

Radionuklidi u okolišu

Kalanj, Matea

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Geotechnical Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:130:246053>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-25**



Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Geotechnical Engineering - Theses and Dissertations](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

GEOTEHNIČKI FAKULTET

ZAVRŠNI RAD

RADIONUKLIDI U OKOLIŠU

VARAŽDIN, 2023

Sazivam članove ispitnog povjerenstva
za 21. 09. 2023. u 9 sa
Obranu ovog rada kandidat će vršiti i pred
ispitnim povjerenstvom u Varaždinu
Varaždin, 07. 09. 2023.

Predsjednik
ispitnog povjerenstva:

Prof. dr. sc. Saša Karić

Članovi povjerenstva

- 1) Doc. dr. sc. Davor Stanko
- 2) Prof. dr. sc. Nikola Škorić
- 3) izv. prof. dr. sc. Anka Prizmić Škorić

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

GEOTEHNIČKI FAKULTET

ZAVRŠNI RAD

RADIONUKLIDI U OKOLIŠU

KANDIDAT:

MATEA KALANJ



MENTOR:

doc.dr.sc. DAVOR STANKO

VARAŽDIN 2023.

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je završni rad pod naslovom:

RADIONUKLIDI U OKOLIŠU

rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na istraživanjima te objavljenoj i citiranoj literaturi te je izraden pod mentorstvom **doc.dr.sc. Davora Stanka**.

Izjavljujem da nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, odnosno da je prepisan iz necitiranog rada te da nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem također, da nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

U Varaždinu, 05.09.2023

MATEJA KALANJ
(Ime i prezime)

Mateja Kalanj
(Vlastoručni potpis)

IZJAVA MENTORA O POSTOTKU SLIČNOSTI ZAVRŠNOG RADA S VEĆ OBJAVLJENIM RADOVIMA

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je završni rad pod naslovom:

RADIONUKLIDI U OKOLIŠU

pregledan anti-plagijat programskim paketom PlagScan te da postotak sličnosti cjelovitog završnog rada, s već objavljenim radovima, ne prelazi 20%, kao i da pojedinačni postotak sličnosti završnog rada sa svakom literaturnom referencom pojedinačno ne prelazi 5%.

U Varaždinu, 05.09.2023.

Doc.dr. sc.
DAVOR STANKO
(Mentor)
Stanko Davor
(Vlastoručni potpis)

Sažetak

Ime i prezime studenta: Matea Kalanj

Naslov rada: Radionuklidi u okolišu

Radionuklidi su radioaktivni izotopi pojedinih kemijskih elemenata. U radu se prikazuje pojava radionuklida u okolišu. Objasnjena je osnovna podjela radioaktivnog zračenja. Proučen je doprinos prirodnih i antropogenih izvora zračenja prosječnoj godišnjoj dozi ozračenja. Obraden je i objašnjen postupak zbrinjavanja radioaktivnog otpada, uz mjere zaštite od radioaktivnog zračenja.

Ključne riječi: Radionuklidi, zračenje, radioaktivni otpad

Abstract

Name and surname of student: Matea Kalanj

Title: Radionuclides in the environment

Radionuclides are radioactive isotopes of certain chemical elements. The paper describes the phenomenon of radionuclides in the environment. The main categories of radiation are explained. The contribution of natural and anthropogenic sources of radiation towards the average annual radiation dose is examined. The process of radioactive waste management is described, as are the measures of protection against radiation.

Key words: Radionuclides, radiation, radioactive waste

Sadržaj

1. UVOD.....	1
2. TEORIJSKA PODLOGA	2
2.1. Ionizirajuće zračenje	2
2.2. Vrste ionizirajućeg zračenja	4
2.3. Mjerne jedinice	7
2.4. Podjela radionuklida s obzirom na postanak	8
3. PRIRODNI RADIONUKLIDI.....	9
3.1. Kozmičko zračenje.....	9
3.2. Primordijalno zračenje	15
4. ANTROPOGENI RADIONUKLIDI	19
4.1. Medicinsko zračenje	19
4.1.1. Radioaktivni medicinski otpad.....	20
4.2. Nuklearne elektrane	21
4.3. Nuklearne katastrofe i testiranja oružja.....	23
4.3.1. Cezij-137 i stroncij-90	23
5. UTJECAJ RADIONUKLIDA NA OKOLIŠ.....	25
5.1. Radionuklidi u tlu i vodi.....	25
5.2. Radionuklidi u hrani i piću	28
5.3. Radioaktivni otpad	30
5.4. Zaštita od ionizirajućeg zračenja	32
6. ZAKLJUČAK	32
7. IZVORI.....	34
Izvori.....	34
Popis slika, tablica i jednadžbi	38

1. UVOD

Djelovanje radioaktivnog zračenja ima sve veći utjecaj na svakodnevni život ljudi. Postavlja se pitanje odakle dolazi radioaktivno zračenje i koje su posljedice njegova djelovanja na okoliš i zdravlje čovjeka.

Radioaktivno zračenje može doći iz prirodnih izvora, poput djelovanja zvijezda te iz Zemljine litosfere. Osim toga, postoje i antropogeni izvori zračenja, poput određenih medicinskih postupaka, nuklearnih elektrana i nuklearnog oružja.

U zaštiti okoliša važno je postaviti jasnu granicu između prirodnog i antropogenog zračenja, kako bi praćenje koncentracija radionuklida u okolišu omogućilo kontrolu i ograničavanje unosa radionuklida iz određenih izvora u okoliš.

U prvom dijelu ovog rada ukratko je obrađena teorijska podloga bitna za razumijevanje osnovnih principa i zakona koji upravljaju radioaktivnim zračenjem, prvenstveno u kontekstu zaštite okoliša i čovjeka. U glavnom dijelu obradit će se osnovni pojmovi vezani za radioaktivni raspad. Objasnit će se podjela zračenja na prirodno i antropogeno.

Važno je razumjeti na koji način se radionuklidi šire kroz okoliš te kakve posljedice ostavljaju na ekosustav, kako bi se mogla projektirati rješenja i eventualni projekti sanacije. U ovom radu obrađen je utjecaj radionuklida na tlo, vodu, hranu i piće. Na kraju je predstavljen proces zbrinjavanja radioaktivnog otpada, za kojeg je potrebno preuzeti odgovornost kako ne bi činio štetu okolišu i ljudima.

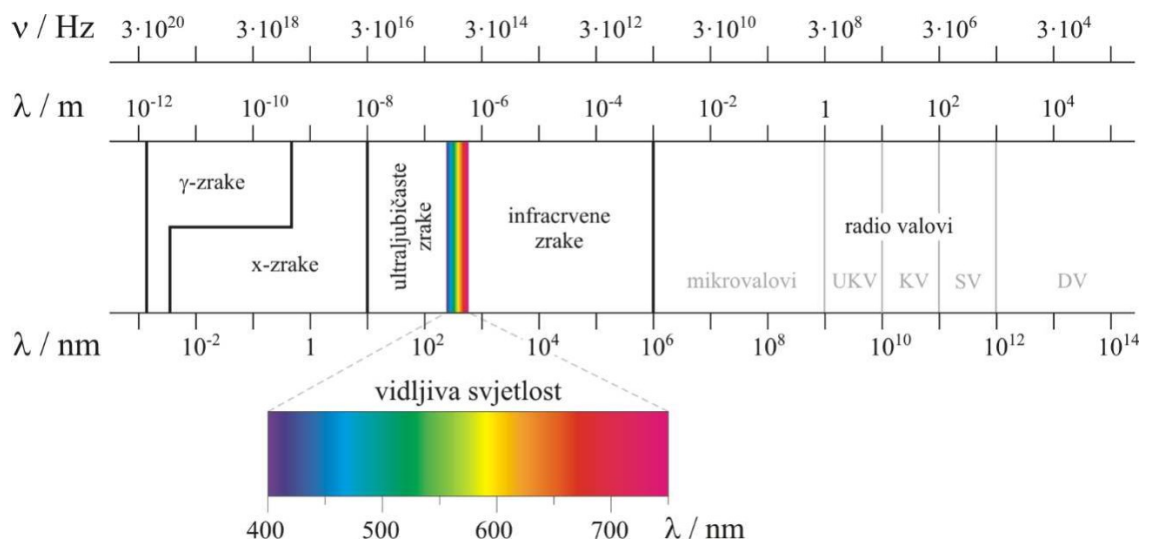
2. TEORIJSKA PODLOGA

2.1. Ionizirajuće zračenje

Elektromagnetsko zračenje je prijenos energije u obliku električnih i magnetskih valova, kao i u obliku fotona. Elektromagnetsko zračenje moguće je podijeliti na dvije vrste: ionizirajuće i neionizirajuće, ovisno o valnoj duljini i energiji koju prenose (Das i Ferbel, 2005).

Ionizirajuće zračenje ima visoke frekvencije, a niske valne duljine. Nosi dovoljno energije da poremeti raspored subatomske čestice u atomu – izbacuje elektron iz vanjskog omotača atoma, time stvarajući ione. Svojim djelovanjem može utjecati na organsku materiju, rastvarajući tkiva. Naziva se još i radioaktivnim zračenjem.

Na slici 1 prikazan je spektar elektromagnetskog zračenja, a jasno se vide gama i x-zrake (komponente ionizirajućeg zračenja) sa svojim niskim valnim duljinama i visokim frekvencijama.



Slika 1 Podjela EM zračenja

[Izvor: <https://glossary.periodni.com/glosar.php?hr=spektar+elektromagnetskog+zra%C4%8Denja>]

Radionuklidi, odnosno radioizotopi su radioaktivni izotopi nekog kemijskog elementa. Imaju nestabilan omjer protona i neutrona, ili višak energije u jezgri. Stabilnost postižu emitiranjem radioaktivnog zračenja.

Općenito u prirodi prevladavaju stabilni oblici nekog kemijskog elementa, no pojedini kemijski elementi uopće nemaju stabilan oblik te su stalno radioaktivni. Svi kemijski elementi s atomskim brojem višim od 82 su radioaktivni.

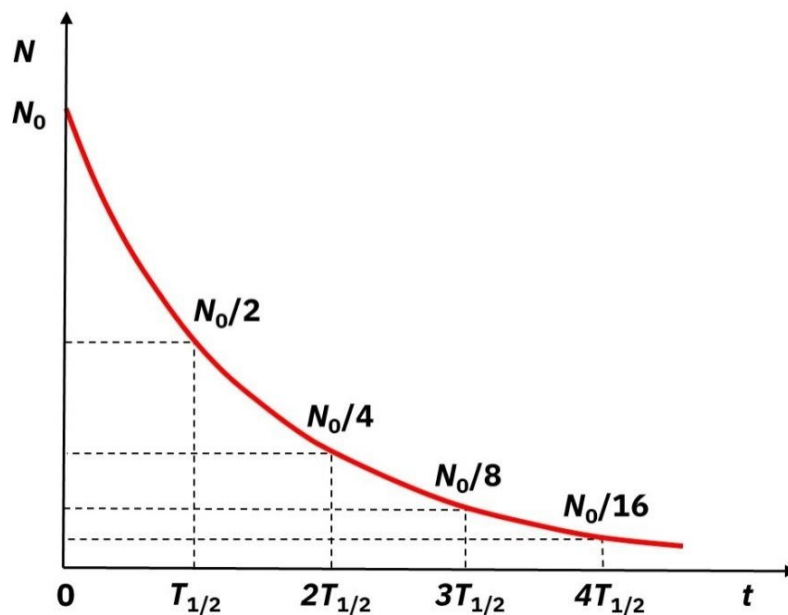
Radioaktivni lanac raspada, odnosno niz raspada, je naziv za produkte raspada koji nastaju dok pojedini radionuklid pokušava dostići stabilnost.

Poluživot radionuklida označava vrijeme koje je potrebno kako bi se radioaktivno raspala ili transformirala polovica danog uzorka u nekom mjerenju. Zakon radioaktivnog zračenja govori koliko će se radioaktivnih jezgri atoma iz nekog uzorka raspasti u određenom vremenskom periodu (Das i Ferbel, 2005).

U jednadžbi 1 koja opisuje zakon radioaktivnog raspada N predstavlja broj radioaktivnih jezgri tijekom vremena promatranja, N_0 početni broj jezgri, a T vrijeme poluraspada koje je drugačije za svaki pojedini radionuklid.

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

Na slici 2 grafički je prikazan pad broja radioaktivnih jezgri s protjecanjem vremena.



Slika 2 Ovisnost broja radioaktivnih jezgri o vremenu [Izvor : <https://edutorij.e-skole.hr/share/proxy/alfresco-noauth/edutorij/api/proxy-guest/f8d552c1-03ca-47a1-943a-61ea3e2d1bd0/izotopi-alfa-i-beta-radioaktivni-raspad.htm>]

2.2. Vrste ionizirajućeg zračenja

Alfa zračenje sastoji se od takozvanih alfa čestica – sličnih jezgrama helija. Alfa-emiteri su teški i nose veliku količinu energije. Proces pretvorbe jedne atomske jezgre u drugu emisijom alfa čestice naziva se alfa raspad.

Primjer jednog alfa-emitera je radij-226 koji se raspada emisijom alfa čestice. Prilikom te reakcije otpušta se 4,6 milijuna elektronvolta energije, te nastaje radioaktivni plemeniti plin radon-222. Općenito su poluživoti alfa-emitera vrlo dugotrajni. Torij-232 i uran-238 imaju poluživote od nekoliko milijardi godina (CNRS, 2023a).

Iako prenosi veliku količinu energije dovoljan je list papira kako bi se zaustavio prodor alfa zraka. Ipak, budući da alfa čestice prenose veliku količinu energije i imaju veliku snagu ionizacije, mogu oštetiti tkivo ukoliko uđu u njega. Vanjsko djelovanje generalno nema štetnih učinaka ukoliko postoji adekvatna zaštita (WHO, 2016).

U srži beta zračenja je sila – takozvana „slaba“ sila – koja djeluje unutar atoma, a ima mogućnost od jedne vrste nukleona načiniti drugi. Proton može postati neutron, i obrnuto. Djelovanjem te sile ne mijenja se sveukupni broj nukleona, no dolazi do izbacivanja elektrona ili pozitrona kako bi se održao postojeći naboj atoma. Uz elektron se izbacuje i čestica zvana antineutrino, a uz pozitron neutrino.

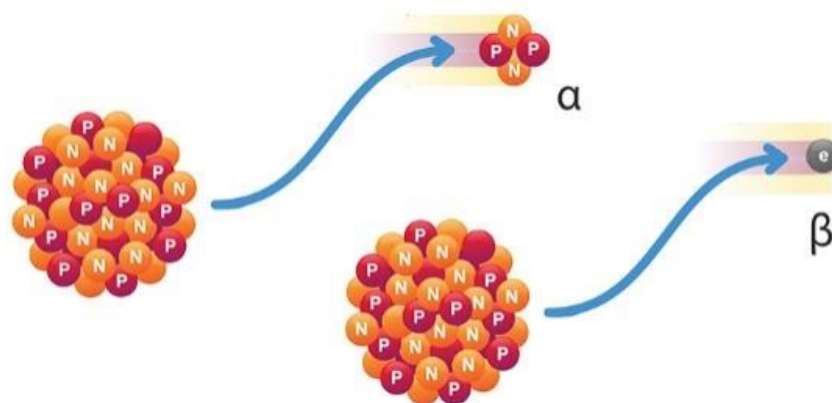
Beta-minus zračenje naziv je za proces u kojem se neutron pretvori u proton, a iz jezgre se izbace elektron i antineutrino. Obrnuti proces, kada iz protona nastaje neutron a izbacuju se pozitron i neutrino, naziva se beta-plus zračenje.

Energija oslobođena beta zračenjem ima manje iznose od energije izbačene alfa zračenjem, a kreće se u rasponu od nekoliko tisuća elektronvolta, do najviše oko milijun elektronvolta (CNRS, 2023b).

Prodor beta zraka moguće je zaustaviti čvrstim materijalima. Imaju veću prodornu moć of alfa zraka.

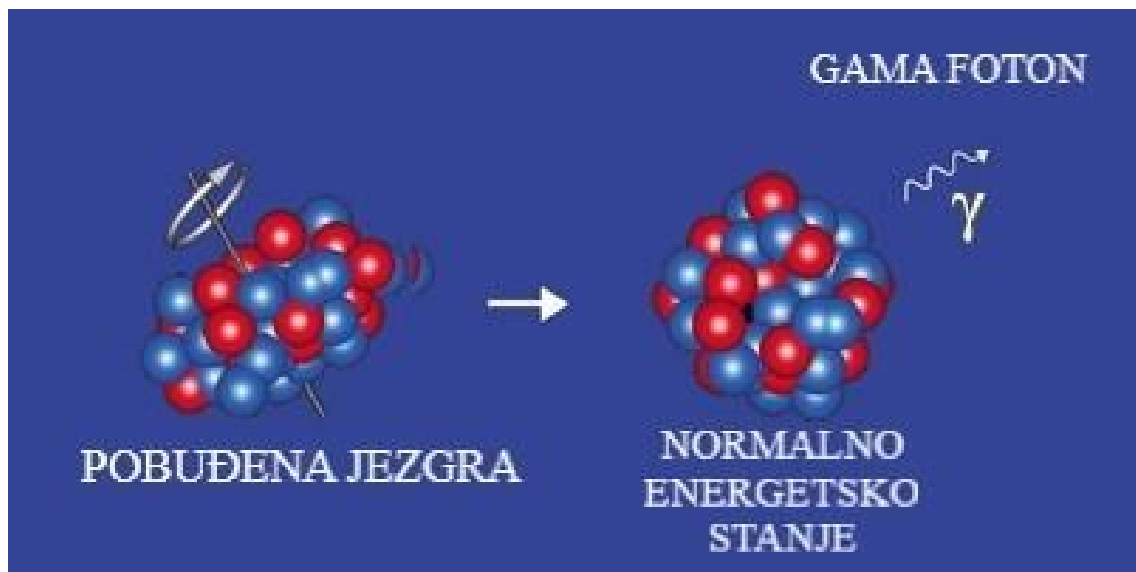
Poluživoti radionuklida beta-emitera su u pravilu mnogo kraći od poluživota alfa-emitera. U prirodi postoji nekolicina beta-emitera, poput kalija-40 ili ugljika-14 koji nastaje u atmosferi putem djelovanja kozmičkih zraka.

Na slici 3 prikazana je razlika između alfa i beta zračenja; dok se alfa zračenjem emitiraju protoni i neutroni, beta zračenje sastoji se od izbacivanja elektrona.



Slika 3 Alfa i beta zračenje [Izvor: <https://edutorij.e-skole.hr/share/proxy/alfresco-noauth/edutorij/api/proxy-guest/f8d552c1-03ca-47a1-943a-61ea3e2d1bd0/izotopi-alfa-i-beta-radioaktivni-raspad.html>]

Do gama zračenja dolazi kada nuklearno raspadanje (alfa ili beta zračenje) jezgru ostavi s viškom energije. Emisijom gama fotona jezgra se vraća u uobičajeno energetske stanje. Nastaje kao popratno zračenje alfa i beta emisijama. Iako su gama zrake građene od jednakih fotonskih čestica koje tvore zrake svjetlosti, njihova energija je nekoliko stotina tisuća puta veća (raspon energije od 100 000 do milijun elektronvolta) (CNRS, 2023c). Na slici 4 prikazan je povrat visokoenergetske jezgre u normalno energetske stanje emisijom gama fotona.



Slika 4 Gama zračenje [Izvor :

https://radioactivity.eu.com/phenomenon/radioactivity_gamma]

Gama zrake imaju relativno veliku moć prodiranja.. Pretjerana izloženost gama zračenju dovodi do ozbiljnih medicinskih problema. Ukoliko prodru u ljudsko tijelo u velikim količinama oštećuju staničnu strukturu i mogu dovesti i do nastanka karcinoma. Unatoč tome, uz pravilnu zaštitu mogu biti i korisne. Koriste se za mjerenje toka tekućina, u podzemnim istraživanjima ležišta nafte, kao i u liječenju karcinoma i sterilizaciji medicinske opreme.

Za zaštitu od prodora gama zraka potrebno je koristiti vrlo guste materijale, poput olova (EPA, 2023).

Slične gama-zrakama su x-zrake. X-zračenje dio je elektromagnetskog spektra s valnim duljinama od 0.001 do 10 nanometara. Gama-zrake i x-zrake imaju jednaka svojstva (fotonske su prirode), no dolaze iz različitih dijelova atoma. X-zrake emitiraju elektroni iz ljuske atoma. X-zrake nose manje energije (između 10 eV i 100 keV) i općenito imaju slabiju moć penetracije od gama zraka (EPA, 2023).

2.3. Mjerne jedinice

Budući da se zračenje ne može osjetiti, potrebno ga je mjeriti indirektno. Razlikuju se mjerne jedinice za aktivnost radioaktivnog zračenja i za doze zračenja koje neki materijal primi. Najčešće mjerne jedinice koje se koriste su rendgen, gray i sievert (EPA, 2023).

Rendgen označava količinu gama ili x zraka u zraku, te se odnosi na aktivnost zračenja. Becquerel je izvedena SI jedinica koja opisuje aktivnost zračenja; jedan becquerel odgovara raspadu jedne jezgre atoma u periodu od jedne sekunde.

U tablici 1 nabrojane su relevantne doze zračenja s opisima i mjernim jedinicama.

Tablica 1 Doze zračenja s opisima i mjernim jedinicama

DOZA	OPIS	MJERNA JEDINICA
Apsorbirana doza	Energija prenesena na jedinicu mase materijala	Gray (Gy)
Ekvivalentna doza	Apsorbirana doza korigirana za faktor težine ovisno o vrsti zračenja, odnosi se na pojedino tkivo ili organ	Sievert (Sv)
Efektivna doza	Ekvivalentna doza korigirana za faktor težine ovisno o vrsti tkiva na koje djeluje zračenje, odnosi se na cijelo tijelo	

Budući da različite vrste zračenja imaju različito djelovanje, i da zračenje drugačije djeluje na različite organe, izmjerene podatke potrebno je korigirati odgovarajućim konstantama (težinskim faktorima). Težinski faktori ovise o vrsti tkiva – stanice koje se brže dijele ionizacija više oštećuje od onih koje se dijele sporije. (Šoštarić, 2017).

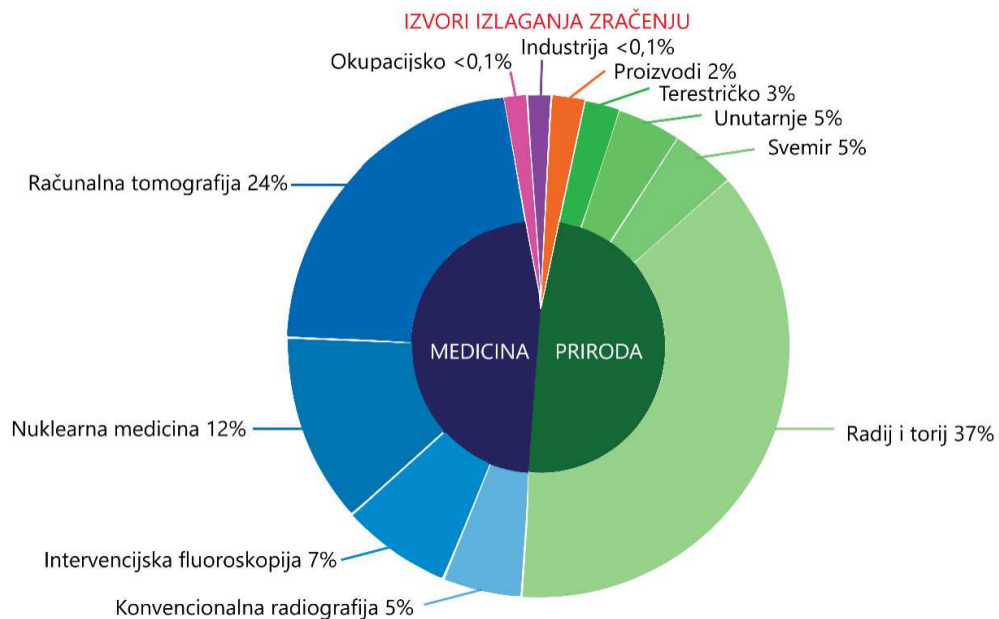
Tok zračenja je radiometrijska jedinica koja opisuje energiju zračenja mjerenu na određenoj površini u vremenskom periodu. Izražava se vatima po metru kvadratnom (AMS, 2012).

2.4. Podjela radionuklida s obzirom na postanak

Radionuklide s obzirom na postanak moguće je podijeliti na prirodne i antropogene.

Prirodna radioaktivnost glavni je izvor zračenja kojem je ljudsko tijelo izloženo na dnevnoj bazi. Sav život na planetu Zemlji prilagođen je određenim količinama radionuklida u svom okolišu (Cinelli i sur., 2019).

Velika većina antropogenog zračenja koja se mjeri u organizmu dolazi kao posljedica raznih medicinskih postupaka dijagnostike i liječenja. Na slici 5 prikazana je podjela izvora zračenja.



Slika 5 Izvori izlaganja zračenju [Izvor : (Cinelli i sur., 2019)]

3. PRIRODNI RADIONUKLIDI

Prirodno pojavne radionuklide moguće je podijeliti na dvije vrste zračenja:

1. Kozmičko zračenje
2. Primordijalno zračenje

Kozmičko zračenje podrazumijeva visokoenergetske zrake koje na Zemlju dopiru iz svemira. Primordijalno zračenje odnosi se na radionuklide koji su nastali kao posljedica supernova velikih zvijezda, prije formacije Sunčeva sustava, a koje je moguće detektirati zbog iznimno dugotrajnih poluživota.

3.1. Kozmičko zračenje

Kozmičko zračenje sastoji se od atomskih jezgri porijeklom iz raznih izvora u svemiru.. Glavni emiteri kozmičkog zračenja su zvijezde. Sunce također emitira manji dio kozmičkog zračenja koje utječe na Zemlju . Kozmičko zračenje sastoji se od čestica čiji se rasponi energije kreću od 0,1 do 10 GeV. Mogu biti u obliku protona (87%), alfa čestica (12%) ili teških jezgri (1%) (CNRS, 2023d).

Primarno kozmičko zračenje sastoji se od stabilnih nabijenih čestica (uglavnom protona) koji su na vrlo visokim energetske razinama. Sekundarno kozmičko zračenje označava zrake koje nastaju procesom spalacije.

Spalacija kozmičkih zraka je proces interakcije primarnih zraka s plinovima i čestičnim materijalom koji čini Zemljinu atmosferu. Visokoenergetska zraka kozmičkog zračenja sudara se s atomima koji čine atmosferu, pri čemu taj atom gubi dio svoje mase i izbacuje dio jezgre. Sekundarno zračenje sastoji se uglavnom od visokoenergetskih nukleona.

Dio nabijenih čestica koje prilaze atmosferi blokira Zemljino magnetsko polje, koje služi kao štit. Na polovima, gdje je najtanji sloj atmosfere, uspije proći više čestica nego u ostalim dijelovima svijeta. One su uzrok pojavi *Aurore borealis*, odnosno polarnog svjetla (CNRS, 2023d).

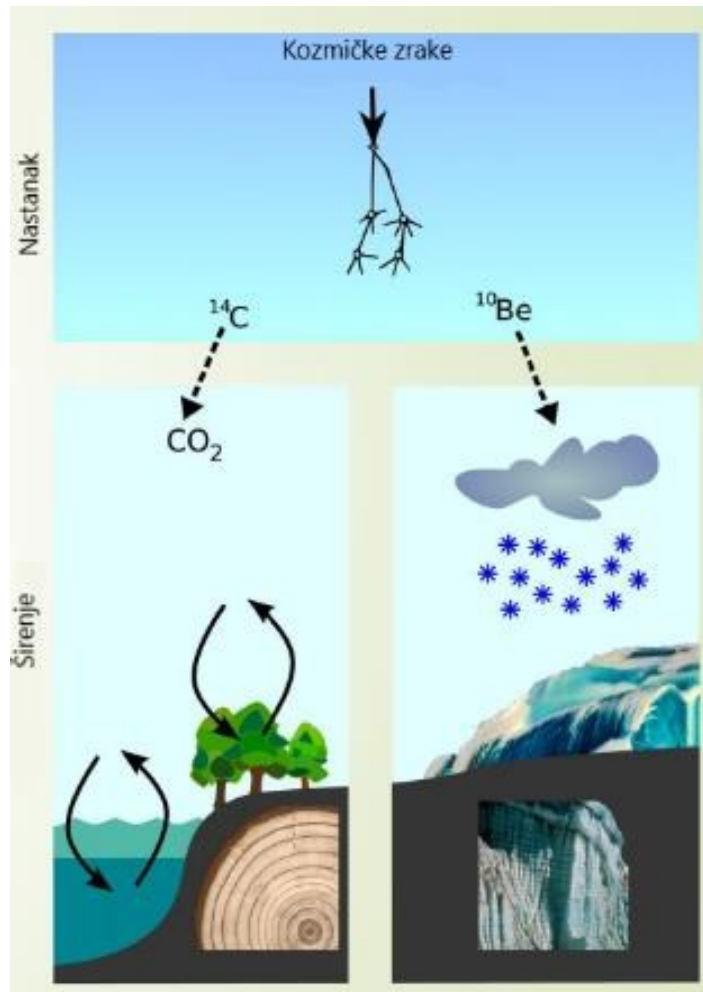
Osim Zemljinog, i Sunčevo gravitacijsko polje, skupa sa solarnim vjetrovima ometa putanju kozmičkih zraka (Neutron Monitoring Database, 2021). Na slici 6 prikazane su interakcije čestica koje ulaze u atmosferu. Međusobno se sudaraju, mijenjaju putanju i na kraju padaju na površinu Zemlje.



Slika 6 Putanje kozmičkih zraka [Izvor:

<https://www.dnaindia.com/technology/report-cosmic-rays-can-make-deep-space-ventures-risky-for-astronauts-in-future-2028352>]

Među najznačajnijim kozmogenim radionuklidima su ugljik-14, berilij-10 i berilij-7. Praćenjem tih triju radionuklida moguće je indirektno pratiti razne atmosferske i svemirske procese, od meteoroloških fenomena do aktivnosti Sunca. Na slici 7 su prikazani ciklusi ugljika-14 i berilija-10 u okolišu.



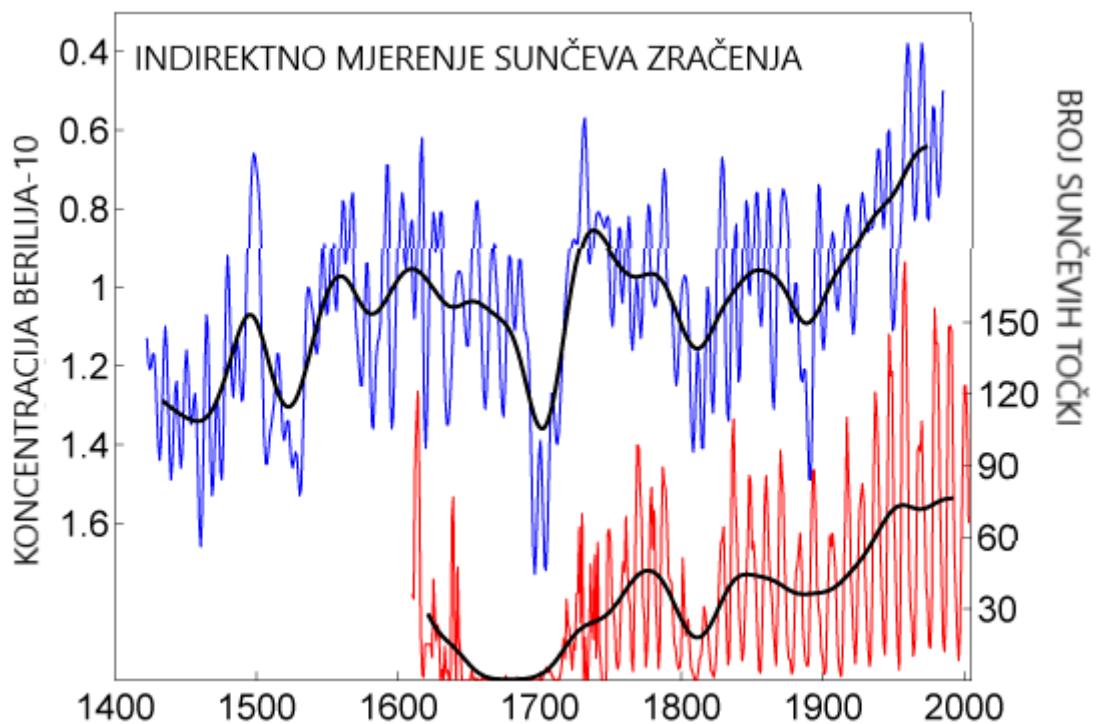
Slika 7 Ugljik-14 i berilij-10 u okolišu [Izvor: <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.1118965109>]

Berilij-7 kozmogeni je radionuklid koji nastaje uglavnom u gornjem dijelu troposfere i u stratosferi. Ima poluživot od 53 dana. Od posebnog je značaja jer se u atmosferi ponaša slično kao aerosoli. Praćenjem njegove koncentracije moguće je modelirati izmjene između stratosfere i troposfere, što je korisno za broje meteorološke studije. Prirodan je produkt spalacije jezgri dušika i kisika. Atmosferski tok berilija-7 mjeri se u svrhu praćenja stopa erozije i transporta riječnih sedimenata, kao i za mjerenje doprinosa padalina bilanci kopnenih voda (USGS, 2004).

Berilij-10 rijedak je kozmogeni radionuklid poluživota od 1,36 milijardi godina. Nastaje spalacijom s jezgrama kisika i dušika. (Purdue Rare Isotope Measurement Laboratory, 2023) Interesantan je jer se praćenjem berilija-10 može pratiti promjena

jačine Sunčeva zračenja. Budući da nastaje djelovanjem kozmičkih zraka, ovisan je o aktivnosti Sunca. Što je turbulentnije djelovanje Sunčeva vjetra, to se kozmičke zrake više remete u svojoj putanji i ne stižu do Zemlje. Nastanak izotopa berilija-10 obrnuto je proporcionalan jačini Sunčeva zračenja (Berggren, 2009).

Sunčeve pjegice su na Suncu gdje zbog velike magnetske aktivnosti dolazi do smanjenja toka energije iz unutrašnjosti Sunca do površine. Zbog toga se ti dijelovi hlade i postaju tamniji. Praćenjem koncentracija berilija-10 modelira se aktivnost Sunca (Max-Planck Gesellschaft, 2004). Na slici 8 prikazan je graf korelacije koncentracija berilija-10 s brojem Sunčevih pjega.



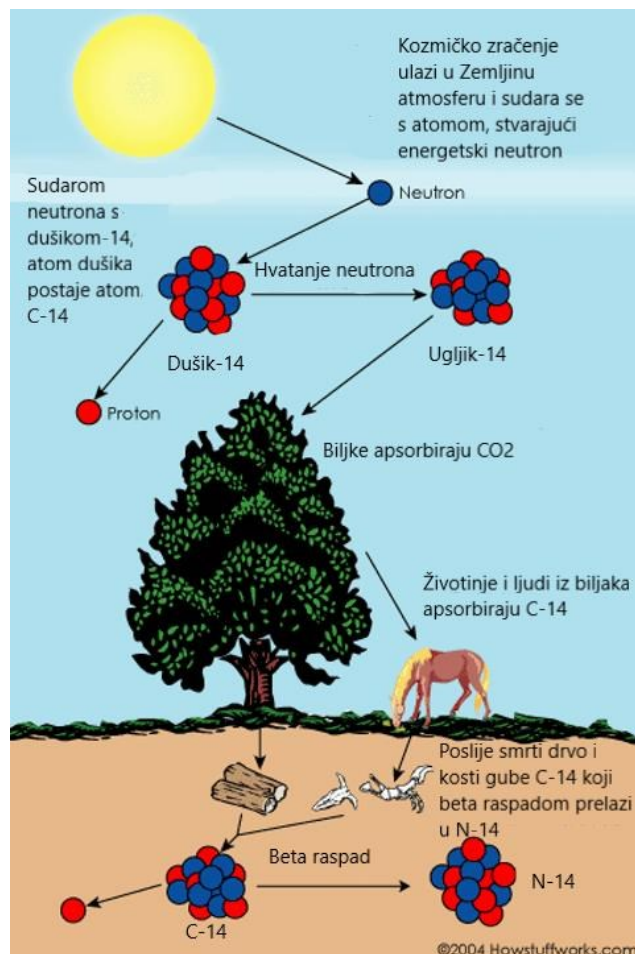
Slika 8 Korelacija koncentracija berilija-10 s brojem Sunčevih pjega [Izvor: https://en.wikipedia.org/wiki/Beryllium-10#/media/File:Solar_Activity_Proxies.png]

Upravo je istraživanjima berilija-10 zaključeno kako aktivnost Sunca nema značajan utjecaj na klimatske promjene (Max-Planck Gesellschaft, 2004).

Ugljik-14 nastaje spalacijom između neutrona kozmičkog zračenja i jezgara dušika. Iznimno je koristan pri datiranju materijala organskog podrijetla. Unutar živog tkiva

količina ugljika-14 održava se konstantnom putem metaboličkih procesa i izmjenama s atmosferom. Uslijed smrti organizma, prestaje i nadoknađivanje količine ugljika-14, pa se ona količina koja je ostala u tijelu nakon smrti počne raspadati.

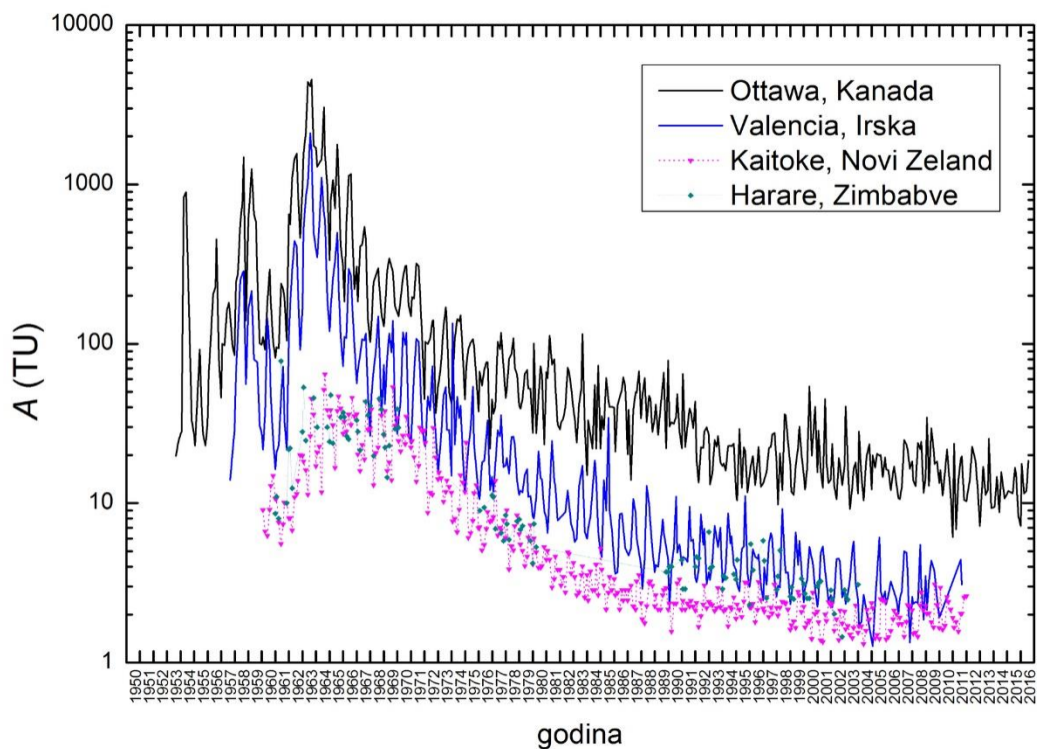
Mjerenjem količine ugljika-14 u tkivu moguće je odrediti kada je prestalo nadoknađivanje. Na slici 9 prikazan je raspad ugljika-14 tijekom vremena. Vrijeme poluraspada ugljika-14 je 5730 godina, tako da je najveća moguća starost koja se može odrediti ovom metodom 60 000 godina. (Institut Ruđer Bošković, 2019) Nakon nastanka ugljik-14 spaja se s kisikom u zraku i nastaje ugljikov dioksid CO₂. CO₂ iz atmosfere upijaju biljke i ulaze u prirodni okoliš. Abnormalno velike količine ugljikova dioksida u zraku doprinose efektu staklenika, jednim od najvećih komponenti klimatskih promjena (CNRS, 2023e). Na slici 9 prikazan je ciklus ugljika-14 u okolišu, od nastanka međudjelovanjem neutronske zračenja na dušik, preko apsorpcije u biljke do raspada nakon smrti tkiva.



Slika 9 Ciklus C-14 u okolišu [Izvor:

<https://science.howstuffworks.com/environmental/earth/geology/carbon-14.htm>]

Tricij (^3H) nastaje djelovanjem kozmičkih zraka na dušik-14 ili kisik-16. Također nastaje uslijed detonacije nuklearnih uređaja poput bombi ili djelovanjem nuklearnih reaktora i čestičnih akceleratora. Tricij se raspada na helij-3 putem beta-minus zračenja. U procesu otpusti 1,5 keV energije (Cinelli i sur., 2019). Tricij ima relativno kratak poluživot, od oko 12,3 godina. Poslije zabrane izvođenja termonuklearnih pokusa u atmosferi, količina tricija u atmosferi postupno opada. Razlog tome je miješanje atmosferskih slojeva, ispiranje oborinama i kratki poluživot tricija. Sve više se približava prirodnim vrijednostima. Prosječna koncentracija tricija u oborinama u umjerenj klimi sjeverne polutke iznosi malo manje od 1,18 Bq/L (Institut Ruđer Bošković, 2019). Praćenjem koncentracije tricija moguće je izraditi vremensku skalu za transport vode u hidrološkom ciklusu. Na primjer, ukoliko podzemna voda uopće nema tricija, znači da je u podzemni spremnik ušla prije 1950. godine. Sav tricij koji je tada bio prirodno prisutan do sada se raspao ispod granice detekcije uređaja za mjerenje. Na slici 10 prikazane su koncentracije aktivnosti tricija u mjesečnim oborinama od 1950. do 2016.



Slika 10 Koncentracije aktivnosti tricija od 1950-2016. $1 \text{ TU} = 0,118 \text{ Bq/L}$ [Izvor: (Institut Ruđer Bošković, 2019)]

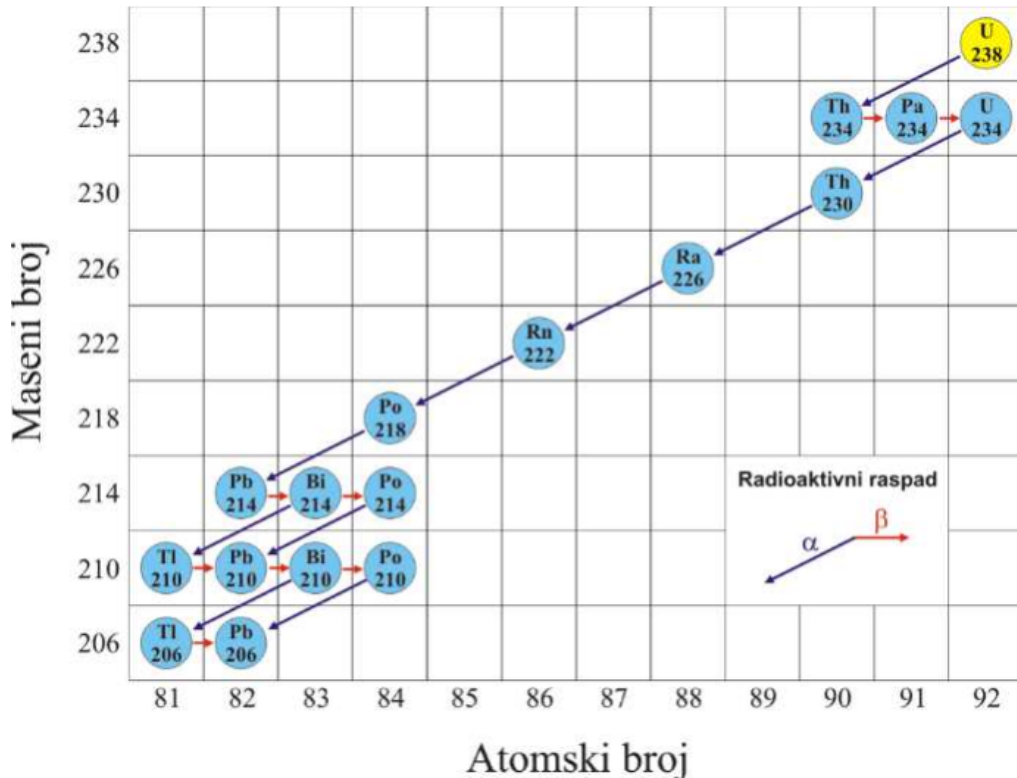
3.2. Primordijalno zračenje

Primordijalni elementi su oni koji su u svom trenutnom obliku postojali i prije nego je nastala Zemlja. Na neki način oni su relikti iz doba formacije svemira. Potječu iz eksplozija velikih zvijezda. Danas ih je na Zemlji moguće detektirati jer imaju iznimno duge poluživote. Poznato je 35 primordijalnih radionuklida, koji su izotopi 28 kemijskih elemenata.

Glavni i najobilniji izvori ionizirajućeg zračenja iz Zemljine kore su uran-238, uran-235, kalij-40 i torij-232. Široko su rasprostranjeni te gotovo nema mjesta na planetu gdje se ne mogu naći, tako da uvelike doprinose toku prirodne radioaktivnosti.

Elementarni uran gotovo se u potpunosti sastoji od urana-238 i u manjem dijelu urana-235. U prirodi se uglavnom pojavljuje u mineralima urana, a ne elementarno. Ima poluživot od 4,468 milijardi godina (Cinelli i sur., 2019) .

Na slici 11 prikazan je niz raspada urana-238. Na kraju niza nalazi se stabilan produkt olovo-206. Uran-238 raspada se alfa ili beta zračenjem.



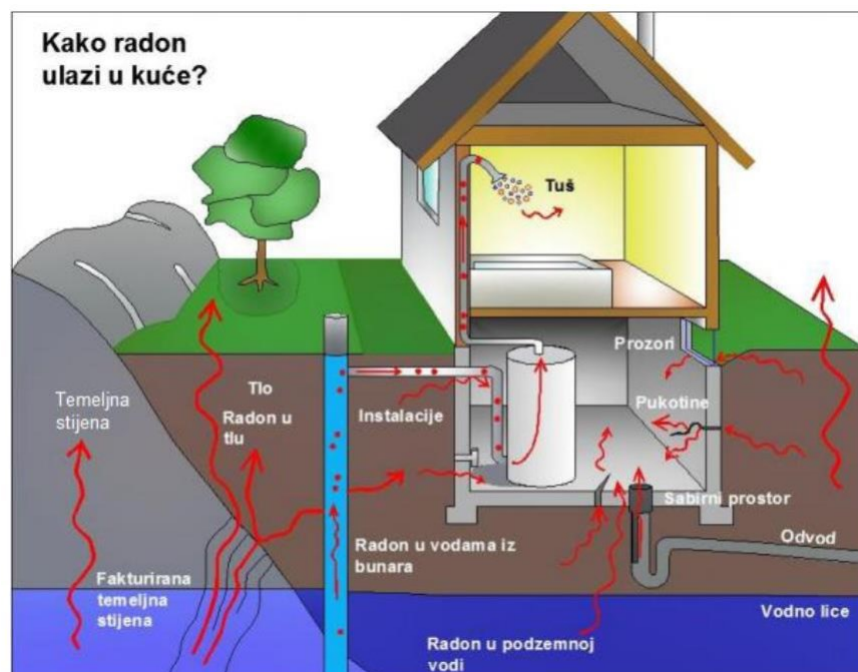
Slika 11 Niz raspada urana-238 [Izvor :

<https://glossary.periodni.com/glosar.php?hr=radioaktivni+niz>]

Uran je prirodno prisutan u gotovo svim tlima, stijenama i vodi. Stijene koje sadrže minerale urana se mrve u tlo, koje može isprati voda ili odnijeti vjetar. Biljke ga u pravilu odbijaju, osim žitarica, u kojima se može akumulirati (UKEA, 2003). Unutarnje izlaganju uranu-238 dovodi do ozbiljnih medicinskih komplikacija. Uz to što je radioaktivan, kemijski je toksičan element.

Primjer člana lanca raspada urana-238 je radon-222. Izotopi radona radon-222 i radon-220 prirodni su plemeniti radioaktivni plinovi. Nastaju radioaktivnom raspadom radija. Dva radioaktivna izotopa radona su kemijski identični, no imaju različite poluživote. Poluživot radona-222 iznosi 3.82 dana, a radona-220 56 sekundi. Radon-222 stabilniji je od radona-220. Radon-220 naziva se još i toron, a kada se govori o okolišno značajnom radonu, uglavnom se misli na radon-222 (Cinelli i sur., 2019).

Nakon što se radij u tlu raspadne u radon, on u obliku plina izlazi iz samog tla i u zrak u neposrednoj blizini. Koncentracija radona koji se oslobađa iz tla ovisi o tipu tla, klimatskim uvjetima, tlaku zraka i slično. Na slici 12 prikazani su načini ulaska radona u interijer.



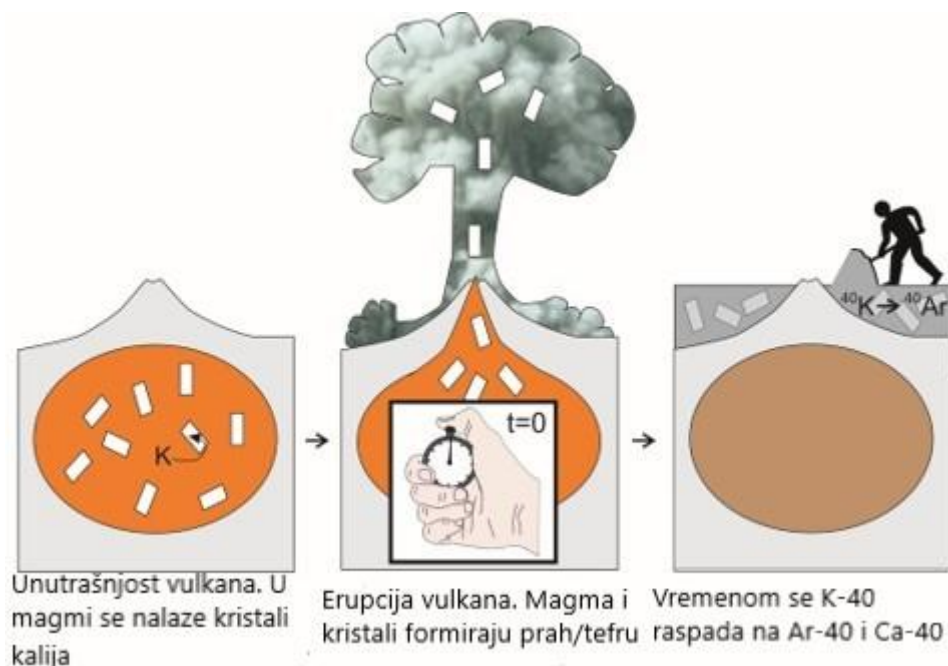
Slika 12 Načini ulaska radona u kuću [Izvor :

<https://repozitorij.gfv.unizg.hr/islandora/object/gfv%3A448/datastream/PDF/view>]

Primordijalni radionuklid kalij-40 prilikom raspada ima dvije opcije. Može se raspasti na kalcij-40 ili argon-40, oba stabilna. Beta-minus zračenjem nastaje kalcij-40, a beta-plus zračenjem argon-40.

U okolišu se kalij-40 ponaša kao svi drugi izotopi kalija. Prisutan je u gotovo svim tlima i stijenama. Kalij je esencijalan nutrijent potreban za rast biljaka, pa se radioaktivni kalij-40 može pronaći u biljnoj materiji, odakle dolazi u životinje i ljude (UKEA, 2003).

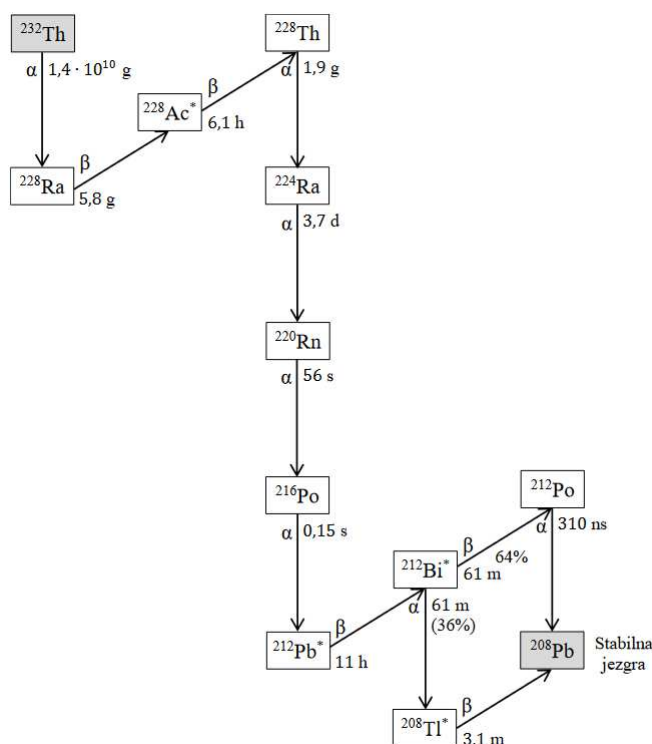
Kalij-40 može se koristiti za datiranje stijena magmatskog podrijetla. Izbačajem magme i vulkanske prašine kalij iz unutrašnjosti Zemlje dolazi na površinu. Kada se izbačeni materijal stvrdne u magmatsku stijeu, počne raspad kalija-40 na argon-40 i kalcij-40. Mjerenjem koncentracije produkata raspada kalija-40 moguće je datirati stijenu (Britannica, 2020). Proces je prikazan na slici 13.



Slika 13 Kalij u magmatskim stijenama [Izvor:

<https://thenoblegasbag.wordpress.com/tag/potassium/>]

Primordijalni radionuklid torij-232 metal je iz skupine aktinida. Ima poluživot od 1,4 milijarde godina. Na slici 14 prikazan je lanac raspada torija-232, koji završava stabilnim olovom-208.



Slika 14 Lanac raspada torija-232 [Izvor

<https://repositorij.pmf.unizg.hr/islandora/object/pmf%3A2610/datastream/PDF/view>]

U prirodi se torij-232 uglavnom nalazi u spojevima s fosforom. Biljke ga u pravilu snažno odbijaju, tako da se neće naći u biljnom materijalu. Životinje ga mogu pojesti ukoliko konzumiraju komad tla ili kamen koji sadrži torij. Ukoliko i uđe u metabolizam, uglavnom se taloži u kostima. Prisutnost torija u tlu također ima negativan utjecaj na zajednice bakterija i gljiva. Djelovanjem na mikroorganizme smanjuje bioraznolikost prisutnu u biofilmu—zajednici slijepljenih mikroorganizama ugrađenih u sluzavu potpornu strukturu—što može imati ozbiljne posljedice za ostale članove hranidbene mreže, poput manjih vodenih beskralježnjaka, koji se tim biofilmom hrane (Doose, 2021).

Najveće koncentracije torija-232 pronalaze se u ribama i ostalim vodenim životinjama, što može biti rizik za ljudsko zdravlje ukoliko se putem ribe unese velika količina torija u tijelo (UKEA, 2003).

4. ANTROPOGENI RADIONUKLIDI

Korisni potencijal ionizirajućeg zračenja prepoznat je u posljednjih nekoliko desetljeća, od medicinske do tehnološke primjene. Uz prirodne, antropogeni izvori doprinose ukupnoj količini zračenja kojem je izložen pojedinac.. Iako su sva živa bića izložena određenoj dozi prirodnog zračenja, isto ne vrijedi i za antropogene izvore, koji mogu oslobađanjem radionuklida ugroziti ljudsko zdravlje.

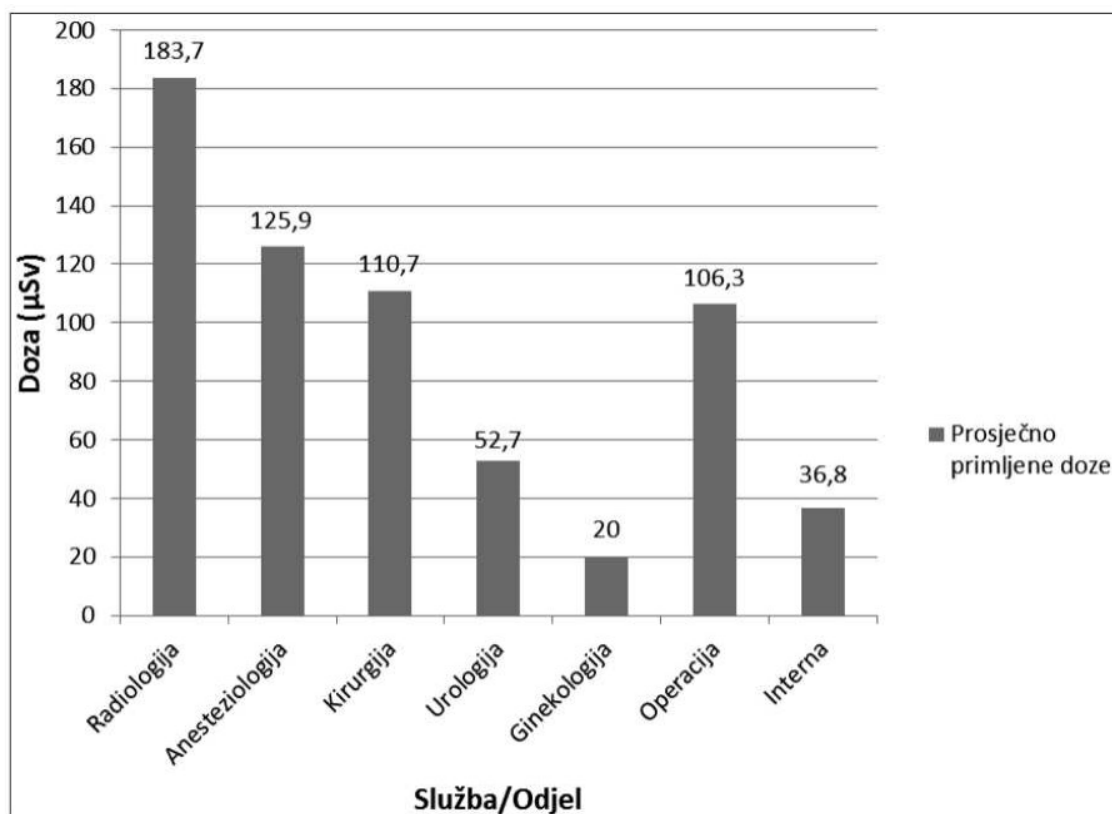
Najznačajniji izvori antropogenog zračenja su nuklearna medicina, fisija urana u nuklearnim reaktorima, transport na nuklearni pogon i ostaci zračenja od nuklearnih katastrofa i testiranja nuklearnog oružja.

4.1. Medicinsko zračenje

Medicinski izvori zračenja čine 98% ukupne doze iz antropogenih izvora, a drugi su po doprinosu zračenju na globalnoj razini, odmah iza prirodnih izvora. Različiti su od ostalih, budući da uglavnom uključuju samo jedan izoliran dio tijela, dok ostali izvori utječu na cijelo tijelo odjednom. Doza zračenja koje je posljedica medicinskih postupaka tijekom godina raste diljem planeta. Ukoliko javnost ima pristup naprednim medicinskim tehnikama, raste i korištenje radioloških metoda u medicini (WHO, 2016).

Najučestaliji postupak u nuklearnoj dijagnostici je scintigrafija. Radi se o dijagnostičkoj metodi u kojoj se u tkivo (koštano, mišićno, meka organska tkiva) unose radiofarmaci—farmakološki pripravci koji sadrže radionuklide—pomoću kojih se slikovito vide metabolički procesi u tkivima (KBC Dubrava, 2023).

Na slici 15 prikazane su prosječne doze za medicinske radnike ovisno o odjelu. Daleko najveće doze — 183,7 μ Sv/god – primaju radnici na radiologiji, kako je i očekivano.



Slika 15 Prosječne primljene doze za izložene medicinske djelatnike po odjelima

[Izvor: <https://hrcak.srce.hr/file/291987>]

4.1.1. Radioaktivni medicinski otpad

Osim zračenja koje se pojavljuje pri samom dijagnostičkom postupku ili liječenju, otpad od nuklearne medicine također može biti izvor ionizacije. Medicinski otpad općenito može biti opasan i neopasan. Radioaktivni otpad je opasan otpad i ubraja se u institucionalni radioaktivni otpad. Gospodarenje njime regulirano je Pravilnikom o zbrinjavanju radioaktivnog otpada i iskorištenih izvora (Smojver & Vitale, 2021).

U određenim slučajevima i sami pacijenti mogu se smatrati izvorom zračenja, a pogotovo njihove tjelesne izlučevine. Kod radiojodne terapije pacijent je u izolacijskoj sobi nekoliko dana te ima sanitarni čvor povezan s podzemnim spremnikom za odlaganje/razrjeđenje urina. Poslije većine postupaka u nuklearnoj medicini preporuča se ne dolaziti u kontakt a malom djecom i trudnicama, kako ,bi ih se zaštitilo od zračenja.

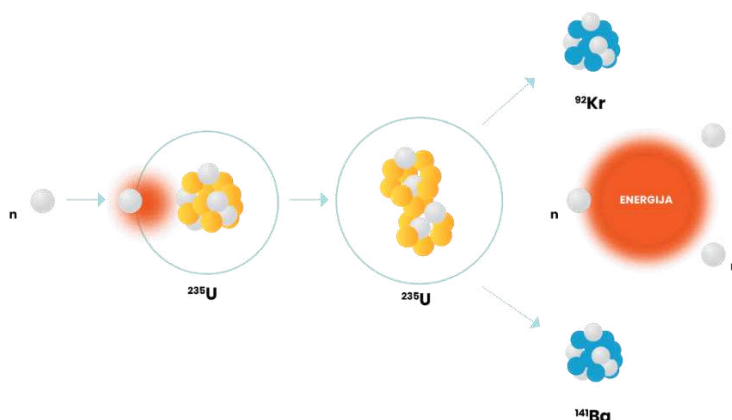
Prije odlaganja otpada potrebno je izmjeriti razinu radioaktivnosti i voditi pisani zapis o podrijetlu spremljenog otpada. Otpad se obvezno razvrstava ovisno o očekivanom vremenu trajanja poluraspada te materijalu i obliku.

4.2. Nuklearne elektrane

Ciklus nuklearnog goriva su „sve djelatnosti u proizvodnji nuklearne energije uključujući: nalaženje sirovina i proizvodnju nuklearnoga goriva, uporabu nuklearnoga goriva u nuklearnome reaktoru, prestanak rada i raspremanje nuklearnoga reaktora, zbrinjavanje radioaktivnoga otpada podrijetlom iz nuklearnih postrojenja te sva istraživanja u svezi s tim djelatnostima“ (Hrvatski sabor, 2006).

Nuklearna elektrana je termoelektrana kojoj je izvor energija toplina dobivena fisijom nuklearnog goriva u barem jednom nuklearnom reaktoru.

Nuklearna fisija je fizikalni proces u kojem se neutron apsorbira u jezgri teškog elementa i cijepa ga na dvije lakše jezgre, pri čemu se dio mase pretvori u toplinsku energiju. Pri cijepanju atoma uranija oslobađa se oko 200 MeV energije. Budući da prirodna ruda urana sadrži većinski uran-238, koji nije optimalan za iskorištavanje u nuklearnim elektranama, prije fisije potrebno je povećati koncentraciju urana-235 u gorivu. Taj proces naziva se obogaćivanje urana (Nuklearna elektrana Krško, 2023). Na slici 16 prikazana je nuklearna fisija urana-235. Uran se raspada na kripton-92 i barij-141 uz emisiju topline.



Slika 16 Nuklearna fisija urana [Izvor : <https://www.nek.si/hr/o-nuklearnoj-energiji/uranij-i-nuklearna-fisija>]

Izvor doze u postrojenjima koja rade po propisima je uglavnom vanjski, u obliku gama zračenja. Problem nastaje kada se nuklearne elektrane stavljaju van komisije. Tijekom postupka dekomisije nuklearnog postrojenja bilježi se rast efektivne doze. To je posljedica radova na dekontaminaciji, demoliranju infrastrukture, zbrinjavanju nuklearnog otpada i slično, čime se uznemiravaju čestični radionuklidi (UNSCEAR, 2020/2021).

Na slici 17 vidljive su godišnje efektivne doze zračenja za nuklearne reaktore od 1975 do 2014. Očit je trend pada doze zbog poboljšanja tehnologija zaštite od zračenja.



Slika 17 Godišnja efektivna doza zračenja iz nuklearnih reaktora (1975-2014)

Energetski potencijal fisibilnog nuklearnog goriva (uran i torij) u optimiziranom energetsom sustavu nekoliko stotina puta veći nego onaj što mogu osigurati poznate iskoristive rezerve ugljena (Feretić, 1991).

U 2022. godini globalne emisije CO₂ proizašle iz termoelektrana na ugljen dostigle su rekordne razine. Emitirano je 15,5 gigatona CO₂ u atmosferu. Iz termoelektrana na prirodni plin emitirano je 36,8 gigatona.. Dok se iz procesa rudarenja nuklearnog goriva i izgradnje nuklearnih elektrana mogu mjeriti indirektno emisije CO₂, nuklearne elektrane same po sebi ga ne emitiraju (IEA, 2023).

4.3. Nuklearne katastrofe i testiranja oružja

Nuklearna katastrofa koja se dogodila u reaktoru u Černobilu u travnju 1989. godine smatra se najgorom nuklearnom katastrofom u povijesti. Značajne količine radioaktivne tvari oslobođene su u okoliš.

Glavni radionuklidi oslobođeni iz reaktora su bili jod-131, cezij-134 i cezij-137. Jod-131 ima relativno kratak poluživot od osam dana, no vrlo se brzo prenosi iz okoline u ljudsko tijelo putem konzumacije kontaminiranog mlijeka i lisnatog povrća. U tijelu se akumulira u štitnoj žlijezdi.

Zbog testiranja nuklearnog oružja od sredine 20. stoljeća u atmosferu je izbačena velika količina zračenja na svjetskoj razini. Osim samog testiranja, radionuklidi se otpuštaju i tijekom proizvodnje nuklearnog oružja (Hu, 2008).

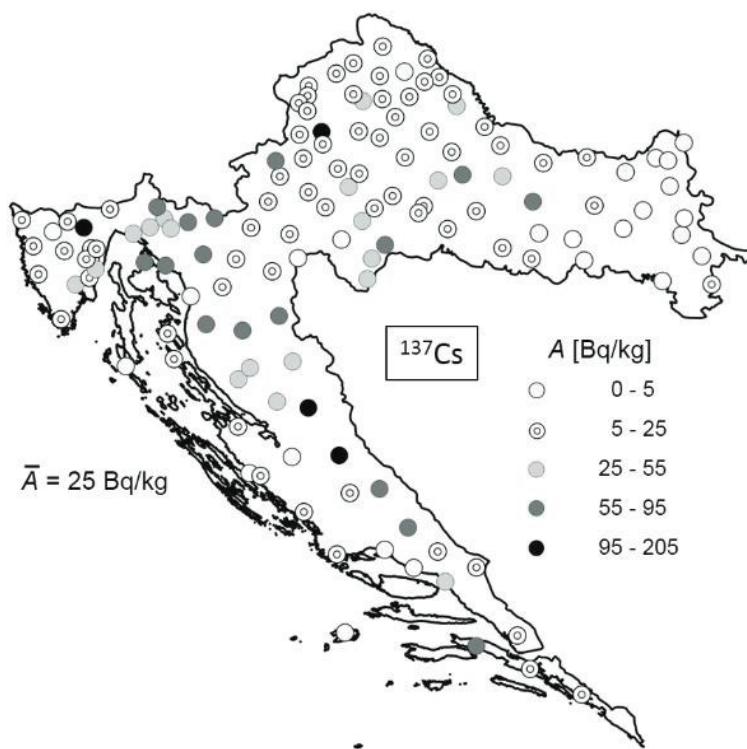
4.3.1. Cezij-137 i stroncij-90

Cezij-137 je nusproizvod fisije urana i testiranja nuklearnog oružja. U manjim količinama se koristi za kalibraciju mjernih uređaja za zračenje, kao i u medicinskoj opremi. Ima sposobnost vezanja s klorom, a u prirodi se ponaša gotovo identično kao natrijev klorid. Otapa se u vodi, a mogu ga apsorbirati i biljke.

U zaštiti okoliša cezij-137 predstavlja značajan problem, budući da kada bude izbačen u atmosferu (uglavnom eksplozijom u nuklearnom reaktoru ili nuklearnog oružja) zbog svog dugog vremena poluživota se u njoj zadržava.

Vanjska izloženost ceziju-137 može dovesti do opekotina i akutnog trovanja radijacijom (Environmental Protection Agency, 2023a).

U Hrvatskoj najveće koncentracije cezija-137 bilježe se na visokim nadmorskim visinama, uz Dinaride, na planini Risnjak te u Zagorju. Na te predjele prvo dolazi kada se ispire iz atmosfere. U najmanjim količinama ga ima u tlu Slavonije (Šoštarić, 2021b). Na slici 18 prikazana je karta Hrvatske s naznačenim prosječnim aktivnim koncentracijama cezija-137.



Slika 18 Karta Hrvatske s aktivnim koncentracijama cezija-137 [Izvor: <https://hrcak.srce.hr/file/368747>]

Stroncij-90 proizvodi se komercijalno nuklearnom fisijom za upotrebu u medicini i industriji. U okolišu se može naći kao posljedica nuklearnih testiranja iz 50-ih i 60-ih godina, kao i u otpadu iz nuklearnih reaktora.

Velike količine stroncija-90 u okoliš su ispuštene tijekom nuklearnih katastrofa u Černobilu i Fukushimi. Kao i cezij, zadržava se u gornjim slojevima atmosfere, odakle se ispire na tlo. Moguće ga je inhalirati, no najveći problem radi ingestija putem vode i hrane. U tijelu oponaša kalcij, te se ugrađuje u kosti i zube. (Environmental Protection Agency, 2023b).

5. UTJECAJ RADIONUKLIDA NA OKOLIŠ

Ionizirajuće zračenje u okolišu može, ali i ne mora predstavljati ekološki problem. Prirodni radionuklidi u uobičajenim koncentracijama ne predstavljaju rizik od ugroze, budući da su živa bića prilagođena na njihovo djelovanje. Do rizika dolazi kada se koncentracija i intenzitet radionuklida na nekom lokalitetu poveća djelovanjem čovjeka.

U okolišu radionuklidi se pronalaze u vodi, tlu i zraku. Moguće ih je naći i u hrani te vodi za piće. Ukoliko koncentracije radionuklida premaše propisane dozvoljene doze dolazi do ugrožavanja ljudskog zdravlja i sigurnosti okoliša.

5.1. Radionuklidi u tlu i vodi

Radionuklidi koji se u najobilnijim koncentracijama pronalaze u tlu su i ranije spomenuti uran-238, kalij-40 i torij-232. U tlo dospijevaju kako prirodnim procesima (budući da su primordijalni), tako i ljudskom aktivnošću.

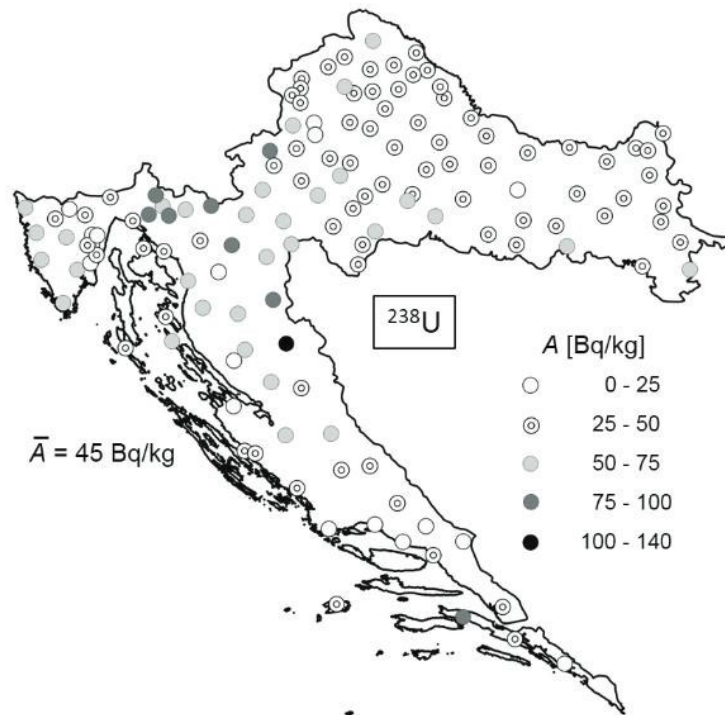
Radioaktivnost stijenske mase se uglavnom izražava u smislu količine gama-zračenja koje neki uzorak sadrži, ili kao prikaz količine nekog specifičnog radionuklida (Cinelli i sur., 2019). Gama spektrometrija se koristi kako bi se detektirali radionuklidi gama-emiteri, te kako bi se odredio točan sastav i količina radionuklida u određenom uzorku.

Prisutnost gama-zračenja na određenom lokalitetu ovisi o klimatskim uvjetima i vrsti stijenske mase o kojoj se radi. Gama-zrake rijetko prodiru više od nekoliko desetaka centimetara u samo tlo. Oko 95% svog terestričkog gama zračenja proizlazi iz gornjih 35 centimetara Zemljine kore (Cinelli i sur., 2019).

Tlo prirodno sadrži veće koncentracije radionuklida nego voda i zrak. Radionuklidi koji ljudskim djelovanjem bivaju ispuštani u zrak ili vodu u konačnici se akumuliraju u tlu.

Visoke koncentracije urana-238 očekuju se u vulkanskim i intruzivnim felzičnim stijenama, te u metamorfnim i sedimentnim stijenama koje nastaju od njih. Na slici 19

prikazana je karta Hrvatske a naznačenim koncentracijama urana-238. Najviše ga se pronalazi u Lici i Dalmaciji (Šošćarić a, 2021).



Slika 19 Koncentracije urana-238 u RH [Izvor : <https://hrcak.srce.hr/file/368739>]

Ranije spomenuti radon-222 nakon raspada iz radija u obliku plina izlazi iz samog tla i u zrak u neposrednoj blizini. Koncentracija radona koji se oslobađa iz tla ovisi o tipu tla, klimatskim uvjetima, tlaku zraka i slično.

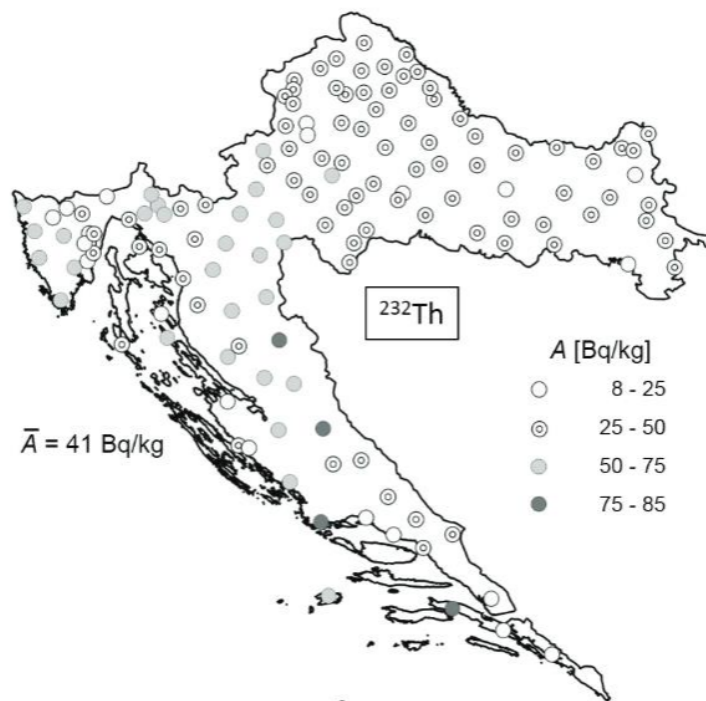
Zbog razlike u temperaturi i pritisku između zatvorenih (pogotovo podzemnih) prostora i vanjskog okruŹja, radon ulazi kroz sitne pore i pukotine u interijer. Zbog ovog procesa radon je među najznačajnijim izvorima ozračenja pojedinca. Općenito se smatra drugim po štetnosti značajnim faktorom pri razvitku raka pluća (odmah iza cigareta).

Ukoliko je koncentracija radona-222 velika, može doći do akumulacije produkta raspada (polonija-218 i polonija-214) u plućima (Cinelli i sur., 2019).

Radioaktivni kalij-40 čini 0,012% svog kalija koji se pojavljuje u prirodi. Kalija u prirodi općenito ima u velikim količinama, tako da relativno mali postotak radioaktivnog kalija na kraju ipak ima značajne vrijednosti. Dok kalij-40 uvelike

doprinosi apsorbiranoj dozi ionizirajućeg zračenja, sam po sebi ne predstavlja rizik za ljudsko zdravlje budući da je prirodno prisutan (Šoštarić b, 2021).

Torij-232 sam po sebi, kao ni uran, ne emitira gama-zračenje. Detekcija torija-232 u litosferi svodi se na detekciju povoljno odabranih produkata njegovog lanca raspada, koji u pobuđenom stanju emitiraju gama zračenje. U Hrvatskoj torij-232 pojavljuje se u istim vrstama stijena kao i uran-238 – pretežno vapnencima i dolomitima. Također ga se u najvećim koncentracijama pronalazi u Lici i priobalju (Šoštarić b, 2021). Na slici 16 vidljiva je karta Hrvatske s naznačenim koncentracijama torija-232.



Slika 20 Koncentracije torija u Hrvatskoj [Izvor: (Šoštarić, 2021b)]

Voda koja se koristi za navodnjavanje potječe iz podzemnih i površinskih prirodnih tokova. Ovisno o kemijskom sastavu matične stijene, starosti i lokaciji, prirodna voda sadrži različite koncentracije radionuklida. Radionuklidi u vodu dopijevaju uglavnom iz stijenske mase unutar koje se voda kreće.

Najčešći radionuklidi u vodi su lanci urana i torija. Uz njih pojavljuju se kalij-40, tricij, ugljik-14 i drugi. Budući da je radon vrlo lako topiv plin, njegova je koncentracija

u vodi obično mnogo veća od roditeljskih radionuklida iz njegova lanca. Uran, torij, radon i kćeri radionuklidi olovo i polonij izrazito su toksični u vodi te predstavljaju ozbiljan rizik za zdravlje ukoliko ih se detektira u velikim koncentracijama. Tricij i ugljik-14 ne predstavljaju toliku opasnost, a moguće ih je koristiti za datiranje podzemnih voda.

U riječnoj vodi može se dogoditi da se radionuklidi akumuliraju u sedimentu kojeg rijeke vuku sa sobom. Kada radionuklidi „zapnu“ za čvrstu i nepokretnu tvar poput gline ili drugih sedimentnih tala, onemogućujući im se kretanje te se povećava koncentracija radionuklida u sedimentu (Cinelli i sur., 2019).

Na mjestima gdje prevladavaju granitne matične stijene, ili gdje postoji velika koncentracija organskih tvari, postoji povećan rizik od velike koncentracije radionuklida u vodi za piće. U većini kopnenih voda koncentracija urana kreće se između 0,1 i 10 mikrograma po litri.

Kao rezultat rudarenja, miniranja i raznih proizvodnih procesa nastaje torijev dioksid ThO_2 koji se otpušta u vodu. Budući da ima relativno malu topivost, akumulira se u sedimentu ili u obliku suspendiranih čestica u vodi. Miješanje i uznemiravanje sedimenta može dovesti do transporta torija kroz vodu, no u nekim slučajevima koncentracija otopljenog torija u vodi raste kao posljedica stvaranja topivih spojeva s karbonatima ili drugim ligandima u vodi.

5.2. Radionuklidi u hrani i piću

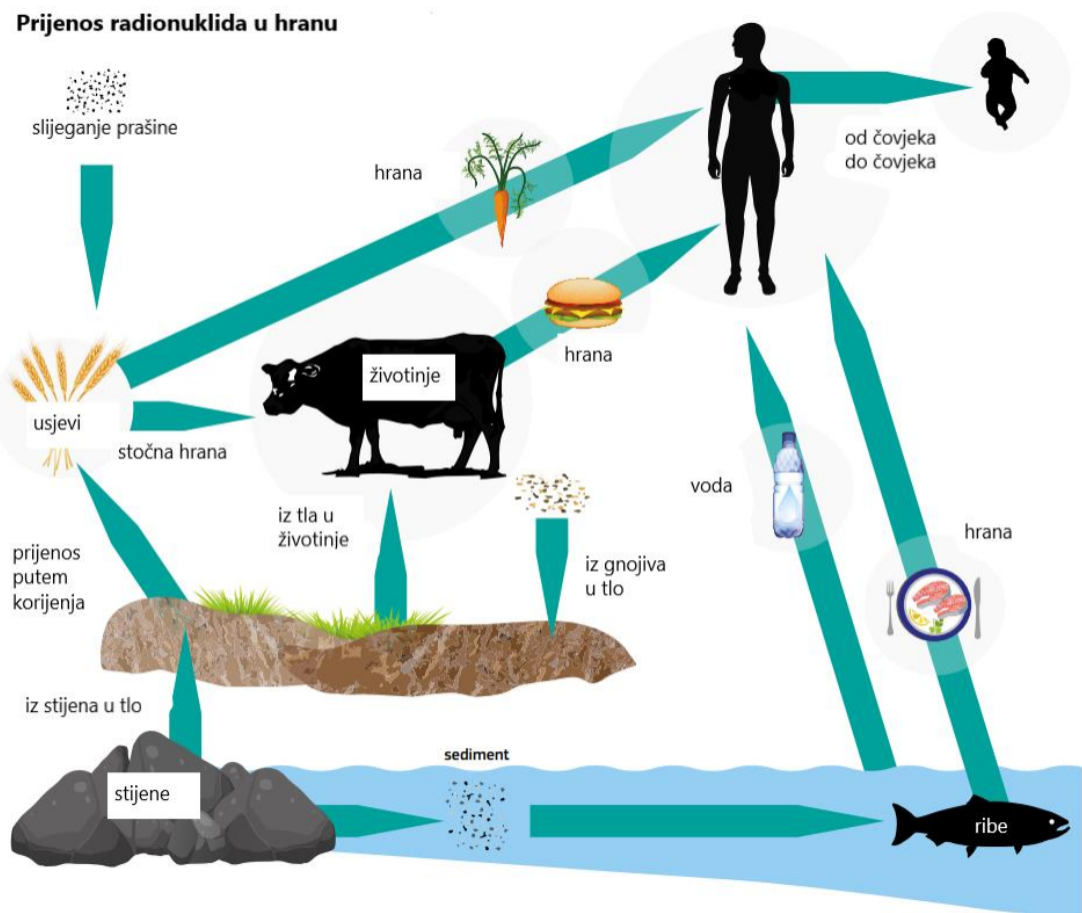
Gotovo sve vrste hrane sadrže u sebi određenu količinu ionizirajućeg zračenja. Zračenje u hranu dopijeva putem tla, kroz korijenje biljaka i u plodove. Može stići i putem vode, u ribama i životinjama koje konzumiraju kontaminiranu hranu.

Moguće je da količina zračenja u različitim vrstama hrane dramatično varira ovisno o okolišnim uvjetima, poljoprivrednim tehnikama i raznim drugim faktorima koji mogu utjecati na prijenos radionuklida iz tla u biljne i životinjske proizvode.

U slučaju unošenja u organizam, topivi radioaktivni spojevi mogu prijeći kroz membrane koje tvore sluznice probavnog sustava. Mogu stići do krvne plazme i njome

se prenositi u sva tkiva i organe. Točna količina koja ostaje u tijelu, a koja biva izbačena ovisi o specifičnom spoju. Uglavnom se radionuklidi izbacuju putem urina. Netopivi spojevi također prolaze kroz sustav te putem ozračuju sluznice alfa-, beta- i gama zračenjem.

Doze zračenja primljene putem hrane i vode na godišnjoj bazi iznose od nekoliko desetaka do nekoliko stotina μSv . U prosjeku to iznosi 0,3 mSv godišnje (Cinelli i sur., 2019). Na slici 17 može se vidjeti shematski prikaz toka radionuklida u okolišu koji iz vode i tla dospijevaju u biljke i životinje, i naposljetku u ljudski organizam.



Slika 21 Tok radionuklida u okolišu do hrane i čovjeka [Izvor : (Cinelli i sur., 2019)]

5.3. Radioaktivni otpad

Potrošeno gorivo iz nuklearnih energana može biti važan resurs. Može se koristiti kao izvor napajanja za satelite, ali i kao izvor topline, budući da tijekom raspada emitira velike količine toplinske energije.

Radioaktivni otpad koji nije moguće prenamijeniti u neku drugu svrhu, potrebno je pravilno odložiti. Tri su koraka u obradi radioaktivnog otpada :

1. Predobrada → skupljanje i razvrstavanje, dekontaminacija
2. Obrada → povećanje sigurnosti i ekonomičnosti odlaganja; smanjivanje obujma i promjena kemijskog sastava
3. Kondicioniranje → skladištenje i pakiranje otpada (Zbrinjavanje radioaktivnog otpada, 2023).

U mnogim pogledima odlaganje radioaktivnog otpada slično je odlaganju bilo koje druge vrste otpada: potrebno je odraditi istražne radove, odabrati dobru lokaciju i pravilno projektirati odlagalište na način da se maksimalno ispoštuje zakonsku regulativu i preporuke prakse.

U Republici Hrvatskoj odlaganjem radioaktivnog otpada bavi se Državni zavod za radiološku i nuklearnu sigurnost.

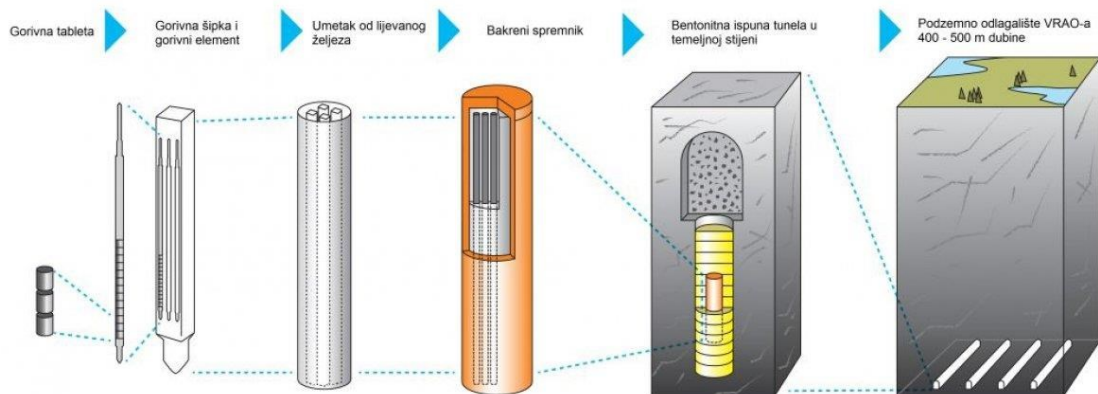
Radioaktivni otpad dijeli se u tri kategorije; Visoko radioaktivni otpad, Srednje radioaktivni otpad i Nisko radioaktivni otpad.

Nisko radioaktivni otpad uključuje pomoćne pribore koji se koriste u radu s radionuklidima, kao što su laboratorijske i medicinske kute, rukavice, osobna zaštitna oprema, laboratorijsko staklo itd. Radionuklidi su uglavnom kraćeg poluživota.

Srednje radioaktivni otpad čine jače kontaminirani materijali, poput dijelova reaktora izvan komisije, otpadnih muljeva i voda. Srednje je termičke aktivnosti, no radionuklidi imaju dug poluživot. Podrazumijeva otpad iz postrojenja za reprocesiranje goriva, dio otpada iz nuklearnih elektrana, kao i dijelove vatrenog oružja.

Visoko radioaktivni otpad podrazumijeva gorive elemente i jako radioaktivne tekućine. Karakteriziraju ga dugoživi radionuklidi i visoka termička aktivnost. Radi

se o otpadu iz postrojenja za reprocesiranje goriva. Nastaje u relativno malim količinama (10 000t godišnje). Odlaze se prvo u bazene za hlađenje, a tek onda trajno zbrinjava (Zbrinjavanje radioaktivnog otpada, 2023). Na slici 18 prikazana je shema dubokih geoloških odlagališta u kakva se sprema visoko radioaktivni otpad.



Slika 22 Shema dubokog geološkog odlagališta [Izvor : (Zbrinjavanje radioaktivnog otpada, 2023)]

U Hrvatskoj još ne postoji duboko geološko skladište visoko radioaktivnog otpada, no pripada nam polovica svog otpada iz nuklearne elektrane Krško u Sloveniji.

Od 1959. do 2000. u funkciji je bilo skladište Instituta za medicinska istraživanja i medicinu rada u svrhu prihvata institucionalnog radioaktivnog otpada i iskorištenih izvora. Po zatvaranju skladišta jedan dio otpada ostao je u saniranom i zatvorenom skladištu, dok se drugi dio pohranjuje u skladištu Instituta Ruđer Bošković.

U osnivanju je centar za skladištenje nisko i srednje radioaktivnog otpada na lokaciji bivše vojarne Čerkezovac u Sisačko-moslavačkoj županiji. Postojeća vojna skladišta će se početi koristiti kada budu ispunjeni uvjeti za sigurno skladištenje otpada. Potrebno je provesti studiju utjecaja na okoliš, u sklopu koje će se odraditi istraživački radovi i sigurnosne analize. Nakon ishoda potrebnih dozvola projekt će krenuti s radom (Zbrinjavanje radioaktivnog otpada, 2023).

Izazov je dizajnirati odlagalište radioaktivnog otpada koje će moći trajati desecima tisuća godina. Dugoročni sustavi upozorenja na nuklearnu opasnost razvijaju se kako bi

se generacije 10 000 godina u budućnosti učinkovito upozorilo na lokaciju odlagališta radioaktivnog otpada. Nemoguće je sa sigurnošću pretpostaviti da će buduće generacije znati pročitati pismo kojim se danas služimo, niti da će moći prepoznati simboliku kojom označavamo radioaktivnost.

5.4. Zaštita od ionizirajućeg zračenja

Granične doze zračenja koje se prime tijekom rada s otvorenim ili zatvorenim izvorima zračenja propisane su zakonom.

Pravilnikom o praćenju stanja radioaktivnosti u okolišu utvrđuju se uvjeti, načini, mjesta i rokovi sustavnog ispitivanja i praćenja vrste i aktivnosti radionuklida na području Republike Hrvatske. Praćenje stanja okoliša provodi se u cilju „procjene ozračenja pojedinog stanovnika od globalnog i lokalnog utjecaja zbog djelatnosti s izvorima ionizirajućeg zračenja, radnih aktivnosti i postojećeg ozračenja“ (Državni zavod za radiološku i nuklearnu sigurnost, 2018).

Na globalnoj razini, praćenjem stanja radionuklida u okolišu bavi se Međunarodna agencija za atomsku energiju (IAEA). Cilj djelovanja je razvoj nuklearne energije i praćenje stanja nuklearnog oružja u svijetu. Prosječna osoba primi 3-4 mSv ionizirajućeg zračenja godišnje. Doza raste za medicinske radnike i radnike u nuklearnim postrojenjima, kao i za rudare i pilote zrakoplova.

U svakodnevnom životu prosječna osoba rijetko ima potrebu poduzimati mjere zaštite od ionizirajućeg zračenja. Kako je ranije navedeno, ljudsko tijelo je prilagođeno prirodnom zračenju. Ipak, ukoliko se nađe u okolnostima izloženosti velike količine zračenja, treba slijediti nekoliko osnovnih principa. Najvažnije je ograničiti vrijeme provedeno u blizini izvora ionizirajućeg zračenja. Dugotrajno izlaganje čini najveću štetu. Jakost zračenja opada s udaljenosti, tako da se najbolje udaljiti od izvora.

Barijere od olova, betona ili čak vode mogu pružiti neku mjeru zaštite. U medicinskim dijagnostičkim postupcima često se pacijentu izolira dio tijela koji se želi zaštititi pomoću odjeće prošivene olovom (EPA, 2023).

6. ZAKLJUČAK

Radionuklidi su radioaktivni izotopi nekog kemijskog elementa. Imaju nestabilan omjer protona i neutrona, ili višak energije u jezgri. Stabilnost nastoje postići emitiranjem ionizirajućeg zračenja. Lanac raspada, odnosno niz raspada, je niz produkata raspada koji nastaju dok pojedini radionuklid pokušava dostići stabilnost. Radionuklidi mogu u okruženje čovjeka doći iz prirodnih ili antropogenih izvora.

Prirodna radioaktivnost glavni je izvor zračenja kojem je ljudsko tijelo izloženo na dnevnoj bazi. Ona ne predstavlja rizik po zdravlje pojedinca, budući da su sva živa bića na planetu Zemlji evoluirala uz određenu dozu prirodnog zračenja. Bez obzira na to, prirodne izvore radionuklida iznimno je važno uzeti u obzir prilikom bilo kakvih istraživanja, kako ne bi došlo do krive interpretacije rezultata mjerenja.

Prirodni radionuklidi mogu biti kozmičkog i terestričkog podrijetla, a u ljudsko tijelo mogu ući udisanjem te putem hrane i vode.

Velika većina antropogenog zračenja do pojedinca dolazi putem raznih medicinskih postupaka dijagnostike i liječenja. Značajan izvor antropogenih radionuklida je i proizvodnja nuklearne energije.

Radioaktivni otpad nastao obradom prirodnih izvora radionuklida potrebno je zbrinuti na odgovarajući način, kako ne bi ugrožavao ljudsku sigurnost te prirodnu ravnotežu ekosustava. Potrebno je adekvatno projektirati odlagališta radioaktivnog otpada, pogotovo u dugoročnom odlaganju.

7. IZVORI

Izvori

AMS, 2012. *Glossary of Meteorology -- Radiative flux density*. [Mrežno]
Dostupno na: https://glossary.ametsoc.org/wiki/Radiative_flux_density
[Datum pristupa sadržaju 30 kolovoz 2023].

Berggren, A.-M., 2009. *Influence of solar activity and environment on beryllium-10 in recent natural archives (Doktorska disertacija)*. Uppsala: Uppsala Universitet.

Britannica, 2020. *Potassium-argon dating*. [Mrežno]
Dostupno na: <https://www.britannica.com/science/potassium-argon-dating>
[Datum pristupa sadržaju 30 kolovoz 2023].

Cinelli, G., De Cort, M. & Tollefsen, T., 2019. *European Atlas of Natural Radiation*. 1st ur. Luksemburg: Izdavački ured Europske unije.

CNRS e, 2023. *Carbon-14*. [Mrežno]
Dostupno na: <https://radioactivity.eu.com/phenomenon/radiocarbon>
[Datum pristupa sadržaju 30 kolovoz 2023].

CNRSa, 2023. *How heavy nuclei lose weight ... by emitting alpha particles*. [Mrežno]
Dostupno na: https://radioactivity.eu.com/phenomenon/radioactivity_alpha
[Datum pristupa sadržaju 27 srpanj 2023].

CNRSb, 2023. *How Nature corrects an excess of protons or neutrons*. [Mrežno]
Dostupno na: https://radioactivity.eu.com/phenomenon/radioactivity_beta
[Datum pristupa sadržaju 28 kolovoz 2023].

CNRSc, 2023. *Radioactivity Gamma (How nuclei get rid of excess energy)*. [Mrežno]
Dostupno na: https://radioactivity.eu.com/phenomenon/radioactivity_gamma
[Datum pristupa sadržaju 28 kolovoz 2023].

CNRSd, 2023. *Cosmogenic Radioelements*. [Mrežno]

Dostupno na: https://radioactivity.eu.com/in_daily_life/cosmogenic_radioelements

[Datum pristupa sadržaju 28 srpanj 2023].

Das, A. & Ferbel, T., 2005. *Introduction to Nuclear and Particle Physics*. drugo izdanje

Environmental Protection Agency (a), 2023. *Radiation basics - Caesium*. [Mrežno]

Dostupno na: <https://www.epa.gov/radiation/radionuclide-basics-caesium-137>

[Datum pristupa sadržaju 29 kolovoz 2023].

Environmental Protection Agency (b), 2023. *Radiation basics - Strontium-90*.

[Mrežno]

Dostupno na: <https://www.epa.gov/radiation/radionuclide-basics-strontium-90>

[Datum pristupa sadržaju 29 kolovoz 2023].

EPA , 2023. *Radiation sources and doses*. [Mrežno]

Dostupno na: <https://www.epa.gov/radiation/radiation-terms-and-units>

[Datum pristupa sadržaju 30 kolovoz 2023].

EPA, 2023. *Protecting yourself from radiation*. [Mrežno]

Dostupno na: <https://www.epa.gov/radiation/protecting-yourself-radiation>

[Datum pristupa sadržaju 29 kolovoz 2023].

EPA, 2023. *Types of Ionizing Radiation*. [Mrežno]

Dostupno na: <https://www.epa.gov/radiation/radiation-basics#typesofionizing>

[Datum pristupa sadržaju 2023].

Feretić, D., 1991. *Uvod u nuklearnu energetiku*, Zagreb: Školska knjiga.

Franić, Z., 1994. *Radiation doses due to the human exposure to cosmic radiation in the Republic of Croatia*. [Mrežno]

Dostupno na: <https://hrcak.srce.hr/file/214903>

[Datum pristupa sadržaju 30 kolovoz 2023].

Hu, Q.-H., 2008. Sources of anthropogenic radionuclides in the environment: a review, J. *Journal of Environmental Radioactivity*, pp. 1-12.

IEA, 2023. *Energy systems*. [Mrežno]

Dostupno na: <https://www.iea.org/energy-system/fossil-fuels/coal>

[Datum pristupa sadržaju 30 kolovoz 2023].

Institut Ruđer Bošković, 2019. *Mjerenje koncentracije aktivnosti tricija (3H) u prirodnim vodama*. [Mrežno]

Dostupno na: <https://www.irb.hr/Zavodi/Zavod-za-eksperimentalnu-fiziku/Laboratorij-za-mjerenje-niskih-radioaktivnosti/Usluge/Mjerenje-koncentracije-aktivnosti-tricija-3H-u-prirodnim-vodama>

[Datum pristupa sadržaju 30 kolovoz 2023].

Institut Ruđer Bošković, 2019. *Određivanje starosti metodom 14C*. [Mrežno]

Dostupno na: <https://www.irb.hr/Zavodi/Zavod-za-eksperimentalnu-fiziku/Laboratorij-za-mjerenje-niskih-radioaktivnosti/Usluge/Odredivanje-starosti-metodom-14C>

[Datum pristupa sadržaju 28 kolovoz 2023].

Karecha, P. & Hansen, J., 2013. Prevented Mortality and Greenhouse Gas Emissions from Historical. *Environmental science and technology*, 15 ožujak, p. 47.

KBC Dubrava, 2023. *Scintigrafija*. [Mrežno]

Dostupno na: <https://www.kbd.hr/odjeli-zavodi-klinike/odjel-za-nuklearnu-medicinu/dijagnostika/scintigrafija/scintigrafija-kosti/>

[Datum pristupa sadržaju 28 kolovoz 2023].

Max-Planck Gesellschaft, 2004. *How strongly does the Sun influence the global climate?*. [Mrežno]

Dostupno na: <https://www.mpg.de/research/sun-influence-global-climate>

[Datum pristupa sadržaju 30 kolovoz 2023].

Neutron Monitoring Database, 2021. *Cosmic Rays: High energy particles from the Universe*. [Mrežno]

Dostupno na: https://www.nmdb.eu/public_outreach/en/01/

[Datum pristupa sadržaju 28 kolovoz 2023].

Nuklearna elektrana Krško, 2023. *Uranij i nuklearna fisija*. [Mrežno]

Dostupno na: <https://www.nek.si/hr/o-nuklearnoj-energiji/uranij-i-nuklearna-fisija>

[Datum pristupa sadržaju 29 kolovoz 2023].

Purdue Rare Isotope Measurement Laboratory, 2023. *Beryllium 10*. [Mrežno]
Dostupno na: <https://www.physics.purdue.edu/primelab/ams/10Be.php>
[Datum pristupa sadržaju 29 kolovoz 2023].

Smojver, D. & Vitale, K., 2021. Zbrinjavanje radioaktivnog otpada nakon medicinske dijagnostike i terapije. *Sigurnost: Časopis za sigurnost u radnoj i životnoj okolini*, 12 travanj, pp. 77-87.

Šoštarić, M., 2021. *Radioactivity of soil in Croatia 2*, Zagreb: Institut za higijenu rada i toksikologiju.

Šoštarić, M., 2021. *Radioactivity of soil in Croatia I: naturally occurring decay*. Zagreb: Institut za higijenu rada i toksikologiju.

UKEA, 2003. *Radionuclide Handbook*. [Mrežno]
Dostupno na:
https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/291128/sp3-101-sp1b-e-e.pdf
[Datum pristupa sadržaju 30 kolovoz 2023].

UNSCEAR, 2020/2021. *Sources, effects and risks of ionizing radiation, vol IV*, s.l.: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation.

USGS, 2004. *Resources on isotopes; Periodic table -- Beryllium*. [Mrežno]
Dostupno na: https://wwwrcamnl.wr.usgs.gov/isoig/period/be_iig.html
[Datum pristupa sadržaju 30 kolovoz 2023].

WHO, 2016. *Ionizing radiation, health effects and protective measures*. [Mrežno]
Dostupno na: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ionizing-radiation-health-effects-and-protective-measures>
[Datum pristupa sadržaju 2023].

Zbrinjavanje radioaktivnog otpada, 2023. *Odlaganje VRAO-a*, s.l.: Fond za financiranje razgradnje NEK.

Popis slika, tablica i jednadžbi

Slika 1 Podjela EM zračenja [Izvor: https://glossary.periodni.com/glosar.php?hr=spektar+elektromagnetskog+zra%C4%8Denja]	2
Slika 2 Ovisnost broja radioaktivnih jezgri o vremenu [Izvor : https://edutorij.e-skole.hr/share/proxy/alfresco-noauth/edutorij/api/proxy-guest/f8d552c1-03ca-47a1-943a-61ea3e2d1bd0/izotopi-alfa-i-beta-radioaktivni-raspad.htm]	4
Slika 3 Alfa i beta zračenje [Izvor: https://edutorij.e-skole.hr/share/proxy/alfresco-noauth/edutorij/api/proxy-guest/f8d552c1-03ca-47a1-943a-61ea3e2d1bd0/izotopi-alfa-i-beta-radioaktivni-raspad.html]	5
Slika 4 Gama zračenje [Izvor : https://radioactivity.eu.com/phenomenon/radioactivity_gamma]	6
Slika 5 Izvori izlaganja zračenju [Izvor : (Cinelli i sur., 2019)]	8
Slika 6 Putanje kozmičkih zraka [Izvor: https://www.dnaindia.com/technology/report-cosmic-rays-can-make-deep-space-ventures-risky-for-astronauts-in-future-2028352]	10
Slika 7 Ugljik-14 i berilij-10 u okolišu [Izvor: https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.1118965109]	11
Slika 8 Korelacija koncentracija berilija-10 s brojem Sunčevih pjega [Izvor: https://en.wikipedia.org/wiki/Beryllium-10#/media/File:Solar_Activity_Proxies.png]	12
Slika 9 Ciklus C-14 u okolišu [Izvor: https://science.howstuffworks.com/environmental/earth/geology/carbon-14.htm]	13
Slika 10 Koncentracije aktivnosti tricija od 1950-2016. 1 TU = 0,118 Bq/L [Izvor: (Institut Ruđer Bošković, 2019)]	14
Slika 11 Niz raspada urana-238 [Izvor : https://glossary.periodni.com/glosar.php?hr=radioaktivni+niz]	15
Slika 12 Načini ulaska radona u kuću [Izvor : https://repositorij.gfv.unizg.hr/islandora/object/gfv%3A448/datastream/PDF/view] ...	16
Slika 13 Kalij u magmatskim stijjenama [Izvor: https://thenoblegasbag.wordpress.com/tag/potassium/]	17

Slika 14 Lanac raspada torija-232 [Izvor https://repozitorij.pmf.unizg.hr/islandora/object/pmf%3A2610/datastream/PDF/view]	18
Slika 15 Prosječne primljene doze za izložene medicinske djelatnike po odjelima [Izvor: https://hrcak.srce.hr/file/291987].....	20
Slika 16 Nuklearna fisija urana [Izvor : https://www.nek.si/hr/o-nuklearnoj-energiji/uranij-i-nuklearna-fisija].....	21
Slika 17 Godišnja efektivna doza zračenja iz nuklearnih reaktora (1975-2014)	22
Slika 18 Karta Hrvatske s aktivnim koncentracijama cezija-137 [Izvor: https://hrcak.srce.hr/file/368747]	24
Slika 19 Koncentracije urana-238 u RH [Izvor : https://hrcak.srce.hr/file/368739] ..	26
Slika 20 Koncentracije torija u Hrvatskoj [Izvor: (Šoštarić, 2021)].....	27
Slika 21 Tok radionuklida u okolišu do hrane i čovjeka [Izvor : (Cinelli i sur., 2019)]	29
Slika 22 Shema dubokog geološkog odlagališta [Izvor : (Zbrinjavanje radioaktivnog otpada, 2023)]	31
 Tablica 1 Doze zračenja s opisima i mjernim jedinicama.....	7
 Jednadžba 1 prikazuje formulu za zakon radioaktivnog raspadaError! Bookmark not defined.	