

Tlo je glavno spremište dugoživićih radionuklida taloženih u kopnenim ekosustavima, a voda u vodenim ekosustavima. Prijenos radionuklida iz tla/zraka/vode u biljke/životinje/ljude, biljaka u životinje, životinja/biljaka u ljude obično se kvantificira pomoću faktora prijenosa TF. Apsorpcija radionuklida korijenjem biljke proces je koji je povezan s fiziologijom biljke. Udio taloženog radionuklida kojeg korijenje biljke preuzme prvenstveno ovisi o vrsti tla. Na močvarnim, zapuštenim i neobrađenim tlima biljke korijenom unose najviše ¹³⁷Cs i ⁹⁰Sr u odnosu na glinasta tla koja su bogata hranjivim tvarima, samim time kalijem i amonijakom. Razine radionuklida u proizvodima životinjskog podrijetla ovise o ponašanju radionuklida u

sustavu biljka - tlo, brzini apsorpcije u crijevima, metaboličkim procesima u životinji te brzini gubitka iz životinje (uglavnom urinom, izmetom i mlijekom). Gutanje radionuklida u hrani i naknadna apsorpcija kroz crijeva glavni je put ulaska većine radionuklida. Jestivi proizvodi dobiveni iz šume uključuju gljive, voće i divljač. Najviše razine radioaktivnog cezija uočene su u gljivama, zbog njihove velike sposobnosti akumulacije mineralnih hranjivih tvari. Meso divljih životinja (svinje, srne, sobovi) i domaćih životinja poput krava i ovaca koje pasu uz rubne dijelove šuma mogu sadržavati visoke koncentracije radioaktivnog cezija. Nakon apsorpcije, radionuklidi cirkuliraju u krvi.

Neki se koncentriraju u određenim organima; na primjer, ^{131}I se nakuplja u štitnjači kao i mnogi metalni ioni u jetri. Radioaktivni stroncij ima tendenciju taloženja u kostima, dok se radioaktivni ^{137}Cs distribuira po mekim tkivima [1].

6.5. Procjena brzine apsorbirane doze

Procjena ukupne brzine apsorbirane doze ($\mu\text{Gy/h}$) omogućuje tumačenje koncentracija aktivnosti medija/biote u smislu potencijalnog učinka. Radionuklidi u okolišu mogu ozračiti neljudsku biotu i izvana i iznutra. Unutarnja izloženost nastaje nakon unosa radionuklida u organizam gutanjem ili unosom pomoću korijena; određena je koncentracijom aktivnosti u organizmu, veličinom organizma te vrstom i energijom emitiranog zračenja. Izloženost vanjskom zračenju ovisi o različitim čimbenicima uključujući razine kontaminacije u okolišu, geometrijski odnos između izvora zračenja i organizma, staništu, veličini organizma, svojstvima zaštite medija i fizikalnim svojstvima radionuklida.

Koeficijent pretvorbe doze (DCC (izražena u mjernoj jedinici $\mu\text{Gy/h}$ po Bq/kg svježe mase)) povezuje koncentraciju aktivnosti organizma ili medija s brzinom unutarnje ili vanjske apsorbirane doze. Ključna veličina za procjenu unutarnjih apsorbiranih doza jest apsorbirani udio (ϕ), definiran kao udio apsorbirane energije u organizmu koji emitira izvor zračenja. Pomoću Monte Carlo simulacije izračunati su apsorbirani udjeli za izvore fotona i elektrona pod pretpostavkom da su ravnomjerno raspoređeni u sferama/elipsoidima uronjenim u beskonačni vodeni medij. Izračuni za ERICA zadane geometrije pokrivaju raspon energije od 10 keV do 5 MeV, raspon mase od 1 mg do 1000 kg i oblike od sferoida do elipsoida s različitim stupnjevima ekscentriciteta.

$$DCC_{un} = 5,77 \cdot 10^{-4} \cdot E \cdot \phi_E$$

$$^{18} * DCC_v = 5,77 \cdot 10^{-4} \cdot E \cdot (1 - \varphi_E),$$

gdje je E energija monokromatskog izvora, φ_E apsorbirani udio energije, a $5,77 \cdot 10^{-4}$ faktor konverzije.

Za vodene organizme, koji su uronjeni u vodu, nema bitne razlike između gustoće vode i organizma i stoga su pretpostavke unutar gornjih jednadžbi opravdane.

Međutim, procjena vanjske izloženosti mnogo je složenija za kopnene organizme. Tlo, zrak i organska tvar znatno se razlikuju po sastavu i gustoći. Zbog toga se primjenom analitičkih rješenja ne može adekvatno uzeti u obzir prijenos zračenja. Umjesto toga, izvođenje DCC-a temelji se na prijenosu zračenja simuliranom za monoenergetske fotone pomoću Monte Carlo tehnika.

Koeficijenti pretvorbe doze mogu se koristiti za procjenu ne ponderirane brzine apsorbirane doze iz medija i koncentraciju aktivnosti organizma. Međutim, učinci zračenja ne ovise samo o ne ponderiranoj apsorbiranoj dozi, već i o *vrsti zračenja*. Na primjer, za danu ne ponderiranu brzinu apsorbirane doze, α zračenje može rezultirati značajnijim učinkom od β ili γ zračenja. Stoga se uvode težinski faktori zračenja kako bi se uzela u obzir relativna biološka učinkovitost (RBE) različitih vrsta zračenja: 10 za alfa zračenje, 3 za nisko beta zračenje unutar razine 1, dok je za γ zračenje vrijednost 1, u skladu s privremenim, ilustrativnim vrijednostima u projektu FASSET. Težinski se faktori mogu mijenjati na 2. i 3. razini [2] [41].

Iz proračuna za monoenergetske izvore zračenja izvedeni su koeficijenti pretvorbe specifične doze (DCC) za vanjsku i unutarnju izloženost, uzimajući u obzir vrstu zračenja kao i energiju i intenzitet emisije za većinu radionuklida uključenih u Publikaciju ICRP-a 38. Radioaktivni nuklidi kćeri uključeni su u izračun DCC-a ako je njihov poluživot kraći od 10 dana. Pojednostavljenja učinjena pri procjeni DCC vrijednosti cijelog tijela u ERICA pristupu usporediva su s onima u drugim pristupima u procjeni izloženosti neljudske biote [2].

Ukupna brzina ne ponderirane apsorbirane doze po organizmima računa se kao zbroj ukupne unutarnje i vanjske brzine apsorbirane doze (u $\mu\text{Gy}/\text{h}$):

$$D_{uk} = \dot{D}_{un}^b + \dot{D}_{van}^b = \sum_i C_i^b \cdot DCC_{un,j}^b + \sum_z v_z \cdot \sum_i C_{zi}^{ref} \cdot DCC_{van,zi}^b$$

¹⁸ * pretpostavka da su organizam i okolni medij iste gustoće i elementarnog sastava

gdje je C_i^b prosječna koncentracija radionuklida i u referentnom organizmu b (u Bq/kg svježe mase), koju računamo kao

$$C_i^b = C_{zi}^{ref} \cdot CR_{biota}$$

gdje je CR_{biota} transfer faktor biljka/životinja – medij (u Bq/kg svježe mase po Bq/kg u mediju)

$DCC_{un,j}^b$ specifični koeficijent pretvorbe doze za unutarnju izloženost definiran kao omjer prosječne koncentracije aktivnosti radionuklida i u organizmu j i jačine doze u organizmu (u $\mu\text{Gy}/\text{h}$ po Bq/kg svježe mase),

v_z faktor popunjenosti, tj. udio vremena za koji organizam b provede na određenoj poziciji z u svome staništu,

C_{zi}^{ref} prosječna koncentracija radionuklida i u referentnom mediju (tlu, sedimentu, vodi) dane lokacije (u Bq/kg svježe mase (tlo ili sediment) ili Bq/l (voda)),

$DCC_{van,zi}^b$ koeficijent pretvorbe doze za vanjsku izloženost definiran kao omjer prosječne koncentracije aktivnosti radionuklida i u referentnom mediju koji odgovaraju lokaciji z i jačine doze na organizam b (u $\mu\text{Gy}/\text{h}$ po Bq/kg svježe mase ili Bq/l).

Ukupne težinske (ponderirane) brzine doze ($\mu\text{Gy}/\text{h}$) procjenjuje Alat primjenom težinskih faktora (bez dimenzija) za alfa, nisko beta i visoko beta-gama zračenje:

$$DCC_{un} = wf_{nisko\beta} \cdot DCC_{un,nisko\beta} + wf_{\beta+\gamma} \cdot DCC_{un,\beta+\gamma} + wf_{\alpha} \cdot DCC_{un,\alpha}$$

$$DCC_{van} = wf_{nisko\beta} \cdot DCC_{van,nisko\beta} + wf_{\beta+\gamma} \cdot DCC_{van,\beta+\gamma}$$

gdje su wf težinski faktori za različite komponente zračenja (niski β , $\beta + \gamma$ i α) [1] [2] [41].

Ukoliko su potrebne ne ponderirane brzine apsorbirane doze, procjenitelj može jednostavno postaviti težinske faktore na jedinicu.

7. Procjena radiološkog opterećenja biote dijela Brodsko-posavske županije

Alat Erica 2.0 verzija korištena je za procjenu utjecaja ionizirajućeg zračenja na biotu u Brodsko-posavskoj županiji (Adžamovci, Trakovac, Davor, Rešetari, Šagovina Cernička, Podvrško, Kapela Batrina i Vrpolje). U alat smo unosili podatke o izmjerenim koncentracijama aktivnosti u tlu.

7.1. Procjena razine 1

Razina 1 osmišljena je tako da bude jednostavna i konzervativna, zahtijeva minimum ulaznih podataka tako da ju mogu koristiti i nestručni korisnici. Predviđa se da će mnoge procjene pomoću ove razine biti zanemarivo zabrinjavajuće s visokim stupnjem pouzdanosti.

Na razini 1 iz izbornika s popisom radionuklida odaberemo radionuklide ^{137}Cs , ^{232}Th , ^{238}U , ^{226}Ra , ^{210}Pb , ^{235}U . Nije bilo moguće odabrati ^{40}K budući da je on biogeni element koji je nužan za život organizama, a vrijednost brzine granične doze odaberemo $10 \mu\text{Gy/h}$ koja se inače koristi za sve ekosustave i organizme. Nadalje odabiremo kopneni ekosustav budući da su mjerene koncentracije aktivnosti radionuklida iz tla.

Please select the ecosystem and radionuclides for your assessment. If you do not have media concentrations, you can select a built-in transport model to use instead.

Isotopes
Select from: Ag-110m, Am-241, Ba-140, C-14, Ca-45, Cd-109, Ce-141, Ce-144, Cf-252, Cl-36, Cm-242, Cm-243, Cm-244, Co-57, Co-58, Co-60, Cr-51, Cs-134, Cs-135, Cs-136, Eu-152, Eu-154, H-3, I-125, I-129, I-131, I-132, I-133, Ir-192, La-140, Mn-54, Nb-94, Ni-59

Selected: Cs-137, Th-232, U-238, Ra-226, Pb-210, U-235

Ecosystem: Terrestrial

Dose rate screening values:
 The ERICA dose rate screening value is $10 \mu\text{Gy h}^{-1}$.
 $40 \mu\text{Gy h}^{-1}$ for terrestrial animals, birds, amphibians and reptiles, and $400 \mu\text{Gy h}^{-1}$ for plants and other aquatic organisms. It has previously been suggested that below these values (of chronic exposure) no measurable population effects would occur (IAEA 1999; USD/DOE 2002; UNSCEAR 1996).
 Custom value ($\mu\text{Gy h}^{-1}$):

Media activity concentrations:
 Use site specific media concentration
 Use IAEA SRS-19 model: Air

Slika 27. Odabir izotopa ^{137}Cs , ^{232}Th , ^{238}U , ^{226}Ra , ^{210}Pb , ^{235}U , ekosustava i brzine granične doze na razini 1

Budući da znamo izmjerene iznose koncentracija aktivnosti odabranih radionuklida, ne moramo uzeti postojeći model, već ih samo upisujemo u tablicu.

Please enter your media activity concentrations.
*For radionuclides of H, C and noble gases, activity concentrations in air (Bq m^{-3}) should be entered. For all other radionuclides enter the activity concentration in soil (Bq kg^{-1} dry weight).

Media Activity Concentrations

Isotopes	Activity Concentration in soil or air [Bq kg^{-1} d.w. or Bq m^{-3}]
Cs-137	7.31E0
Th-232	4.24E1
U-238	2.34E1
Ra-226	4.57E1
Pb-210	3.55E1
U-235	1.09E0

Please enter into the table the maximum measured or modelled media concentration, or, depending on your problem formulation, the activity concentration at the edge of the mixing zone.

Slika 28. Upis izmjerenih koncentracija aktivnosti odabranih izotopa na razini 1

U Tieru 1 (razini 1) program je izračunao ukupne ponderirane apsorbirane brzine doza zračenja za referentne organizme u kopnenom okolišu. Ukupni kvocijent rizika RQ izračunat je usporedbom izmjerenih koncentracija aktivnosti u tlu (M) s granicom koncentracije medija u okolišu za dani radionuklid za najograničeniji referentni organizam (EMCL):

$$RQ = \frac{M}{EMCL}$$

Unesene izmjerene koncentracije aktivnosti moraju imati maksimalne vrijednosti [2].

Budući da alat sadrži samo EMCL vrijednost za ograničavajući referentni organizam, zbroj RQ-ova može se izvesti iz različitih referentnih organizama zbog čega će ukupni RQ biti veći od ukupnog RQ za bilo koju vrstu.

Tablica 15. Zbrajanje RQ-ova na razini 1 [2]

	RQ-ovi			ΣRQ
	Cs-137	Po-210	Ra-226	
Zooplankton	0,10	0,2	0,35	
Školjkaš	0,12	0,36	0,02	
Mnogočetinasti crv	0,41	0,01	0,02	
Vaskularna biljka	0,14	0,03	0,05	
				1,12

Ukupni RQ, koji se koristi za donošenje odluke o ishodu procjene, zbroj je triju graničnih vrijednosti RQ-ova. Budući da alat ERICA sadrži samo vrijednosti EMCL za ograničavajući referentni organizam za svaki radionuklid, prijavljuju se samo granični RQ-ovi.

Ako je zbroj **RQ-ova** < 1 vrlo je mala vjerojatnost da brzina apsorbirane doze za bilo koji organizam premašuje brzinu probirne, granične doze. Situacija se može smatrati *zanemarivom radiološkom zabrinutošću*. Alat ERICA preporučit će korisniku zaključivanje procjene.

Ako je zbroj **RQ-ova** > 1, procijenjena brzina doze za jedan ili više organizama može premašiti brzinu doze probira, a *nema dovoljno dokaza za zaključak da je situacija zanemariva radiološka zabrinutost*. Alat ERICA preporučit će korisniku nastavak daljnje procjene koristeći razinu 2.

Koncentracije aktivnosti u okolišu uspoređuju se s ograničenjem koncentracije medija u okolišu (EMCL). EMCL je koncentracija aktivnosti (u Bq/kg suhe mase ili Bq/l) u odabranom mediju (tlo ili zrak (samo H, C, S i P) u kopnenim okruženjima, voda ili sediment u vodenim

okruženjima) koja bi rezultirala brzinom doze za najizloženiji referentni organizam. Ta brzina doze za najizloženiji organizam bila bi jednaka brzini probirne (pozadinske) doze.

EMCL izvodi se za svaku kombinaciju radionuklida i referentnog organizma povratnim izračunom iz predložene brzine doze probira (uglavnom je to 10 $\mu\text{Gy/h}$). Prva faza u izvođenju EMCL-a uključuje izračun srednjih EMCL vrijednosti izračunatih za sve referentne organizme za odabrani radionuklid i medij prema gornjoj formuli. Zatim se odabire minimalna vrijednost srednjeg EMCL-a za sve organizme kako bi se definirala jedinstvena vrijednost EMCL-a za određeni radionuklid. Drugim riječima, postoji samo jedna EMCL vrijednost po radionuklidu, a ograničavajući organizam može biti različit za različite radionuklide. Kao posljedica toga, korisnik ne može odabrati referentne organizme unutar razine 1 [41].

Za kopneni okoliš, EMCL vrijednosti uvijek se odnose na koncentracije aktivnosti u tlu, osim za izotope H, C, S i P koji se odnose na koncentracije u zraku. Za vodene sustave, vrijednosti EMCL izvedene su za koncentracije aktivnosti vode i sedimenta [2].

EMCL računa se kao omjer brzine probirne doze SDR i F vrijednosti, najveće brzine doze koju će organizam primiti za jediničnu aktivnost koncentracije određenog radionuklida u okolišnom mediju:

$$EMCL = \frac{SDR}{F}.$$

SDR je brzina probirne doze koju odabire procjenitelj u fazi procjene (u $\mu\text{Gy/h}$), a F je najveća brzina doze koju će organizam primiti za jediničnu koncentraciju aktivnosti određenog radionuklida u okolišnom mediju ($\mu\text{Gy/h}$ po Bq/kg suhe mase ili po Bq/l ili po Bq/ m^3 zraka ili medija). Općenito, referentna vrijednost označava bilo koju vrijednost koja se koristi u svrhu usporedbe, a za usporedbu vrijednosti koristi se inkrementalna (iznad pozadinska) granična doza od 10 $\mu\text{Gy/h}$ za sve ekosustave i organizme koji su kronično izloženi ljudskim aktivnostima koje koriste radioaktivne tvari i/ili povećavaju razine ionizirajućeg zračenja u okolišu. U alatu se također mogu koristiti druge doze probira:

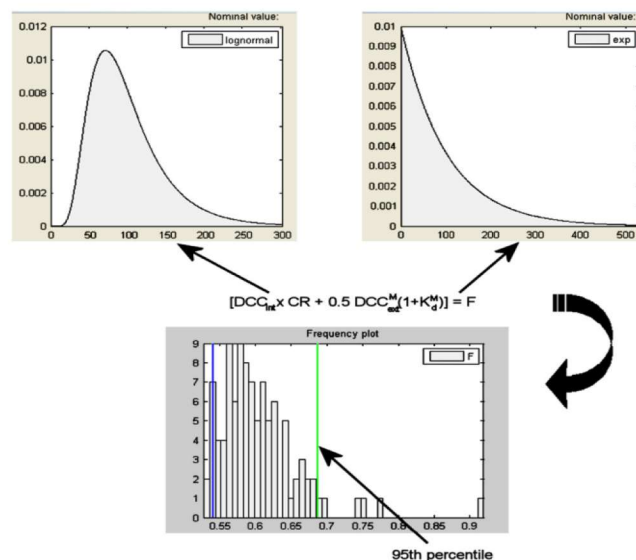
- 40 $\mu\text{Gy/h}$ za kopnene životinje ili
- 400 $\mu\text{Gy/h}$ za kopnene biljke i sve vodene vrste
- korisnički definirana vrijednost.

Izvedene su iz IAEA (1992.) i UNSCEAR (1996.) izvješća ispod kojih populacije vjerojatno neće biti značajno oštećene na temelju prethodnih pregleda znanstvene literature. Nadalje, za

neke organizme u nekim područjima prirodne pozadinske doze mogu biti veće od 10 $\mu\text{Gy/h}$. Predložena brzina doze probira niža je od ograničenja brzine doze američkog Ministarstva energetike (DoE) od 10 mGy/d (oko 400 $\mu\text{Gy/h}$) za domaće vodene životinje i referentne vrijednosti od 400 i 40 $\mu\text{Gy/h}$ za kopnene biljke odnosno kopnene životinje [41] [42] [43].

Vrijednost F ovisi o tipu referentnog organizma koji je definiran specifičnim DCC vrijednostima, položajem(ima) unutar staništa i specifičnim DCC, CR i K_d vrijednostima za radionuklide [41].

F vrijednosti izračunavaju se pomoću funkcija gustoće vjerojatnosti parametara za koje su dostupni (naime CR vrijednosti i koeficijenti distribucije). Izračuni se izvode probabilistički koristeći Monte Carlo simulacije što rezultira PDF-om (*Probability density function*, hrv. funkcijom gustoće vjerojatnosti) za F vrijednost od kojih može odabrati bilo koji percentil. U izračunima se koristi već postavljeni 95. percentil F vrijednosti za dobivanje 5. percentila EMCL-a. U temeljnim bazama podataka, u imeniku „Opis rizika“ može se pristupiti zadanim EMCL vrijednostima.

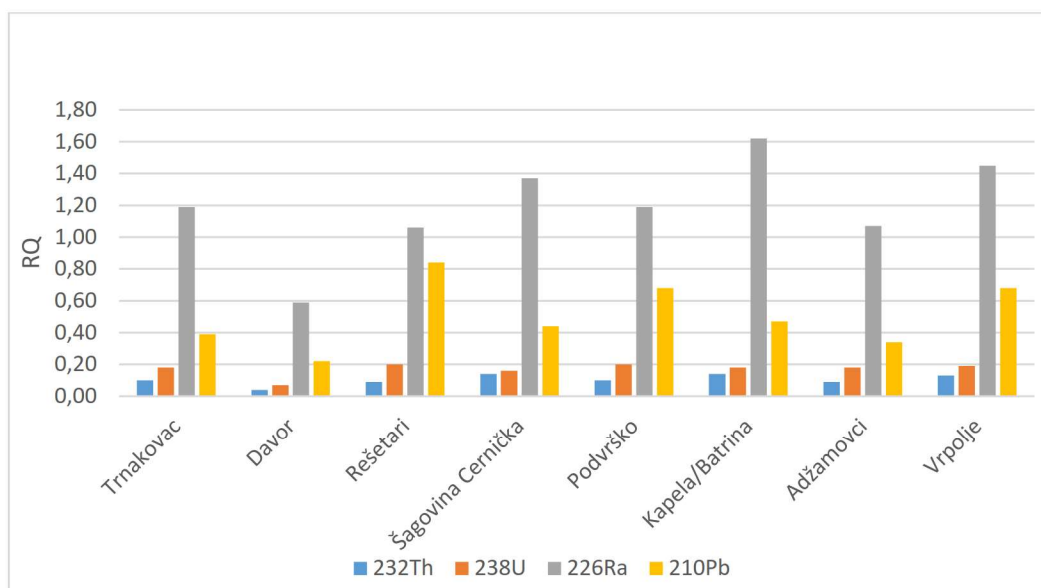


Slika 29. Primjer korištenja probabilističkih izračuna u izvođenju F vrijednosti (jednadžba za bentonske organizme koji žive na granici voda-sediment) [41]

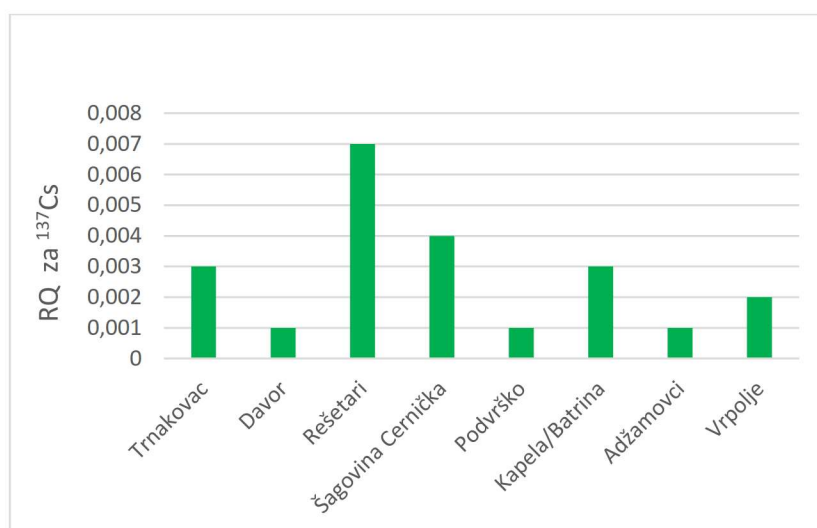
Izračunate vrijednosti RQ-ova za ispitivane uzorke tla nalaze se u Tablici 16. te na Slikama 25. i 26.:

Tablica 16. Izračunate vrijednosti RQ-ova u Tieru 1

RQ Tier 1								
	Trnakovac	Davor	Rešetari	Šagovina Cernička	Podvrško	Kapela/Batrina	Adžamovci	Vrpolje
²³² Th	0,10	0,04	0,09	0,14	0,10	0,14	0,09	0,13
²³⁸ U	0,18	0,07	0,20	0,16	0,20	0,18	0,18	0,19
²²⁶ Ra	1,19	0,59	1,06	1,37	1,19	1,62	1,07	1,45
²¹⁰ Pb	0,39	0,22	0,84	0,44	0,68	0,47	0,34	0,68
²³⁵ U	0,009	0,003	0,01	0,008	0,098	0,009	0,009	0,009
¹³⁷ Cs	0,003	0,001	0,007	0,004	0,001	0,003	0,001	0,002



Slika 30. Kvocijenti rizika izračunati pomoću alata Erica za ²³²Th, ²³⁸U, ²²⁶Ra, ²¹⁰Pb



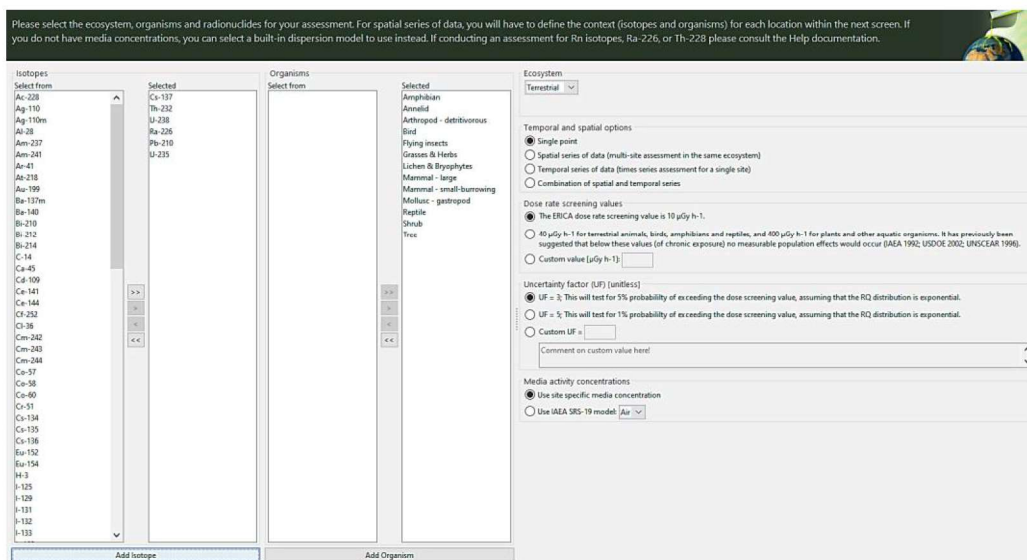
Slika 31. Kvocijenti rizika za ¹³⁷Cs

Budući da je kalij biogeni element, koncentracija aktivnosti za kalij nije uključena u procjenu rizika pomoću alata ERICA. ¹³⁷Cs ljudski je stvoren radionuklid koji je uz ¹³⁴Cs prvi indikator

nuklearne nesreće i štetan je za zdravlje. Kvocijenti rizika za ^{137}Cs i ^{235}U jako su niski, iznosi su do vrijednosti 0,01. Iz grafa se lako može vidjeti da je RQ manji od jedinice za sve radionuklide osim ^{226}Ra što znači da ostali radionuklidi ne predstavljaju radiološki rizik na biotu. ^{226}Ra bi mogao biti uzrok štetnih učinaka na kopnenu biotu, u odnosu na ostale radionuklide budući da je njegov RQ veći od 1. Zbog toga smo nastavili analizirati radiološki rizik u Tieru 2 (razini 2) alata Erice za biljke i životinje na području Brodsko-posavske županije.

7.2. Procjena razine 2

Razina 2 ponudila nam je veći popis radionuklida/radioizotopa i referentnih organizama koji bi nam mogli biti od interesa. Odabrali smo sve referentne organizme koji žive na kopnu kako bismo utvrdili postoji li radiološki rizik za njih.



Slika 32. Odabir referentnih organizama, izotopa, ekosustava, granične brzine doze i UF-a na razini 2

Referentne organizme kao i radioizotope koji nisu predstavljeni u zadanoj bazi Erice, možemo dodati pomoću opcije *Dodajte izotop* i *Dodajte organizam*. Ukoliko odaberemo nove izotope, dužni smo unijeti parametre (CR, koncentracije aktivnosti u mediju,...) za njih.

Tablica 17. Unos CR-ova za odabir novog izotopa na razini 2

Please review and edit the radioecology parameter: Concentration Ratio (CR).
The default CR values presented are empirically derived means (not 95th percentile values).

Concentration Ratio (CR) (Bq kg⁻¹ (f.w.) per Bq kg⁻¹ soil (d.w.) or Bq m⁻³ air for H, C and noble gases)

Nuclide	Amphibian	Annelid	Arthropod - detritivorous	Bird	Flying insects	Grasses & Herbs	Lichen & Bryophytes	Mammal - large	Mammal - small-burrowing	Mollusc - gastropod	Reptile
Cs	4.51E-1	4.15E-2	1.27E-1	5.47E-1	1.28E-1	1.13E0	3.94E0	2.85E0	2.85E0	4.81E-2	6.11E-1
Th	5.70E-4	1.12E-2	1.12E-2	4.69E-4	2.96E-3	1.50E-1	3.77E-1	1.11E-3	1.11E-3	1.12E-2	9.55E-1
U	4.52E-4	3.41E-2	9.55E-2	1.45E-3	5.20E-3	1.16E-1	9.11E-1	2.84E-3	2.84E-3	3.41E-2	3.07E-1
Ra	2.00E-1	2.05E-1	2.05E-1	3.47E-2	5.31E-2	1.66E-1	7.10E-1	8.93E-2	8.93E-2	2.74E-2	2.00E-1
Pb	4.60E-2	4.36E-1	7.02E-1	5.80E-2	1.73E-2	1.15E-1	2.60E0	3.85E-2	3.85E-2	6.89E-3	4.74E-1
K											

Select ERICA default CR values
Method used to derive ERICA default CR value when no empirical data:
 A Bayesian approach or methods to derive a missing SD value applied to empirical datasets
 1 Similar reference organism
 2 From published review
 3 Modelling approaches
Element of similar biogeochemistry for reference organism
 4 Element of similar biogeochemistry for similar reference organism
 5 Highest transition metal for reference organism
 6

UF (faktor nesigurnosti) je aproksimacija koja se primjenjuje kako bi se uzela u obzir nesigurnost u procjeni brzine doze i definira se kao: omjer između 95., 99. ili bilo kojeg drugog percentila (iznad očekivane vrijednosti) i očekivane vrijednosti distribucije vjerojatnosti brzine doze (i RQ). Za procjenu UF pretpostavljeno je da brzina doze i RQ slijede eksponencijalne distribucije sa sredinama jednakim procijenjenim očekivanim vrijednostima. U ovom slučaju, UF-ovi koji odgovaraju 95. i 99. percentilu jednaki su 3 odnosno 5. Procjenitelj također može unijeti vlastitu UF vrijednost. Faktor nesigurnosti odaberemo UF=3 što odgovara 95. percentilu [2].

UF-ovi također održavaju konzervativizam između razina 1 i 2. Rezultati razine 1 i 2 (konzervativne procjene) trebaju približno odgovarati jedan drugome, međutim neće biti identični za iste ulazne vrijednosti u objema razinama jer se u razini 1 95. percentil izvodi iz širenja nesigurnosti na temelju „stvarnih“ PDF-ova (npr. mnoge CR vrijednosti karakteriziraju log-normalne distribucije), dok se na razini 2 95. percentil izvodi primjenom UF-a na očekivanu vrijednost. Na razini 2 vrijednosti RQ-ova mogu se aproksimirati pomoću eksponencijalne distribucije, dok se RQ-ovi na razini 1 aproksimiraju kombinacijom različitih distribucija koje mogu, ali i ne moraju biti eksponencijalnog oblika.

Osim veće mogućnosti odabira radioizotopa i referentnih organizama, u razini 2 nudi uvedena je veća fleksibilnost uređivanja i unošenja vrijednosti sljedećih parametara koji su uključeni u izračune:

- koeficijenta raspodjele K_d (morske i slatkovodne) ili CRs
- postotka suhe mase tla ili sedimenta
- faktora popunjenosti

- težinskih faktora zračenja.

ERICA zatim računa transfer faktore (CR) radionuklida u svaki odabrani organizam. Prazna polja CR-ova popunjavaju se povlačenjem podataka iz dostupnih literatura. Dakle, program računa i ispisuje vrijednosti CR-ova. ERICA smatra da je upravo tolika količina svakog pojedinog radionuklida, kolika je ispisana u tablici, mogla ući iz tla u svaki pojedini referentni organizam.

Tablica 18. Izračunavanje transfer faktora (CR-ova) radionuklida u svaki odabrani organizam na razini 2

Nuclide	Amphibian	Annelid	Arthropod - detritivorous	Bird	Flying insects	Grasses & Herbs	Lichen & Bryophytes	Mammal - large	Mammal - small-burrowing	Mollusc - gastropod	Reptile
Cs	4.51E-1	4.15E-2	1.27E-1	5.47E-1	1.28E-1	1.13E0	3.94E0	2.85E0	2.85E0	4.81E-2	6.10E-1
Th	5.70E-4	1.12E-2	1.12E-2	4.69E-4	2.98E-3	1.50E-1	3.77E-1	1.11E-3	1.11E-3	1.12E-2	9.55E-1
U	4.52E-4	3.41E-2	9.55E-2	1.46E-3	5.20E-3	1.16E-1	9.11E-1	2.84E-3	2.84E-3	3.41E-2	3.07E-1
Ra	2.00E-1	2.05E-1	2.05E-1	3.47E-2	5.31E-2	1.66E-1	7.10E-1	8.93E-2	8.93E-2	2.74E-2	2.00E-1
Pb	4.60E-2	4.38E-1	7.02E-1	5.92E-2	1.73E-2	1.15E-1	2.60E0	3.85E-2	3.85E-2	6.89E-3	4.74E-1

Razina 2 omogućuje korisniku unos jedne ili više koncentracija aktivnosti u mediju (vodi, tlu, sedimentu, zraku) ili biote koje su uspoređene za upotrebu u procjeni u vodenom ili kopnenom ekosustavu. Preporuča se unos empirijskih vrijednosti koncentracija aktivnosti. Da bi se procjena mogla nastaviti, mora postojati najmanje jedna koncentracija aktivnosti za medij ili bilo koji od odabranih referentnih organizama za svaki radionuklid. Budući da imamo izmjerene/empirijske vrijednosti koncentracija aktivnosti radionuklida za tlo, unesemo ih u tablicu.

Tablica 19. Unos koncentracija aktivnosti izotopa ^{137}Cs , ^{232}Th , ^{238}U , ^{226}Ra , ^{210}Pb i ^{235}U u mediju (u našem slučaju za tlo) na razini 2

Please enter your media and/or organism concentrations. At least one concentration must be entered for each radionuclide but not all cells have to be filled in. Note that air concentrations should be given for H, C, and noble gases.

Isotope	Activity Concentration in soil or air [Bq kg ⁻¹ d.w. or Bq m ⁻³]	Amphibian [Bq kg ⁻¹ f.w.]	Annelid [Bq kg ⁻¹ f.w.]	Arthropod - detritivorous [Bq kg ⁻¹ f.w.]	Bird [Bq kg ⁻¹ f.w.]	Flying insects [Bq kg ⁻¹ f.w.]	Grasses & Herbs [Bq kg ⁻¹ f.w.]	Lichen & Bryophytes [Bq kg ⁻¹ f.w.]	Mammal - large [Bq kg ⁻¹ f.w.]	Mammal - small-burrowing [Bq kg ⁻¹ f.w.]
Cs-137		1.57E0								
Th-232		1.09E1								
U-238		8.48E0								
Ra-226		1.67E1								
Pb-210		1.66E1								
U-235		3.96E-1								

Please enter into t measured or mod concentration, or, problem formulat concentration at t zone.

You can exchange between the ERIC.

Exchange data

Export Click gues form.

Program sam računa i procjenjuje koncentracije aktivnosti pojedinih radionuklida u svakom odabranom referentnom organizmu kao što je prikazano u Tablici 20. budući da je zapamtio koncentracije aktivnosti u tlu. Koncentracije aktivnosti zadanih radionuklida u svakom odabranom referentnom organizmu računa kao umnožak prosječnih koncentracija radionuklida u referentnom mediju (tlu, sedimentu, vodi) i omjera ravnotežnih koncentracija (CR), tj. transfer faktora unesene ranije u procesu procjene. Za vodene ekosustave koristi K_d vrijednosti umjesto CR-ova. Alat automatski izvodi ovaj proces tijekom izračuna brzine doze na razinama 2 i 3, a cijeli skup pravila nalazi se u pomoći alata [41].

Tablica 20. Izračunate vrijednosti koncentracija aktivnosti u svakom pojedinom referentnom organizmu na razini 2

Please decide which of the entered values should be used to calculate the missing activity concentrations

Rules selection										
Isotope	Activity Concentration in soil or air [Bq kg ⁻¹ d.w. or Bq m ⁻³]	Amphibian [Bq kg ⁻¹ f.w.]	Annelid [Bq kg ⁻¹ f.w.]	Arthropod - detritivorous [Bq kg ⁻¹ f.w.]	Bird [Bq kg ⁻¹ f.w.]	Flying insects [Bq kg ⁻¹ f.w.]	Grasses & Herbs [Bq kg ⁻¹ f.w.]	Lichen & Bryophytes [Bq kg ⁻¹ f.w.]	Mammal - large [Bq kg ⁻¹ f.w.]	Mammal - small-burrowing [Bq kg ⁻¹ f.w.]
Cs-137	1.57E0	7.06E-1	6.50E-2	1.99E-1	8.56E-1	2.00E-1	1.77E0	6.17E0	4.48E0	1.21E-2
Th-232	1.09E1	6.21E-3	1.22E-1	5.11E-3	3.23E-2	1.64E0	4.11E0	1.21E-2	1.21E-2	1.21E-2
U-238	8.48E0	3.83E-3	2.89E-1	8.10E-1	1.24E-2	4.41E-2	9.86E-1	7.72E0	2.40E-2	2.40E-2
Ra-226	1.67E1	3.35E0	3.42E0	3.42E0	5.79E-1	8.87E-1	2.77E0	1.19E1	1.49E0	1.49E0
Pb-210	1.66E1	7.61E-1	7.21E0	1.16E1	9.79E-1	2.86E-1	1.90E0	4.30E1	6.36E-1	6.36E-1
U-235	3.96E-1	1.79E-4	1.35E-2	3.78E-2	5.80E-4	2.06E-3	4.61E-2	3.61E-1	1.12E-3	1.12E-3

Iz Monte Carlo simulacija računaju se koeficijenti prijenosa DCC koji su potrebni za računanje ukupne ne ponderirane brzine apsorbirane doze. Faktor popunjenosti (*the Occupancy factor*) jest dio vremena za koji pojedini organizam boravi u promatranom ekosustavu. Pokazuje gdje organizmi najviše obitavaju i za ona staništa u kojima se pojedini organizmi ne nalaze, program briše podatke. Npr. budući da leteći insekti (*Flying insects*) i ptice (*Birds*) ne obitavaju u tlu, program briše suvišne podatke u području staništa unutar tla (*On-soil*). Faktori popunjenosti koriste se prilikom izračunavanja ukupne ne ponderirane brzine apsorbirane doze.

Tablica 21. Faktori popunjenosti

Occupancy factors		Radiation weighting factors											
The occupancy factor is the fraction of time a given organism spends at a location in its given habitat.													
Habitat	Amphibian	Annelid	Arthropod - detritivorous	Bird	Flying insects	Grasses & Herbs	Lichen & Bryophytes	Mammal - large	Mammal - small-burrowing	Mollusc - gastropod	Reptile	Shrub	Tree
On-soil	0	0	0	1.00E0	1.00E0	1.00E0	1.00E0	1.00E0	1.00E0	0	1.00E0	0	1.00E0
In-soil	1.00E0	1.00E0	1.00E0	0	0	0	0	0	0	1.00E0	0	1.00E0	1.00E0
In-air	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Da bi program mogao izračunati ukupne težinske (ponderirane) brzine apsorbirane doze, mora pomnožiti ukupne ne ponderirane brzine apsorbirane doze s težinskim faktorima zračenja za neljudsku biotu za alfa, nisko beta i visoko beta-gama zračenje. Težinski faktori zračenja za neljudsku biotu zadani su za alfa (10), beta/gama (1) i nisko beta zračenje (3).

Očekivana vrijednost radiološkog kvocijenta RQ_{exp} za referentni organizam računa se kao omjer procijenjene ukupne (zbroj unutarnje i vanjske) ponderirane brzine apsorbirane doze za svaki pojedini referentni organizam uključen u procjenu (*Total Dose Rate per organism*) DR i brzine apsorbirane probirne doze koju je procjenitelj odabrao za korištenje. U našem slučaju brzina probirne apsorbirane doze postavljena je prema postavkama na $10 \mu\text{Gy/h}$.

$$RQ_{exp} = \frac{DR}{10 \mu\text{Gy/h}}$$

Ukupni očekivani RQ za svaki referentni organizam jednak je zbroju RQ-ova specifičnih za radionuklide za taj organizam.

Tablica 22. Računanje ukupne RQ_{exp} vrijednosti u razini 2 [2]

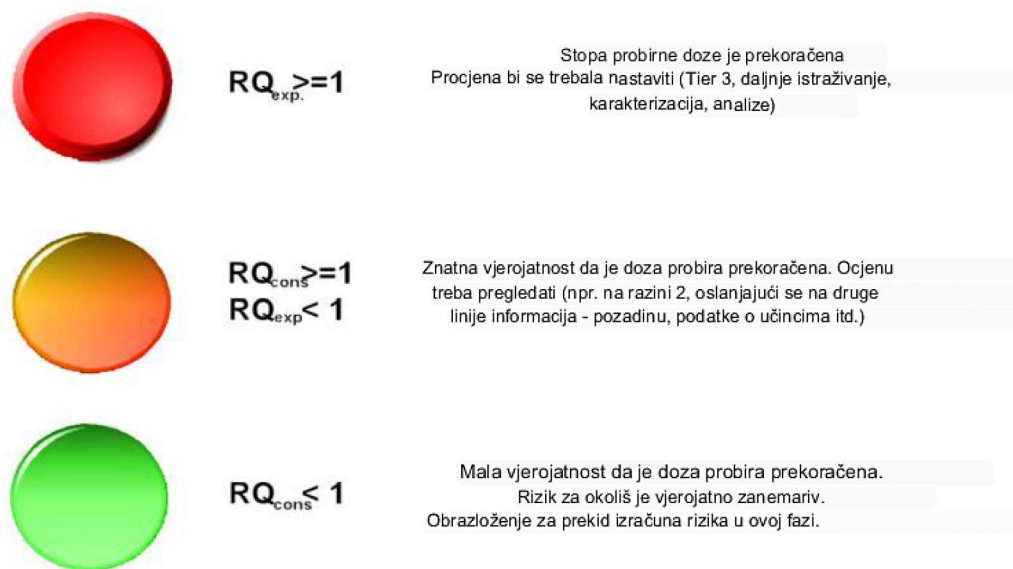
	RQ-ovi			ΣRQ
	Cs-137	Po-210	Ra-226	
Zooplankton	0,10	0,20	0,35	0,65
Školjkaš	0,12	0,36	0,02	0,50
Mnogočetinasti crv	0,41	0,01	0,02	0,44
Vaskularna biljka	0,14	0,03	0,05	0,22

Konzervativni RQ izračunava se množenjem očekivanog RQ-a faktorom nesigurnosti UF.

$$RQ_{cons} = RQ_{exp} \cdot UF$$

Kako bi se procijenio odgovarajući UF, pretpostavlja se da brzina doze i RQ slijede funkcije eksponencijalne distribucije sa sredinama jednakim procijenjenim očekivanim vrijednostima. RQ_{cons} predstavljaju najgori mogući scenarij koji se može dogoditi, dok su RQ_{exp} ipak realnije [3].

Tumačenje rezultata ispisa RQ vrijednosti:



Slika 33. Semafor sustav koji se koristi za tumačenje RQ vrijednosti¹⁹

Ako je očekivana vrijednost RQ (kao i konzervativni RQ) > 1 za bilo koji organizam, tada je procjena premašila graničnu dozu na razini 2. Alat će preporučiti provođenje daljnje procjene na razini 3.

Ako je konzervativni RQ > 1 , a očekivani RQ < 1 , tada postoji vjerojatnost da je procjena premašila graničnu dozu. Budući da je očekivani RQ < 1 , daljnji rad na smanjenju nesigurnosti u procjeni može rezultirati padom konzervativnog RQ ispod jedinice.

Tumačenje rezultata može dovesti do odluke opravdanog napuštanja procjene. U tom smislu, Alat pruža pomoćne informacije koje pomažu u procesu donošenja odluka. Kako bi se ocjenjivaču pomoglo protumačiti rezultate procjene na razini 2, kartice "Pozadina" i "Efekti" na zaslonu sadrže sažete informacije.

Pozadinska kartica pruža raspone u stopama pozadinske izloženosti zbog prirodnih radionuklida. Podaci su izvedeni iz objavljenih radova. Za procjenu treba koristiti integrirani pristup ERICA inkrementalne doze samo od ljudskih aktivnosti. Ako brzine doze procijenjene unutar razine 2 rezultiraju RQ vrijednostima većim od 1, ali su beznačajne u veličini u odnosu na stope prirodne pozadinske izloženosti, korisnik može zaključiti da postoji zanemariv razlog za zabrinutost [2].

¹⁹ <https://ars.els-cdn.com/content/image/1-s2.0-S0265931X08000118-gr3.jpg> (preuzeto 3.9.2023.)

Ako su koncentracije aktivnosti prirodnih radionuklida dostupne za mjesto procjene, procjenitelj bi mogao procijeniti stope apsorbirane doze specifične za to mjesto radi usporedbe s brzinama doza koje proizlaze iz izloženosti radionuklidima iz antropogenih izvora (ali ih ne bi trebao dodati procjeni). Za mjesta koja se procjenjuju na TNORM kontaminaciju, procijenjene brzine doze uključivat će doprinos pozadinskih razina radionuklida od interesa. U ovom slučaju ukupne brzine doze treba usporediti sa sažetkom pozadinske brzine doze koja je navedena u okviru razine 2 kako bi se utvrdilo je li povećana doza vjerojatno zabrinjavajuća [41].

Tablica 23. Pozadinska kartica iz alata Erica 2.0

The screenshot shows a software window with a menu bar (Risk, Background, Effects, Tables, Plots, Rules, Record decision) and a title bar. Below the menu, there is a text box stating "This tab contains summarise background dose rates." and a sub-header "Weighted absorbed dose [$\mu\text{Gy h}^{-1}$]" in a grey box. The main content is a table with four columns: Reference organism, Typical value, and Minimum. The table lists various organisms and their corresponding dose rates.

Reference organism	Typical value	Minimum
Amphibian	2.80E-1	1.20E-1
Annelid	6.10E-1	2.20E-1
Arthropod - detritivorous		
Bird	2.40E-1	8.80E-2
Flying insects	5.10E-1	1.10E-1
Grasses & Herbs	5.30E-1	2.30E-1
Lichen & Bryophytes	N/A	N/A
Mammal - large	6.90E-2	5.50E-2
Mammal - small-burrowing	1.20E-1	9.30E-2
Mollusc - gastropod		
Reptile		
Shrub		
Tree	6.90E-2	4.10E-2

Kartica učinaka sadrži tablicu s informacijama o poznatim brzinama doza pri kojima je uočen biološki učinak (MB – morbiditet, MT – mortalitet, smrtnost, RC – reproduktivna sposobnost, MUT - mutacija) ionizirajućeg zračenja na živu biotu provođenjem pokusa ili terenski kontrolirane studije. Tablice su konstruirane kako bi pružile kratku izjavu o vrstama bioloških učinaka koje se mogu pojaviti pri određenim brzinama doza i na temelju informacija zaključiti o predviđenim brzinama doza izračunatim u razini 2 za odabrane referentne organizme. Na temelju stručne procjene učinci su ocijenjeni ili bez učinka, manji, umjereni, veliki ili teški [41].

Izračunate ukupne ponderirane brzine apsorbirane doze DR, očekivane vrijednosti kvocijenta rizika RQ_{exp} i konzervativne vrijednosti kvocijenta rizika RQ_{cons} za 8 lokacija Brodsko-posavske županije:

Tablica 24. lokacija Trmakovac

Total Dose Rate and Risk Quotient

For at least one reference organism the probability of exceeding the selected screening dose rate is above the probability selected. We recommend you review your assessment and results.

Uncertainty Factor = 3.0; This tests for 5% probability of exceeding the dose screening value, assuming that the RQ distribution is exponential.

For assessments that include Ra-226 or Th-228, the contribution from radon (Rn-222) and thoron (Rn-220) in decay chains has been excluded as the primary dose contribution

Organism	Total Dose Rate per organism [μGy h ⁻¹]	Screening Value [μGy h ⁻¹]	Risk Quotient (expected value) [unitless]	Risk Quotient (conservative value) [unitless]
Amphibian	1.00E0	1.00E1	1.00E-1	3.00E-1
Annelid	1.24E0	1.00E1	1.24E-1	3.73E-1
Arthropod - detritivorous	1.41E0	1.00E1	1.41E-1	4.22E-1
Bird	2.07E-1	1.00E1	2.07E-2	6.22E-2
Flying insects	2.82E-1	1.00E1	2.82E-2	8.47E-2
Grasses & Herbs	1.03E0	1.00E1	1.03E-1	3.09E-1
Lichen & Bryophytes	5.44E0	1.00E1	5.44E-1	1.63E0
Mammal - large	4.61E-1	1.00E1	4.61E-2	1.38E-1
Mammal - small-burrowing	4.78E-1	1.00E1	4.78E-2	1.43E-1
Mollusc - gastropod	1.74E-1	1.00E1	1.74E-2	5.23E-2
Reptile	1.00E0	1.00E1	1.00E-1	3.00E-1
Shrub	1.83E0	1.00E1	1.83E-1	5.48E-1
Tree	1.25E-1	1.00E1	1.25E-2	3.75E-2

Tablica 25. lokacija Davor

Risk Background Effects Tables Plots Rules Record decision

Total Dose Rate and Risk Quotient

For all reference organisms the probability of exceeding the selected screening dose rate is below the probability selected. You may justifiably exit the assessment at this stage.

Uncertainty Factor = 3.0; This tests for 5% probability of exceeding the dose screening value, assuming that the RQ distribution is exponential.

For assessments that include Ra-226 or Th-228, the contribution from radon (Rn-222) and thoron (Rn-220) in decay chains has been excluded as the primary dose contribution

Organism	Total Dose Rate per organism [μGy h ⁻¹]	Screening Value [μGy h ⁻¹]	Risk Quotient (expected value) [unitless]	Risk Quotient (conservative value) [unitless]
Amphibian	4.96E-1	1.00E1	4.96E-2	1.49E-1
Annelid	6.25E-1	1.00E1	6.25E-2	1.88E-1
Arthropod - detritivorous	7.11E-1	1.00E1	7.11E-2	2.13E-1
Bird	1.04E-1	1.00E1	1.04E-2	3.12E-2
Flying insects	1.40E-1	1.00E1	1.40E-2	4.20E-2
Grasses & Herbs	4.92E-1	1.00E1	4.92E-2	1.48E-1
Lichen & Bryophytes	2.68E0	1.00E1	2.68E-1	8.04E-1
Mammal - large	2.26E-1	1.00E1	2.26E-2	6.79E-2
Mammal - small-burrowing	2.36E-1	1.00E1	2.36E-2	7.07E-2
Mollusc - gastropod	8.29E-2	1.00E1	8.29E-3	2.49E-2
Reptile	4.96E-1	1.00E1	4.96E-2	1.49E-1
Shrub	9.05E-1	1.00E1	9.05E-2	2.72E-1
Tree	6.30E-2	1.00E1	6.30E-3	1.89E-2

Tablica 26. lokacija Rešetari

Risk Background Effects Tables Plots Rules Record decision

Total Dose Rate and Risk Quotient

For at least one reference organism the probability of exceeding the selected screening dose rate is above the probability selected. We recommend you review your assessment and results.

Uncertainty Factor = 3.0; This tests for 5% probability of exceeding the dose screening value, assuming that the RQ distribution is exponential.

For assessments that include Ra-226 or Th-228, the contribution from radon (Rn-222) and thoron (Rn-220) in decay chains has been excluded as the primary dose contribution

Organism	Total Dose Rate per organism [μGy h ⁻¹]	Screening Value [μGy h ⁻¹]	Risk Quotient (expected value) [unitless]	Risk Quotient (conservative value) [unitless]
Amphibian	9.24E-1	1.00E1	9.24E-2	2.77E-1
Annelid	1.39E0	1.00E1	1.39E-1	4.16E-1
Arthropod - detritivorous	1.71E0	1.00E1	1.71E-1	5.12E-1
Bird	2.25E-1	1.00E1	2.25E-2	6.74E-2
Flying insects	2.74E-1	1.00E1	2.74E-2	8.23E-2
Grasses & Herbs	1.01E0	1.00E1	1.01E-1	3.02E-1
Lichen & Bryophytes	6.58E0	1.00E1	6.58E-1	1.97E0
Mammal - large	4.47E-1	1.00E1	4.47E-2	1.34E-1
Mammal - small-burrowing	4.59E-1	1.00E1	4.59E-2	1.38E-1
Mollusc - gastropod	1.68E-1	1.00E1	1.68E-2	5.05E-2
Reptile	9.26E-1	1.00E1	9.26E-2	2.78E-1
Shrub	1.84E0	1.00E1	1.84E-1	5.53E-1
Tree	1.54E-1	1.00E1	1.54E-2	4.61E-2

Tablica 27. lokacija Cernička Šagovina

For at least one reference organism the probability of exceeding the selected screening dose rate is above the probability selected. We recommend you review your assessment and results.

Uncertainty Factor = 3.0; This tests for 5% probability of exceeding the dose screening value, assuming that the RQ distribution is exponential.

For assessments that include Ra-226 or Th-228, the contribution from radon (Rn-222) and thoron (Rn-220) in decay chains has been excluded as the primary dose contri

Organism	Total Dose Rate per organism [μGy h ⁻¹]	Screening Value [μGy h ⁻¹]	Risk Quotient (expected value) [unitless]	Risk Quotient (conservative value) [unitless]
Amphibian	1.15E0	1.00E1	1.15E-1	3.45E-1
Annelid	1.42E0	1.00E1	1.42E-1	4.26E-1
Arthropod - detritivorous	1.60E0	1.00E1	1.60E-1	4.79E-1
Bird	2.38E-1	1.00E1	2.38E-2	7.13E-2
Flying insects	3.24E-1	1.00E1	3.24E-2	9.72E-2
Grasses & Herbs	1.20E0	1.00E1	1.20E-1	3.59E-1
Lichen & Bryophytes	6.16E0	1.00E1	6.16E-1	1.85E0
Mammal - large	5.29E-1	1.00E1	5.29E-2	1.59E-1
Mammal - small-burrowing	5.49E-1	1.00E1	5.49E-2	1.65E-1
Mollusc - gastropod	1.98E-1	1.00E1	1.98E-2	5.93E-2
Reptile	1.15E0	1.00E1	1.15E-1	3.45E-1
Shrub	2.10E0	1.00E1	2.10E-1	6.30E-1
Tree	1.42E-1	1.00E1	1.42E-2	4.27E-2

Tablica 28. lokacija Podvrško

Total Dose Rate and Risk Quotient

For at least one reference organism the probability of exceeding the selected screening dose rate is above the probability selected. We recommend you review your assessment and results.

Uncertainty Factor = 3.0; This tests for 5% probability of exceeding the dose screening value, assuming that the RQ distribution is exponential.

For assessments that include Ra-226 or Th-228, the contribution from radon (Rn-222) and thoron (Rn-220) in decay chains has been excluded as the primary dose contri

Organism	Total Dose Rate per organism [μGy h ⁻¹]	Screening Value [μGy h ⁻¹]	Risk Quotient (expected value) [unitless]	Risk Quotient (conservative value) [unitless]
Amphibian	1.02E0	1.00E1	1.02E-1	3.05E-1
Annelid	1.41E0	1.00E1	1.41E-1	4.22E-1
Arthropod - detritivorous	1.67E0	1.00E1	1.67E-1	5.02E-1
Bird	2.28E-1	1.00E1	2.28E-2	6.84E-2
Flying insects	2.94E-1	1.00E1	2.94E-2	8.82E-2
Grasses & Herbs	1.09E0	1.00E1	1.09E-1	3.26E-1
Lichen & Bryophytes	6.48E0	1.00E1	6.48E-1	1.95E0
Mammal - large	4.68E-1	1.00E1	4.68E-2	1.40E-1
Mammal - small-burrowing	4.88E-1	1.00E1	4.88E-2	1.46E-1
Mollusc - gastropod	1.81E-1	1.00E1	1.81E-2	5.43E-2
Reptile	1.02E0	1.00E1	1.02E-1	3.05E-1
Shrub	1.95E0	1.00E1	1.95E-1	5.86E-1
Tree	1.48E-1	1.00E1	1.48E-2	4.45E-2

Tablica 29. lokacija Kapela/Batrina

Organism	Total Dose Rate per organism [μGy h ⁻¹]	Screening Value [μGy h ⁻¹]	Risk Quotient (expected value) [unitless]	Risk Quotient (conservative value) [unitless]
Amphibian	1.35E0	1.00E1	1.35E-1	4.06E-1
Annelid	1.64E0	1.00E1	1.64E-1	4.93E-1
Arthropod - detritivorous	1.84E0	1.00E1	1.84E-1	5.51E-1
Bird	2.75E-1	1.00E1	2.75E-2	8.26E-2
Flying insects	3.79E-1	1.00E1	3.79E-2	1.14E-1
Grasses & Herbs	1.38E0	1.00E1	1.38E-1	4.13E-1
Lichen & Bryophytes	7.03E0	1.00E1	7.03E-1	2.11E0
Mammal - large	6.17E-1	1.00E1	6.17E-2	1.85E-1
Mammal - small-burrowing	6.41E-1	1.00E1	6.41E-2	1.92E-1
Mollusc - gastropod	2.29E-1	1.00E1	2.29E-2	6.88E-2
Reptile	1.35E0	1.00E1	1.35E-1	4.06E-1
Shrub	2.44E0	1.00E1	2.44E-1	7.33E-1
Tree	1.63E-1	1.00E1	1.63E-2	4.89E-2

Tablica 30. lokacija Adžamovci

Organism	Total Dose Rate per organism [μGy h ⁻¹]	Screening Value [μGy h ⁻¹]	Risk Quotient (expected value) [unitless]	Risk Quotient (conservative value) [unitless]
Amphibian	8.95E-1	1.00E1	8.95E-2	2.68E-1
Annelid	1.11E0	1.00E1	1.11E-1	3.32E-1
Arthropod - detritivorous	1.25E0	1.00E1	1.25E-1	3.76E-1
Bird	1.84E-1	1.00E1	1.84E-2	5.52E-2
Flying insects	2.52E-1	1.00E1	2.52E-2	7.57E-2
Grasses & Herbs	9.34E-1	1.00E1	9.34E-2	2.80E-1
Lichen & Bryophytes	4.90E0	1.00E1	4.90E-1	1.47E0
Mammal - large	4.08E-1	1.00E1	4.08E-2	1.23E-1
Mammal - small-burrowing	4.25E-1	1.00E1	4.25E-2	1.28E-1
Mollusc - gastropod	1.58E-1	1.00E1	1.58E-2	4.74E-2
Reptile	8.95E-1	1.00E1	8.95E-2	2.69E-1
Shrub	1.64E0	1.00E1	1.64E-1	4.91E-1
Tree	1.11E-1	1.00E1	1.11E-2	3.32E-2

Tablica 31. lokacija Vrpolje

Organism	Total Dose Rate per organism [μGy h ⁻¹]	Screening Value [μGy h ⁻¹]	Risk Quotient (expected value) [unitless]	Risk Quotient (conservative value) [unitless]
Amphibian	1.23E0	1.00E1	1.23E-1	3.69E-1
Annelid	1.62E0	1.00E1	1.62E-1	4.87E-1
Arthropod - detritivorous	1.89E0	1.00E1	1.89E-1	5.66E-1
Bird	2.67E-1	1.00E1	2.67E-2	8.01E-2
Flying insects	3.52E-1	1.00E1	3.52E-2	1.06E-1
Grasses & Herbs	1.28E0	1.00E1	1.28E-1	3.85E-1
Lichen & Bryophytes	7.23E0	1.00E1	7.23E-1	2.17E0
Mammal - large	5.68E-1	1.00E1	5.68E-2	1.70E-1
Mammal - small-burrowing	5.90E-1	1.00E1	5.90E-2	1.77E-1
Mollusc - gastropod	2.12E-1	1.00E1	2.12E-2	6.37E-2
Reptile	1.23E0	1.00E1	1.23E-1	3.70E-1
Shrub	2.31E0	1.00E1	2.31E-1	6.92E-1
Tree	1.68E-1	1.00E1	1.68E-2	5.03E-2

Za sve kopnene organizme (vodozemce, anelide, člankonošce, ptice, leteće insekte, trave, velike i male sisavce, reptile, grmlje, drvo, puž) očekivani i konzervativni RQ < 1 pa za njih nema radiološke opasnosti, dok je za mahovine i lišajeve očekivani bio manji od 1, a konzervativni veći od 1 ($R_{cons} > 1$, a $R_{exp} < 1$). Zbog toga se moralo dodatno istražiti o radiološkim učincima na mahovine i lišajeve. Najveća očekivana vrijednost izračunata je za lokaciju Vrpolje $R_{exp} = 0.72$, a ujedno je i konzervativna vrijednost najveća $R_{cons} = 2.17$. Maksimalna ukupna ponderirana brzina doze na istoj toj lokaciji iznosi oko 7.23 μGy/h. Jedino su na području naselja Davor i očekivane i konzervativne vrijednosti za sve referentne organizme manje od 1 te možemo zaključiti da je za tu lokaciju rizik za okoliš zanemariv.

Za sva ostala mjesta potrebno je dodatno potražiti informacije o učincima na lišajeve i mahovine kako bi se mogli protumačiti rezultati procjene na razini 2. Mahovine i lišajevi vrlo su otporni na izloženost zračenju i smatraju se među najotpornijim biljnim skupinama, dok su drveće, grmlje i zeljaste biljke najosjetljivije. Što su organizmi evolucijski razvijeniji, to su osjetljiviji na zračenje.

Pošto se smatraju veoma otpornim biljnim organizmima, možemo zaključiti da je radiološko opterećenje biote nisko na svim 8 lokacija (Adžamovci, Trnakovac, Davor, Rešetari, Šagovina Cernička, Podvrško, Kapela Batrina i Vrpolje) Brodsko-posavske županije.

7.3. Procjena razine 3

Razina 3 koristi se kada nije moguće sa sigurnošću zaključiti da je rizik od utjecaja ionizirajućeg zračenja ispod zabrinjavajuće razine na razini 1 i/ili 2. Procjena razine 3 ne daje jednostavan odgovor da/ne, niti je stopa inkrementalne doze probira od 10 $\mu\text{Gy/h}$ prikladna s obzirom na krajnju točku procjene. Nema posebnih smjernica koje govore kako provoditi procjenu na razini 3, zato u obzir treba uzeti podatke o biološkim učincima koji se nalaze u bazi podataka FREDERICA. Procjenitelj treba biti veoma iskusan i obrazovan.

Razina 3 omogućuje procjenitelju:

- provođenje detaljne procjenu dane situacije na zahtjev dionika ili zakonodavstva
- poboljšanje formulacije problema korištenjem vlastitog modela disperzije
- unošenje funkcije distribucije vjerojatnosti za različite ulazne podatke i parametre za izvođenje procjene vjerojatnosti izloženosti pri određenoj brzini doze
- generiranje informacije o unutarnjoj, vanjskoj i ukupnoj brzini doze koju prima svaki organizam; moguće je izravno usporediti s trenutnim podacima o učincima ionizirajućeg zračenja na vrste od interesa
- pristupiti zbirci znanstvene literature o učincima ionizirajućeg zračenja koja je prikupljena unutar baze podataka FREDERICA
- mehanizam za određivanje vjerojatne veličine i vjerojatnosti izloženosti kako bi utvrdio kvocijent rizika (zabrinjavajući, ne zna se je li zabrinjavajući ili nije zabrinjavajući).

Razina 3 omogućuje izvođenje potpunih probabilističkih izračuna putem primjene Monte Carlo simulacija. Postoji isti stupanj fleksibilnosti na razini 3 kao onaj uključen u razinu 2 u smislu da procjenitelj može uređivati i pregledavati različite parametre koji se koriste u kasnijim izračunima. Osim toga, ulazni podaci, K_d vrijednosti, CR vrijednosti i težinski faktori zračenja imaju opciju koja korisniku omogućuje dodjeljivanje funkcije distribucije vjerojatnosti [41].

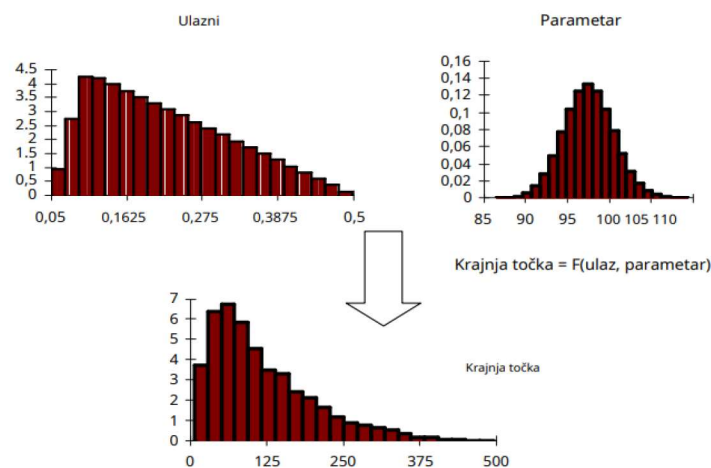
Alat podržava sljedeće vrste distribucije:

- eksponencijalnu (potreban unos aritmetičke sredine, s donjim graničnim i gornjim graničnim vrijednostima)

- normalna (obavezni unosi aritmetičke sredine i standardne devijacije, s donjim graničnim i gornjim graničnim vrijednostima)
- trokutasta (obavezni unosi minimalne, maksimalne i modne vrijednosti)
- uniformna (obavezni unosi minimalne i maksimalne vrijednosti)
- logaritamsko-normalna (obavezni unosi aritmetička sredina i standardna devijacija, uz izborne donje i gornje granične vrijednosti)
- log-trokutasta (obavezni unosi minimalne, maksimalne i modne vrijednosti)
- log-uniformna (obavezni unosi minimalne i maksimalne vrijednosti) [41].

Nesigurnosti za radioekološke podatke, kao što su omjeri koncentracije (CR) i koeficijenti distribucije (K_d), često su dobro prilagođene log-normalnim distribucijama pa se ona najčešće i koristi u usporedbi s eksponencijalnom.

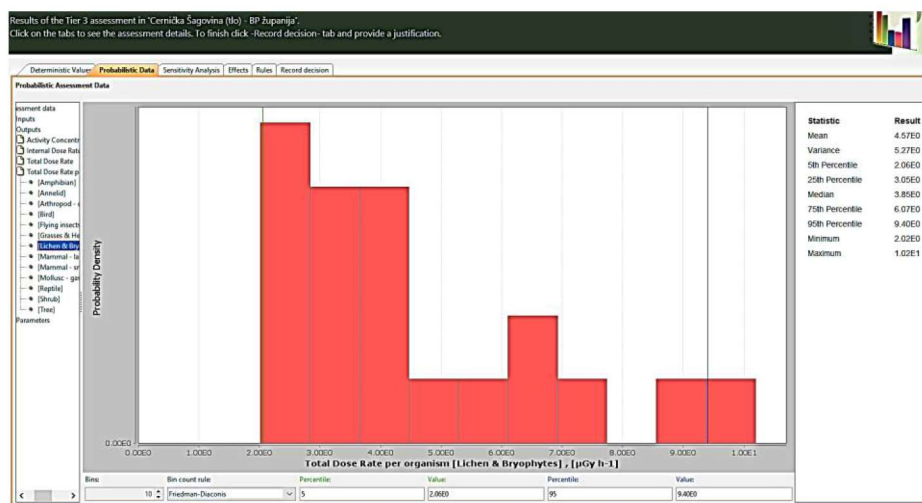
Za procjenu nesigurnosti krajnjih točaka procjene izloženosti, nesigurnosti u ulaznim podacima i parametrima moraju se prenositi kroz model. Kada se analitičke metode ne mogu primijeniti, nesigurnosti se određuju pomoću Monte Carlo simulacije. Osnove rada Monte Carlo simulacije: bodovne procjene u jednadžbi zamjenjuju se funkcijama gustoće raspodjele vjerojatnosti, uzorci se nasumično biraju iz svake raspodjele, a rezultati se kombiniraju, obično u obliku funkcije gustoće vjerojatnosti ili kumulativne funkcije raspodjele vjerojatnosti.



Slika 34. Monte Carlo simulacije za izračunavanje krajnje točke koja se izračunava funkcijom F jednog ulaza i jednog parametra [2]

Korisnik može odabrati broj simulacija korištenih u izračunu. Zaslona za unos razine 3 omogućuje korisniku da unos koncentracije aktivnosti medija ili biote koje su prikupljene za korištenje u procjeni. Na ovoj se razini mogu unijeti pojedinačne vrijednosti ili funkcije gustoće raspodjele vjerojatnosti. Nadalje, podaci se unose kao i u razini 2, tj. mora se unijeti najmanje

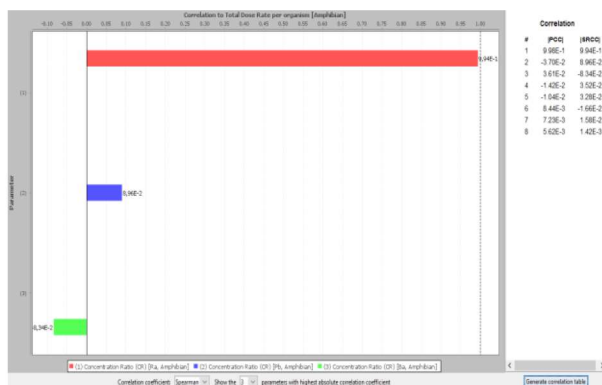
jedan podatak za svaki radionuklid, a ista pravila vrijede i za popunjavanje tablice ulaznih podataka. Mogu se odabrati parametri koji će biti uključeni u probabilističku simulaciju i definirati broj simulacija. Ulazni podaci na razini 3 ne pružaju informacije o kvocijentima rizika jer brzina probirne apsorbirane doze više nije precizno izračunata. Procjenitelj bi morao izračunati brzinu probirne apsorbirane doze koja bi se dalje koristila u procjeni ukupne ponderirane brzine apsorbirane doze po organizmu (program izračuna kolikoj je dozi zračenja izložena svaka pojedina skupina organizama). Kartice s rezultatima podijeljene su na determinističke podatke i vjerojatnosne (probabilističke).



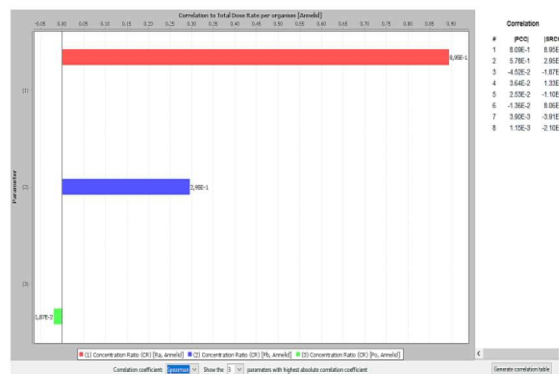
Slika 35. Prikaz vjerojatnosnih rezultata razine 3 (gustoće vjerojatnosti raspodjele ukupne brzine doze za organizam mahovine i lišajevi na tlu Cerničke Šagovine)

Odjeljak s rezultatima razine 3 pruža informacije u vezi s analizom osjetljivosti. Analiza osjetljivosti koristi se za utvrđivanje relativnog doprinosa nesigurnosti ulaznih podataka (koncentracije aktivnosti radionuklida u mediju)/parametara na varijaciju (CR-ova i/ili K_d -ova) i nesigurnosti krajnjih točaka simulacije (ukupna brzina doze po organizmu). Izračunavaju se dva koeficijenta korelacije: Spearmanov rang koeficijent korelacije (SRCC) i Pearsonov koeficijent korelacije (PCC) između ulaza/parametra i krajnje točke (brzine doze). Pearsonov koeficijent korelacije koristi se u slučajevima kada postoji linearni odnos između varijabli, a Spearmanov kada ne postoji linearni odnos između varijabli [41]. Rezultati analize osjetljivosti prikazani su kao dijagram tornada, jednostavnih stupčastih dijagrama gdje se statistika osjetljivosti – PCC ili SRCC – vizualizira okomito prema silaznoj apsolutnoj vrijednosti. Što je traka duža, to je veći učinak parametra na krajnju točku. Parametri koji imaju pozitivne vrijednosti pokazuju pozitivan učinak na krajnju točku, dok oni s negativnim vrijednostima pokazuju negativan učinak [2].

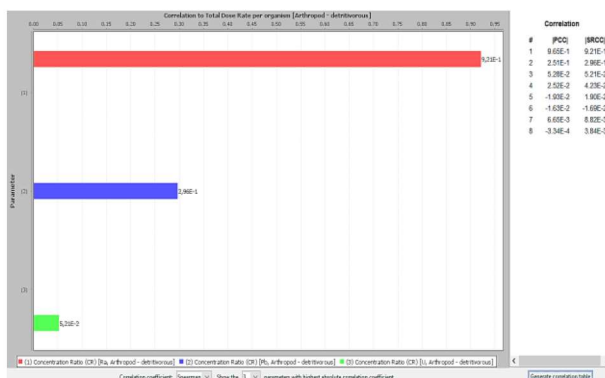
Lokacija Kapela/Batrina ima najveće izmjerene koncentracije radionuklida u tlu. U Tieru 3 ERICA alat izračunao je prema svim probabilističkim računima Spearmanove koeficijente korelacije za svaki pojedini organizam na toj lokaciji. Informacije koje Tier 3 izračuna, statistički su podaci. Budući da se Pearsonov koeficijent korelacije računa u slučaju kada su podatci barem jedne varijable normalno raspoređeni, što u ovom primjeru nije slučaj, izračunat je Spearmanov koeficijent korelacije (SRCC). Spearmanovi koeficijenti korelacije govore o povezanosti dviju varijabla, izmjerenih koncentracija aktivnosti u tlu i utjecaja pojedinog radionuklida na ukupnu dozu zračenja. Vrijednosti koje Spearmanovi koeficijenti mogu poprimiti nalaze se između -1 i +1. Ukoliko Spearmanov koeficijent poprima vrijednost 0, tada nema korelacije između tih dvaju varijabli. Što je vrijednost bliža +1, veza je sve jača i pozitivna. To znači da što je veća vrijednost koncentracije radionuklida u tlu, može se očekivati više radionuklida u organizmu i veći je doprinos tog radionuklida u ukupnoj dozi zračenja. Negativne vrijednosti bliže -1 znače da je povezanost jaka, ali negativna (veća koncentracija radionuklida u tlu, manji je utjecaj na ukupnu dozu). Dobiveni su ovakvi rezultati u Tieru 3:



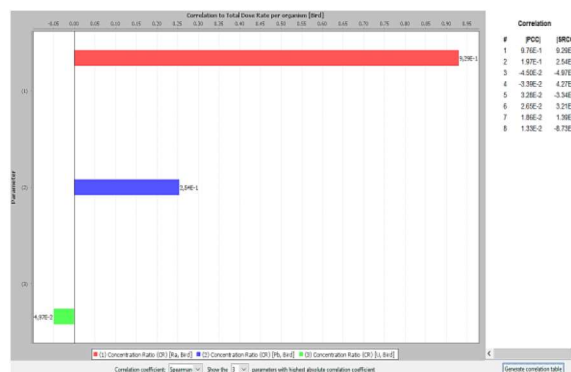
Slika 36. Dijagram tornada za vodozemce



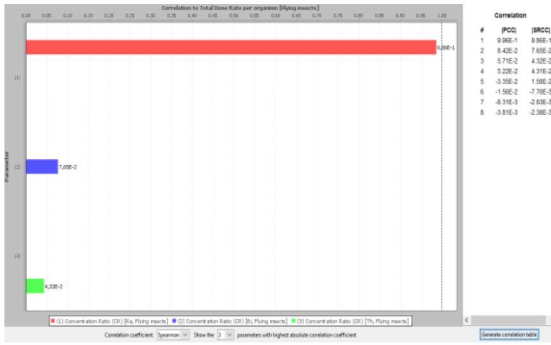
Slika 37. Dijagram tornada za kolutiĉavce



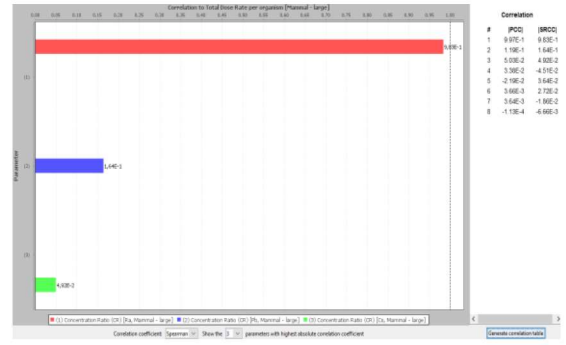
Slika 38. Dijagram tornada za ĉlankonoŝce - detritivori



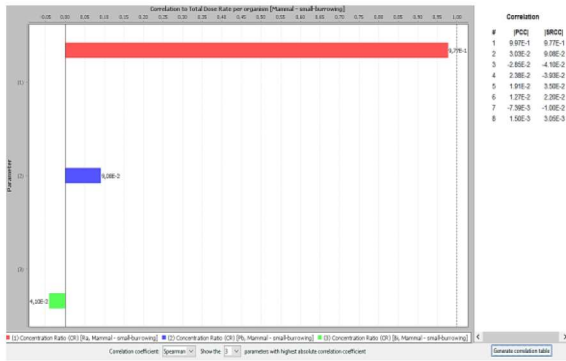
Slika 39. Dijagram tornada za ptice



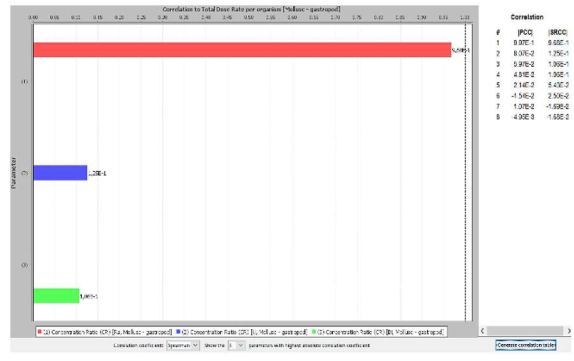
Slika 40. Dijagram tornada za leteće insekte



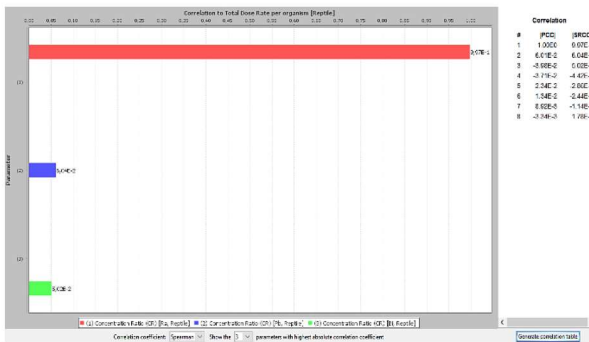
Slika 41. Dijagram tornada za velike sisavce



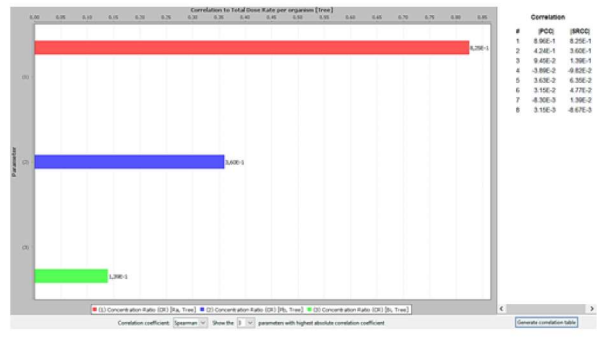
Slika 42. Dijagram tornada za male sisavce kopače



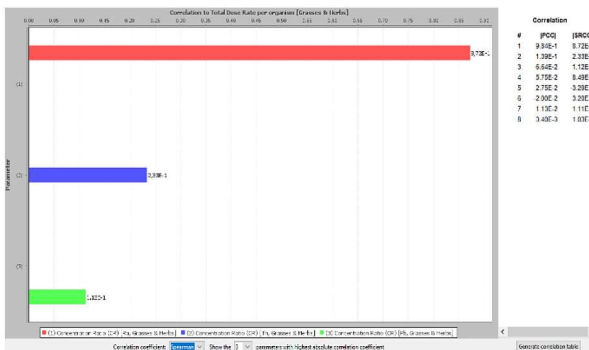
Slika 43. Dijagram tornada za mekušce - puževi



Slika 44. Dijagram tornada za gmazove



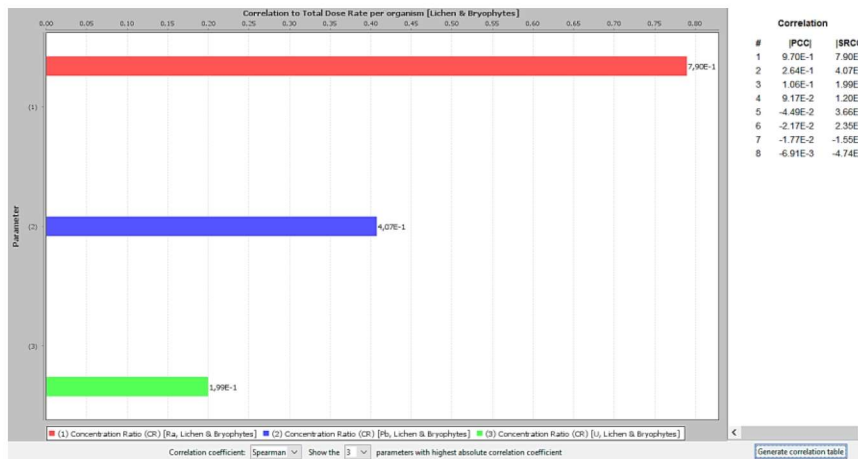
Slika 45. Dijagram tornada za stablo



Slika 46. Dijagram tornada za trave i bilje



Slika 47. Dijagram tornada za gmlje



Slika 48. Dijagram tornada za mahovine i lišajeve

Za svaki organizam prikazan je dijagram tornada (Spearmanovi koeficijenti za parametar CR i njihovi utjecaji na ukupnu dozu zračenja po organizmu). Na slikama su vidljiva prva 3 parametra (CR-ovi radionuklida koji najviše utječu na ukupnu dozu): crveni, plavi i zeleni tornado. Preostalih 5 poprimaju izrazito niske vrijednosti (njihov utjecaj je beznačajan) pa nisu prikazani na dijagramima. Iz izračunatih Spearmanovih koeficijenata korelacije može se zaključiti da u ukupnoj dozi zračenja za svaki organizam najviše doprinosi radij ^{226}Ra (najveći utjecaj na ukupnu dozu zračenja ima ^{226}Ra) jer je CR od ^{226}Ra parametar s najvećim SRCC-om (crveni stupac). Pod radiološkim rizikom iz Tiera 2 bile su samo mahovine i lišajevi. Svi ostali organizmi nisu bili ugroženi od radiološkog zračenja. Za mahovine i lišajeve, kao što se može vidjeti s gornje Slike 48., SRCC od ^{226}Ra iznosi je +0,79 (povezanost između koncentracija aktivnosti radija u tlu i ukupne doze vrlo je dobra i pozitivna) te najviše doprinosi ukupnoj dozi zračenja nakon čega po utjecaju slijedi olovo ^{210}Pb čiji je SRCC = +0,407 (umjerena je povezanost između olova i ukupne doze zračenja). Sljedeći radionuklid koji neznatno doprinosi ukupnoj dozi zračenja jest ^{238}U čiji je SRCC = +0,199. Za grmlje (Slika 47.), SRCC od ^{226}Ra iznosi je +0,944 (jaka povezanost) koji je najviše doprinio ukupnoj dozi zračenja, nakon čega slijedi SRCC od ^{210}Pb koji iznosi +0,173 (neznatna povezanost, može se reći da gotovo ne postoji). Kod trava i bilja (niskog raslinja) SRCC od ^{226}Ra iznosi +0,872 (vrlo dobra povezanost), drugi najviši SRCC od ^{232}Th = +0,233 (slaba povezanost), a treći je SRCC od ^{210}Pb = +0,112 (neznatna povezanost). Iz dijagrama tornada za stabla (Slika 39.) može se iščitati da je najveći doprinos također ^{226}Ra čiji SRCC iznosi +0,825 (vrlo dobra povezanost), drugi po utjecaju jest ^{210}Pb čiji SRCC iznosi +0,360 (slaba povezanost), a treći po utjecaju, iako neznatan, jest ^{210}Bi čiji SRCC iznosi 0,139 (neznatna povezanost).

SRCC od ^{226}Ra za gmazove iznosi +0,997 (jaka povezanost), zatim slijedi drugi po veličini doprinos od ^{210}Pb čiji je SRCC = +0,0604 (neznatna povezanost). Najveći utjecaj za organizam

puž ima ^{226}Ra čiji SRCC = +0,968, dok su utjecaji ^{238}U (SRCC = +0,125) i ^{210}Bi (SRCC = +0,106) neznatni. Najveći utjecaj za male sisavce ima ^{226}Ra čiji SRCC = +0,977 (jaka povezanost), dok su utjecaji ^{210}Pb (SRCC = +0,091) i ^{210}Bi (SRCC = -0,041) neznatni. Za velike sisavce najveći utjecaj ima ^{226}Ra čiji SRCC = +0,983 (jaka povezanost), dok su utjecaji ^{210}Pb (SRCC = +0,164) i ^{137}Cs (SRCC = +0,049) neznatni. Nadalje, za leteće insekte utjecaj ^{226}Ra iznosi +0,986 (jaka povezanost), nakon čega slijede neznatni utjecaji ^{210}Bi (SRCC = +0,077) i ^{232}Th (SRCC = +0,043). Iz dijagrama tornada za ptice (Slika 39.) može se iščitati da je najveći doprinos također ^{226}Ra čiji SRCC iznosi +0,929 (jaka povezanost), drugi po utjecaju jest ^{137}Cs čiji SRCC iznosi +0,254 (slaba povezanost), a treći po utjecaju, iako neznatan, jest ^{238}U čiji SRCC iznosi -0,050. Na Slici 38. uočavamo da je ^{226}Ra najviše doprinio ukupnoj dozi zračenja člankonožaca (SRCC = +0,921 što je jaka povezanost između varijabli), a utjecaj drugog po veličini parametra ^{210}Pb (SRCC = +0,296) slab je. Kod kolutičavaca SRCC od ^{226}Ra iznosi + 0,895 (vrlo dobra povezanost), drugi najviši SRCC od ^{210}Pb = +0,295 (slaba povezanost), a treći je SRCC od ^{210}Po = - 0,019 (neznatna povezanost). U konačnici za vodozemce najveći utjecaj ima ^{226}Ra čiji SRCC = +0,994 (jaka povezanost), dok su utjecaji ^{210}Pb (SRCC = +0,090) i ^{137}Ba (SRCC = -0,083) neznatni. Može se zaključiti da najveći udio u dozi pripada prirodnim radionuklidima. Na temelju prikazanih rezultata jasno je da prirodni radionuklid radij ^{226}Ra najviše doprinosi ukupnoj dozi zračenja kod svih analiziranih organizama. Spearmanovi koeficijenti korelacije (SRCC) dosljedno pokazuju visoku povezanost između koncentracija radija u tlu i ukupne doze zračenja, s najvišim vrijednostima za različite organizme: od mahovina i lišajeva (SRCC = +0,79) do velikih sisavaca (SRCC = +0,983). Drugi radionuklidi poput olova ^{210}Pb i uranija ^{238}U imaju znatno manji utjecaj na ukupnu dozu zračenja, pri čemu njihovi SRCC-ovi rijetko prelaze vrijednost od +0,4, a često su i neznatni.

Popratne informacije dostupne na razini 3 za tumačenje brzina doza predviđenih u procjeni jesu podaci o biološkim učincima prikupljeni iz znanstvene literature unutar baze podataka FREDERICA. Kartica s efektima sadrži izravnu vezu na online bazu podataka FREDERICA za koju je potrebna internetska veza. FREDERICA sadrži sljedeće informacije: informacije iz literature iz koje su preuzeti podaci o brzini doze, pojedinosti o provedenom eksperimentu kako bi se dobili podaci o učinku brzine doze, informacije o brzini doze pri kojoj je uočen biološki učinak u pokusu ili terenskoj studiji, vrsti na kojoj je pokus proveden i krajnja točka (morbiditet, mortalitet, reproduktivna sposobnost, mutacija) te kratku izjavu o vrsti promatranog biološkog učinka [41].

8. ZAKLJUČAK

Iz rezultata mjerenja koncentracija aktivnosti prirodnih i antropogenih radionuklida u uzorcima tla procjenjivali smo radiološko opterećenje okoliša u Brodsko-posavskoj županiji na 8 različitih lokacija: Adžamovci, Trakovac, Davor, Rešetari, Šagovina Cernička, Podvrško, Kapela Batrina i Vrpolje). Budući da se ljudi na tim područjima pretežito bave poljoprivrednom proizvodnjom, od ključne je važnosti bilo utvrditi predstavljaju li koncentracije aktivnosti najvažnijih prirodnih i antropogenih radionuklida rizik za neljudsku biotu, a samim time i za ljude budući da hranom i udisanjem unose radionuklide u svoj organizam koji mogu napraviti veliku štetu. Za izračun parametara rizika za neljudsku biotu zbog vanjske izloženosti gama zračenju, odnosno radijeva ekvivalenta aktivnost Ra_{eq} i indeks vanjske opasnosti H_{ex} , korišteni su dobiveni rezultati o koncentracijama aktivnosti. Izračunate vrijednosti ovih parametara ne ukazuju ni na koju radiološku opasnost.

Podaci o koncentraciji aktivnosti također su korišteni za procjenu radiološkog rizika za kopnenu biotu pomoću alata ERICA. Tier 1 alata ERICA ukazao je na potencijalni radiološki rizik za lišajeve i mahovine uglavnom zbog ^{226}Ra . Rezultati proračuna razine 2 sugeriraju da je radiološki rizik zbog ^{226}Ra zapravo nizak čak i ako se uzme u obzir konzervativni kvocijent rizika budući da su lišajevi i mahovine radiološki najotpornije biljke, u odnosu na neke druge biljke, ali su zbog svoje građe odličan indikator radiološkoga onečišćenja i biljke su od primarnog interesa u slučaju akcidenta, pa prema tome nema potrebe prijeći na Tier 3.

Ipak, provedena je kalkulacija u Tieru 3 jer su nas sa znanstvene točke gledišta zanimali rezultati koje će prikazati Tier 3. Uzeli smo lokaciju Kapela/Batrina koja je imala najveće izmjerene koncentracije aktivnosti kako bismo prikazali „najgori scenarij“. Vidjeli smo da je Spearmanov koeficijent za ^{226}Ra bio najveći za svaki organizam što nam govori da je ^{226}Ra imao najveći utjecaj na ukupnu dozu zračenja, nakon čega slijedi ^{210}Pb .

Izuzev mahovina i lišajeva, svi ostali organizmi nisu pod značajnim radiološkim rizikom iz Tiera 2, što ukazuje na lokalizirani utjecaj radija na ove specifične organizme. Mahovine i lišajevi pokazali su umjerenu povezanost s olovom ^{210}Pb (SRCC = +0,407), dok su za druge organizme, poput grmlja i trava, drugi radionuklidi imali slab ili neznan utjecaj. Za organizme kao što su ptice, gmazovi, puževi, te mali i veliki sisavci, radij ^{226}Ra uvijek je imao najviši SRCC, dok su utjecaji drugih radionuklida bili minimalni.

Koncentracije radona u tlu i propusnost tla mjereni su u blizini dječjih vrtića, osnovnih i srednjih škola na 13 lokacija na području Brodsko-posavske županije u Hrvatskoj. Geogeni radonski potencijal izračunat je za svaku lokaciju. Prosječna koncentracija radona u tlu i njegova standardna devijacija bila je $53 \pm 28 \text{ kBq/m}^3$, dok je izračunati GRP iznosio 27 ± 17 što ga svrstava u srednju klasu prema potklasifikaciji, iako postoje područja (5 lokacija) s visokim i vrlo visokim GRP-om. S obzirom na rezultate provedenog t-testa sa sigurnošću od 95% možemo tvrditi da ne postoji statistički značajna razlika između izmjerenih koncentracija radona u tlu i radija u tlu, odnosno da su te dvije grupe značajno korelirane.

9. LITERATURA

- [1] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), Sources and Effects of Ionising Radiation. UNSCEAR 2008 report to the General Assembly with Scientific Annexes, Vol II., New York: United Nations, 2011, pp. 223-297.
- [2] N. Beresford, J. Brown, D. Copplestone, J. Garnier-Laplace, B. Howard, C. M. Larsson, D. Oughton, G. Pröhl i I. Zinger, »D-ERICA: An Integrated Approach to the assessment and management of environmental risks from ionising radiation. Description of purpose, methodology and application,« European Commission Community Research, Stockholm, 2007.
- [3] B. Petrincec, M. Poje Sovilj, D. Babić, T. Meštrović, I. Miklavčić, V. Radolić, D. Stanić, B. Vuković i M. Šoštarić, »Assessing the radiological load on the environment in the middle Danube river basin on the basis of a study of the Kopački Rit Nature Park, Croatia,« *Radiation and Environmental Biophysics*, svez. 57., p. 285–292., 5. lipanj 2018.
- [4] V. Radolić, I. Miklavčić, M. Poje Sovilj, D. Stanić, B. Petrincec i B. Vuković, »The natural radioactivity of Istria, Croatia,« *Radiation Physics and Chemistry*, svez. 155, pp. 332-340., veljača 2019.
- [5] V. Radolić, M. Poje Sovilj, D. Stanić i I. Miklavčić, »Radon in soil gas and constructed geogenic radon potential in Croatia,« u *Proceedings XXIX SYMPOSIUM DZZSCG*, Beograd, 2017.
- [6] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), Sources and Effects of Ionising Radiation, UNSCEAR 2008 report to the General Assembly with Scientific Annexes, Vol I., New York: United Nations, 2010.
- [7] G. Portillo, »Radiacion cosmica,« *Meteorologia en Red*, 9. svibanj 2024. [Mrežno]. Available: <https://www.meteorologiaenred.com/radiacion-cosmica.html>. [Pokušaj pristupa 12. siječanj 2024].
- [8] D. Hrupec, »Kako opažamo visokoenergijske gama-zrake?,« 11. siječanj 2009. [Mrežno]. Available: <https://dariohrupec.org/tekstovi/kako-opazamo-visokoenergijske-kozmicke-gama-zrake/>. [Pokušaj pristupa 12. siječanj 2024].
- [9] U. S. E. P. Agency, »RadTown: Radiation From Solar Activity,« U.S. Environmental Protection Agency, 10. travanj 2024. [Mrežno]. Available: <https://www.epa.gov/radtown/radiation-solar-activity>. [Pokušaj pristupa 12. siječanj 2024].
- [10] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), Sources and Effects of Ionising Radiation. (UNSCEAR) 2000 Report to the General Assembly with Scientific Annexes. Volume I, New York: United Nations, 2000.

- [11] National Oceanic and Atmospheric Administration Space Weather Prediction Center, »Aurora,« National Oceanic and Atmospheric Administration Space Weather Prediction Center, 9. svibanj 2024. [Mrežno]. Available: <https://www.swpc.noaa.gov/phenomena/aurora>. [Pokušaj pristupa 13. siječanj 2024].
- [12] B. Davies, »Cosmic Rays,« 13. travanj 2023. [Mrežno]. Available: <https://www.antarcticglaciers.org/glacial-geology/dating-glacial-sediments-2/cosmogenic-nuclide-dating/cosmic-rays/>. [Pokušaj pristupa 23. lipanj 2023].
- [13] Narodne novine br. 38/18., »Pravilnik o granicama ozračenja, preporučenom doznom ograničenju i procjenjivanju osobnog ozračenja,« 25. travanj 2018. [Mrežno]. Available: https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2018_04_38_739.html. [Pokušaj pristupa 12. rujan 2023].
- [14] J. Magill i J. Galy, Radioactivity, Radionuclides, Radiation, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2005.
- [15] T. Brody, »Protein,« u *Nutritional Biochemistry (Second Edition)*, 2. ur., San Diego, California: Academic Press, 1994, pp. 421-489..
- [16] L. Bencarić, »Kalij i fosfor posebno značajni u gnojidbi plodovitog i lukovičastog povrća,« Agrokлуб Hrvatska, 25. travanj 2021. [Mrežno]. Available: <https://www.agroklub.com/povrcarstvo/kalij-i-fosfor-posebno-znacajni-u-gnojidbi-plodovitog-i-lukovicastog-povrca/67834/>. [Pokušaj pristupa 23. lipanj 2023].
- [17] Wikipedija, »Kalijev klorid,« Wikipedija, 15. travanj 2023. [Mrežno]. Available: https://hr.wikipedia.org/wiki/Kalijev_klorid. [Pokušaj pristupa 5. srpanj 2023].
- [18] T. Jurić, »Prekogrančno zagađenje okoliša između RH i BiH: Tri studije slučaja,« *Socijalna ekologija*, svez. 28., br. 2, pp. 87-116., 27. kolovoz 2019.
- [19] B. Petrinc, I. Tišma, M. Šošarić, M. Poje Sovilj, D. Babić, V. Radolić, I. Miklavčić i B. Vuković, »Current radiological situation in Slavonski Brod, Croatia: is there a reason for concern?,« *Arh Hig Rada Toksikol*, svez. 68, pp. 206-211., 20. rujan 2017.
- [20] International Commission on Radiological Protection (ICRP), »Annals of the ICRP PUBLICATION 103 The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection,« Elsevier, Orlando, Amsterdam, Tokyo, Singapore, 2007.
- [21] Radiology Key, »Interaction of Radiation with Matter,« 16. siječanj 2021. [Mrežno]. Available: <https://radiologykey.com/interaction-of-radiation-with-matter-3/#>. [Pokušaj pristupa 26. travanj 2024].
- [22] Radiology Key, »Interaction of radiation with matter,« 18. travanj 2023. [Mrežno]. Available: <https://radiologykey.com/interaction-of-radiation-with-matter-4/>. [Pokušaj pristupa 26. travanj 2024].
- [23] J. E. Turner, »Interaction of Heavy Charged Particles with Matter,« u *Atoms, Radiation, and Radiation Protection*, 3. ur., Darmstadt, Wiley-VCH, 2007, pp. 109-138..

- [24] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, »Volume I, Annex A: Levels and effects of radiation exposure due to the Nuclear Accident after the 2011 great east Japan,« u *Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation, UNSCEAR 2013 Report to the General Assembly Scientific with Scientific Annexes*, New York, United Nations, 2014, pp. 74-82..
- [25] K. Higley, A. Real i D. Chambers, »Annals of the ICRP, ICRP PUBLICATION 148, Radiation Weighting for Reference Animals and Plants,« Sage, 2021.
- [26] International Commission on Radiological Protection (ICRP), »Principles for Intervention for Protection of the Public in a Radiological Emergency. ICRP Publication 63. Ann. ICRP 22 (4),« Pergamon Press, Oxford, 1991.
- [27] D. Holiaka, S. Fesenko, V. Kashparov , V. Protsak, S. Levchuk i M. Holiaka, »Effects of radiation on radial growth of Scots pine in areas highly affected by the Chernobyl accident,« *Journal of Environmental Radioactivity*, svez. 222, p. 106320, listopad 2020.
- [28] A. Golubev, V. Sikorski i O. Stoliar, »Ionizing radiation long-term impact on biota in water bodies with different levels radioactive contamination in belarusian sector of chernobyl nuclear accident zone,« *Radioprotection*, svez. 46, br. 6, p. 393–399., siječanj 2011.
- [29] M.-A. Jeong i R.-D. Jeong, »Applications of ionizing radiation for the control of postharvest diseases in fresh produce: recent advances,« *Plant Pathology*, svez. 67, br. 1, pp. 18-29., 14. kolovoz 2017.
- [30] K.-W. Jung, S. Lim i Y.-S. Bahn, »Microbial radiation-resistance mechanisms,« *Journal of Microbiology*, svez. 55, br. 7, p. 499–507., 30. lipanj 2017.
- [31] In konzalting d.o.o., »Procjena ugroženosti od požara i tehnološke eksplozije, Brodsko-posavska županija, Usklađivanje – lipanj 2019.,« lipanj 2019. [Mrežno]. Available: https://www.bpz.hr/_Data/Files/190715114049553.pdf. [Pokušaj pristupa 21. kolovoz 2023].
- [32] L. Tomičić, »Demogeografska obilježja Brodsko-posavske županije (Završni rad),« Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet, Zagreb, 2019.
- [33] Agronomski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, »Brodsko-posavska županija: Dokumenti: Razvitak poljoprivrede na području Brodsko-posavske županije,« ožujak 2002. [Mrežno]. Available: <https://www.bpz.hr/images/dokumenti/dokumenti/Studija.pdf>. [Pokušaj pristupa 21. kolovoz 2023].
- [34] v. Radon, »Radon detector RM-2,« RADON v.o.s. corporation, 2010. [Mrežno]. Available: <http://www.radon.eu/rm2u.html>. [Pokušaj pristupa 5. veljača 2024].
- [35] Electricity - Magnetism, »Ionization chamber,« 2024. [Mrežno]. Available: <https://www.electricity-magnetism.org/ionization-chamber/>. [Pokušaj pristupa 15. svibanj 2025].

- [36] J. Kemski, A. Siehl, R. Stegemann i M. Valdivia Manchego, »Mapping the geogenic radon potential in Germany,« *Science of The Total Environment*, svez. 272, br. 1-3, pp. 217-230., 14. svibanj 2001.
- [37] J. Chen i K. L. Ford, »A study on the correlation between soil radon potential and average indoor radon potential in Canadian cities,« *Journal of Environmental Radioactivity*, svez. 166, br. 1, pp. 152-156., siječanj 2017.
- [38] L. J. Nunes , A. Curado, L. C. C. da Graça, S. Soares i S. . I. Lopes, »Impacts of Indoor Radon on Health: A Comprehensive Review on Causes, Assessment and Remediation Strategies,« *International Journal of Environmental Research and Public Health*, svez. 19., br. 7, p. 3929., 25. ožujak 2022.
- [39] GIS Geography, »Inverse Distance Weighting (IDW) Interpolation,« Mediavine, 9. ožujak 2024. [Mrežno]. Available: <https://gisgeography.com/inverse-distance-weighting-idw-interpolation/>. [Pokušaj pristupa 19. lipanj 2024].
- [40] M. Šoštarić, B. Petrincec, M. Avdić, L. Petroci, M. Kovačić, Ž. Zgorelec, B. Skoko, T. Bituh, J. Senčar, G. Branica, Z. Franić, I. Franulović, D. Rašeta, I. Bešlić i D. Babić, »Radioactivity of soil in Croatia II: ¹³⁷Cs, 40K and absorbed dose rate,« *Arh Hig Rada Toksikol*, svez. 72., br. 1., pp. 15-22., 30. ožujak 2021.
- [41] J. E. Brown, B. Alfonso, R. Avila, N. A. Beresford, D. Copplestone, G. Pröhl i A. Ulanovsky, »The ERICA Tool,« *Journal of Environmental Radioactivity*, svez. 99., br. 9., pp. 1371-1383., rujan 2008.
- [42] International Atomic Energy Agency (IAEA), »Effects of Ionizing Radiation on Plants and Animals at Implied by Current Radiation Protection Standards,« International Atomic Energy Agency, Vienna, 1992.
- [43] United Nations Scientific Committee on the Effects (UNSCEAR), »Sources and Effects of Ionizing Radiation, UNSCEAR 1996 Report to the General Assembly with Scientific Annexes,« United Nations, New York, 1996.

10. ŽIVOTOPIS

Marijela Karajko rođena je u Osijeku, 30. studenog 1997. godine. Pohađala je OŠ Stjepana Cvrkovića u Starim Mikanovcima u razdoblju od 2004. do 2012. godine gdje je stekla osnovnoškolsko obrazovanje. Srednjoškolsko obrazovanje stekla je u Gimnaziji Antuna Gustava Matoša Đakovo, opći smjer u razdoblju od 2012. do 2016. godine. Preddiplomski studij fizike na Odjelu za fiziku u Osijeku je pohađala od 2016. godine do 2020. godine. Diplomski studij fizike i informatike, nastavnički smjer upisuje akademske 2020./2021. godine na Odjelu za fiziku u Osijeku.