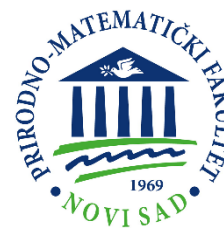




UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNO-MATEMATIČKI
FAKULTET



Radiološka karakterizacija jestivih pečuraka iz uvoza i procena ingestione doze

– MASTER RAD –

Mentori:

doc. dr Jovana Knežević Radić

dr Nataša Sarap

Student:

Jovana Gašparović

Novi Sad, 2026.

Zahvalnica

Najveću i najiskreniju zahvalnost dugujem svojoj mentorki, doc. dr Jovani Knežević Radić, na nesebičnoj podršci, razumevanju i poverenju koje mi je ukazala tokom izrade ovog master rada.

Njena stručnost, posvećenost i spremnost da u svakom trenutku pruži savet, usmerenje i ohrabrenje bili su neprocenjivi. Pored izuzetne profesionalnosti, posebno sam zahvalna na ljudskoj toplini, strpljenju i veri u mene, koji su mi dali dodatnu motivaciju i sigurnost tokom čitavog istraživačkog procesa. Saradnja sa njom predstavljala je ne samo akademsku čast, već i lično zadovoljstvo i dragoceno iskustvo.

Veliku zahvalnost upućujem i dr Nataši Sarap sa Instituta za nuklearne nauke „Vinča“, Institut od nacionalnog značaja za Republiku Srbiju, koja je bila zadužena za realizaciju praktičnog dela istraživanja, određivanje ukupne alfa i beta aktivnosti. Njena stručna pomoć, profesionalan pristup i spremnost da prenese svoje znanje značajno su doprineli uspešnoj realizaciji eksperimentalnog dela rada. Posebnu zahvalnost dugujem joj na tome što me je upoznala sa, za mene, novom eksperimentalnom metodom i strpljivo me uvela u sve korake njenog izvođenja, čime je značajno obogatila moje istraživačko iskustvo. Njena otvorenost za pitanja, podrška i prijatan radni ambijent učinili su ovaj deo istraživanja ne samo uspešnim, već i veoma inspirativnim iskustvom.

Iskrenu zahvalnost dugujem svojoj porodici i Lazaru na безусловnoj ljubavi, razumevanju i podršci tokom svih godina školovanja. Njihova vera u mene bila je moj najveći oslonac i podstrek da istrajem do kraja.

Veliko hvala i mojoj prijateljici Julijani Cvjetinović na podršci tokom celokupnog perioda studiranja.

SADRŽAJ

1. UVOD.....	5
2. RADIOAKTIVNOST U ŽIVOTNOJ SREDINI.....	6
2.1 Radioaktivni raspad i period poluraspada.....	6
2.1.1 Alfa, beta i gama-raspad.....	7
2.2 Aktivnost radioaktivnog izvora.....	9
2.3 Prirodna radioaktivnost.....	9
2.3.1 Vrste prirodnih radioaktivnih izvora.....	10
2.3.2 Radioaktivni nizovi.....	10
2.3.3 Prirodni radionuklidi u zemljištu i njihov značaj.....	12
2.4 Veštačka radioaktivnost.....	13
2.5 Transfer faktor (<i>TF</i>).....	14
2.6 Procena ingestionog rizika.....	15
2.6.1 Efektivna doza zračenja.....	15
2.6.2 Efektivna ingestiona doza.....	16
3. MAKROGLJIVE I NJIHOVA ULOGA BIOINDIKATORA STANJA ŽIVOTNE SREDINE.....	19
3.1 Akumulacija radionuklida u pečurkama.....	20
3.1.1 Biomolekulski osnovi akumulacije cezijuma u pečurkama.....	21
4. OSNOVE GAMA-SPEKTROMETRIJE KORIŠĆENJEM HPGe DETEKTORA.....	22
4.1 Gama zračenje.....	22
4.1.1 Interakcija fotona sa materijom.....	22
4.1.2 Atenuacija fotona.....	23
4.1.3 Aktivnost uzorka.....	23
4.2 HPGe detektor.....	24
4.2.1 Efikasnost detektora.....	24
4.2.2 Aktivnosti radioizotopa.....	25
5. EKSPERIMENTALNI DEO.....	26
5.1 Određivanje koncentracije aktivnosti radionuklida merenjem na HPGe detektoru.....	26
5.1.1 Uzorkovanje i priprema uzoraka.....	26

5.1.2	Merenje na HPGe detektoru	26
5.1.3	Rezultati određivanja koncentracija aktivnosti radionuklida i ingestione doze	28
5.2	Određivanje ukupne alfa i beta aktivnosti merenjem na gasnom proporcionalnom brojaču	33
5.2.1	Uzorkovanje i priprema uzoraka	33
5.2.2	Osnovni principi rada i karakteristike niskofonskog gasnog proporcionalnog brojača Thermo Eberline FHT 770T	36
5.2.3	Analiza uzoraka i računanje ukupne alfa i beta aktivnosti	38
5.2.4	Rezultati određivanja ukupne alfa i beta aktivnosti.....	40
6.	DISKUSIJA REZULTATA.....	41
6.1	Određivanje koncentracije aktivnosti radionuklida u pečurkama merenjem na HPGe detektoru.....	41
6.1.1	Koncentracija aktivnosti ¹³⁷ Cs.....	41
6.1.2	Ukupne godišnje efektivne ingestione doze	42
6.1.3	Poređenje rezultata sa sličnim studijama.....	44
6.2	Određivanje ukupne alfa/beta aktivnosti u pečurkama merenjem na gasnom proporcionalnom brojaču	47
6.2.1	Korelacije ukupne alfa/beta aktivnosti sa koncentracijom pojedinačnih radionuklida	47
7.	ZAKLJUČAK.....	50
	REFERENCE.....	51
	BIOGRAFIJA	53

1. UVOD

Radioaktivnost je prirodna pojava spontanog raspada nestabilnih atomskih jezgara, praćena emisijom alfa, beta i gama-zraćenja. Ona je stalno prisutna u životnoj sredini, potičući iz prirodnih izvora, kao što su kosmičko zračenje i primordijalni radionuklidi u Zemljinoj kori, ali i iz antropogenih aktivnosti poput nuklearnih proba, akcidenata i primene radionuklida u medicini i industriji. Praćenje raspodele i migracije radionuklida u ekosistemu od suštinskog je značaja za procenu izloženosti stanovništva i zaštitu životne sredine.

Zemljište predstavlja ključni rezervoar prirodnih i veštačkih radionuklida, čija mobilnost zavisi od njegovih geoloških i fizičko-hemijskih karakteristika. Među njima se posebno izdvaja ^{137}Cs , dugoživeći produkt nuklearnih aktivnosti, koji se zbog hemijske sličnosti sa kalijumom lako uključuje u biogehemijske cikluse i na taj način ulazi u lanac ishrane.

Pečurke, zahvaljujući razvijenom micelijumu i sposobnosti efikasne apsorpcije elemenata iz supstrata, mogu akumulirati metale i radionuklide u koncentracijama višim od onih u zemljištu, što ih čini pouzdanim bioindikatorima zagađenja. Zbog njihove upotrebe u ishrani, određivanje koncentracije aktivnosti radionuklida i procena efektivne ingestione doze imaju značajnu ulogu u radiološkoj zaštiti stanovništva.

Cilj ovog master rada je određivanje koncentracije aktivnosti prirodnih i veštačkih radionuklida u uzorcima pečuraka, kao i procena godišnje efektivne ingestione doze zraćenja za stanovništvo. Korišćene su eksperimentalne metode određivanja koncentracije aktivnosti radionuklida primenom niskofonske gama-spektrometrije HPGe detektorom, kao i određivanje ukupne alfa i beta aktivnosti korišćenjem niskofonskog gasnog proporcionalnog brojača. Dobijeni rezultati su diskutovani i upoređeni sa rezultatima sličnih studija.

2. RADIOAKTIVNOST U ŽIVOTNOJ SREDINI

Otkriće rendgenskih zraka 1895. godine podstaklo je H. Bekerela da ispita da li fosforescentni¹ i fluorescentni materijali² emituju zračenje. Eksperimenti sa solima uranijuma doveli su do neočekivanog otkrića: čak i bez izlaganja svetlosti, uranijumske soli su potamnile fotografske ploče, što je ukazalo da same emituju zračenje. Bekerel je dokazao da je izvor ovih zraka upravo uranijum, bez obzira na hemijski oblik jedinjenja, čime je radioaktivnost identifikovana kao svojstvo samog atoma.

Dalja istraživanja koja su sprovedeli Pjer i Marija Kiri pokazala su da je radioaktivnost proporcionalna količini uranijuma i dovela su do otkrića novih radioaktivnih elemenata - polonijuma i radijuma. U isto vreme E. Raderford je pokazao da se emitovano zračenje sastoji od različitih komponenti: slabije prodornih i pozitivno naelektrisanih alfa čestica, prodornijih negativno naelektrisanih beta čestica i visokoenergetskog elektromagnetnog gama-zračenja. Utvrđeno je da su alfa čestice jezgra helijuma, beta čestice elektroni, dok su gama-zraci elektromagnetno zračenje vrlo kratke talasne dužine. Time je potvrđeno da je radioaktivnost proces koji potiče iz nuklearnog, a ne hemijskog nivoa atoma.

2.1 Radioaktivni raspad i period poluraspada

Brzina kojom se radioaktivni materijal raspada ne zavisi od njegovog fizičkog ili hemijskog stanja. Iako nije moguće predvideti koje će se pojedinačno jezgro raspasti u određenom trenutku, statistički je moguće odrediti očekivan broj raspada u nekom vremenskom intervalu. Pretpostavlja se da svako jezgro ima jednaku verovatnoću raspada u jedinici vremena, definisanu kao **konstanta radioaktivnog raspada** λ .

Verovatnoća da će se jezgro raspasti u malom intervalu dt iznosi (Krmar, 2013):

$$\lambda dt \quad (2.1)$$

Ako je u uzorku prisutno N radioaktivnih jezgara, očekivani broj raspada tokom vremenskog intervala dt dat je izrazom:

$$dN = -\lambda N dt \quad (2.2)$$

Integracijom diferencijalne jednačine dobija se eksponencijalni oblik zakona raspada:

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (2.3)$$

gde su N_0 početni broj jezgara, a N broj preostalih jezgara u trenutku t . Ovaj izraz predstavlja **zakon radioaktivnog raspada** i pokazuje da se količina radioaktivne supstance smanjuje eksponencijalno tokom vremena.

¹ Fosforescentni materijali su supstance koje, nakon izlaganja svetlosti, apsorbuju energiju i potom je postepeno emituju u vidu svetlosti tokom određenog vremena, čak i nakon prestanka osvetljavanja.

² Fluorescentni materijali su supstance koje apsorbuju svetlost određene talasne dužine i gotovo trenutno je emituju kao svetlost druge talasne dužine, ali prestaju da svetle odmah po uklanjanju izvora zračenja.

Vreme poluraspada predstavlja vreme potrebno da se broj radioaktivnih jezgara smanji na polovinu početne vrednosti. Dobija se uvođenjem uslova da je:

$$N = \frac{N_0}{2} \quad (2.4)$$

što vodi do relacije:

$$\lambda T_{1/2} = \ln 2 \quad (2.5)$$

odnosno:

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad (2.6)$$

Nakon jednog vremena poluraspada preostaje polovina početnog broja jezgara, nakon dva - jedna četvrtina, i tako dalje.

Vremena poluraspada različitih radionuklida obuhvataju širok opseg vrednosti: radijum ima vreme poluraspada od oko 1620 godina, dok radon ima svega 3,82 dana. Generalno, procesi alfa-raspada imaju najduža vremena poluraspada (često milijarde godina), beta-raspadi su srednjeg trajanja, a gama-emisija može imati izuzetno kratka vremena poluraspada (oko 10^{-10} s).

2.1.1 Alfa, beta i gama-raspad

Alfa-raspad je proces u kome nestabilno jezgro emituje alfa-česticu, tj. jezgro helijuma. Ovim raspadom se smanjuje maseni broj za 4, a atomski broj za 2:



Ovaj proces je karakterističan za teške nuklide (Th, U, Ra, Po), a energija emitovanih α -čestica ima diskretan spektar. U analizi hrane i bioloških uzoraka posebno je važan zbog visokog linearnog koeficijenta jonizacije.

Beta-minus raspad nastaje kada se neutron u jezgru pretvara u proton uz emisiju:

- elektrona (β^-),
- antineutrina ($\bar{\nu}_e$)

Atomski broj se povećava za jedan, dok maseni broj ostaje isti.



Ovi raspadi postepeno menjaju atomski broj i maseni broj sve dok se ne dostigne stabilan izotop.

Beta-plus raspad nastaje kada se proton u jezgru pretvara u neutron uz emisiju:

- pozitrona (β^+),
- neutrino čestice (ν_e).

Atomski broj se smanjuje za jedan, dok maseni broj ostaje isti.



Ako nuklid nema dovoljno energije za emisiju pozitrona, dešava se elektronski zahvat:



Elektronski zahvat i β^+ su ređi u prirodnoj radioaktivnosti, ali se sreću kod nekih kosmogenih nuklida.

Gama-raspad predstavlja emisiju gama-kvanta (visokoenergijskog fotona) iz jezgra koje prelazi iz pobuđenog u osnovno stanje.

Pri gama-raspadu se ne menja ni maseni broj ni atomski broj - menja se samo energija jezgra.



(zvezdica označava pobuđeno stanje jezgra)

Gama-zraci prate gotovo sve α - i β -raspade u prirodnim nizovima i koriste se za identifikaciju radionuklida.

2.2 Aktivnost radioaktivnog izvora

Aktivnost uzorka (A) definiše se kao broj atomskih jezgara koja se raspadnu u jedinici vremena (Krmar, 2013). Na osnovu osnovne jednačine radioaktivnog raspada, aktivnost se može izraziti relacijom:

$$A = -\frac{dN}{dt} = \lambda \cdot N \quad (2.12)$$

Množenjem obe strane prethodne relacije (2.12) konstantom raspada λ , dobija se vremenska zavisnost aktivnosti. Iz ove relacije sledi da je aktivnost, poput broja neraspadnutih jezgara, eksponencijalna funkcija vremena:

$$A = A_0 e^{-\lambda t} \quad (2.13)$$

Jedinica aktivnosti radioaktivnog izvora u Internacionalnom sistemu jedinica (SI) je s^{-1} , poznata kao bekerel (Bq). Jedan bekerel odgovara jednom radioaktivnom raspadu u jednoj sekundi. Pored SI jedinice, u upotrebi je i merna jedinica kiri (Ci), čija je vrednost $3,7 \cdot 10^7 Bq$. Ova vrednost odgovara aktivnosti jednog grama izotopa ^{226}Ra .

2.3 Prirodna radioaktivnost

Izloženost stanovništva jonizujućem zračenju najvećim delom potiče od prirodnih izvora radioaktivnosti, među kojima dominiraju radionuklidi iz serija uranijuma, torijuma i aktinijuma, zatim primordijalni ^{40}K , kao i kosmičko zračenje i radon, posebno u zatvorenim prostorima. U manjoj meri ukupnoj izloženosti doprinose veštački izvori, kao što su radionuklidi dospeli u životnu sredinu nakon atmosferskih nuklearnih testova i nuklearnih akcidenata (npr. ^{137}Cs , ^{90}Sr ,...) ali i brojni izvori koji se koriste u medicinskoj dijagnostici i terapiji. Tokom poslednjih decenija u pojedinim zemljama primećen je porast doprinosa veštačkih izvora koji se koriste u medicinskim procedurama (kako za dijagnostičke, tako i za terapijske svrhe) ukupnoj izloženosti jonizujućem zračenju.

Godišnja efektivna doza³ koju pojedinac primi od prirodnih izvora zavisi od više faktora, uključujući geografski položaj, nadmorsku visinu, geološke karakteristike područja, kao i tip konstrukcionih materijala u objektima u kojima boravi većinu vremena. Prema izveštaju UNSCEAR-a (2008), prosečna globalna efektivna doza iz prirodnih izvora iznosi približno 2,4 mSv godišnje, dok je doprinos veštačkih izvora oko 0,6 mSv godišnje (Knežević Radić i sar., 2025).

Prirodno fonsko zračenje je stalni, ali relativno nizak izvor zračenja. Dugoročna izloženost visokim dozama radijacije izaziva kancerogene efekte, dok su efekti niskih doza, karakterističnih za prirodno zračenje, teško kvantifikovani zbog brojnih faktora kao što su stil života, pušenje i geografska lokacija. Rizik od raka postoji, ali je mali; najznačajniji uticaj ima radon, koji doprinosi

³ **Efektivna doza zračenja** je mera ukupnog biološkog efekta jonizujućeg zračenja na organizam, koja uzima u obzir vrstu zračenja i osetljivost različitih tkiva i organa; izražava se u sivertima (Sv).

procenjeno oko 21.000 smrtnih slučajeva od raka pluća godišnje u SAD-u. Za druge bolesti ne postoje dokazi o značajnom povećanom riziku (Wahl, 2010).

2.3.1 Vrste prirodnih radioaktivnih izvora

Fonsko zračenje je stalno prisutno u životnoj sredini i potiče od prirodnih radionuklida i, u manjoj meri, od antropogenih radionuklida. Prirodni radionuklidi dominantno doprinose ukupnoj godišnjoj dozi zračenja koju ljudski organizam prima i nalaze se u zemlji, vodi, vazduhu, hrani i u samom telu čoveka (Wahl, 2010).

Kosmičko zračenje dolazi iz Sunčevog sistema (Sunce i Zemljini radijacioni pojasevi) i iz udaljenih delova galaksije i van nje. Interakcijom kosmičkih čestica sa atmosferom nastaju sekundarne čestice i **kosmogeni radionuklidi**, kao što su:

- ^3H
- ^7Be
- ^{14}C
- ^{22}Na

Ove čestice dopiru do površine Zemlje, pri čemu je doza najveća na visokim nadmorskim visinama i u polarnim regionima, zbog slabijeg zaštitnog efekta Zemljinog magnetnog polja i tanje atmosferske zaštite.

Terestrijalno zračenje potiče od **primordijalnih radionuklida**, prisutnih od formiranja Zemlje (~4,5 milijardi godina). Glavni primordijalni radionuklidi uključuju:

- ^{238}U i produkte njegovog raspada (serija uranijuma)
- ^{232}Th i produkte njegovog raspada (serija torijuma)
- ^{40}K
- ^{87}Rb

Ovi radionuklidi se nalaze u stenama i tlu. Ljudske aktivnosti, poput rudarenja urana, mogu redistribuirati prirodne radionuklide, dok savremena nuklearna testiranja i nesreće (npr. Černobil) ne doprinose značajno fonskom zračenju.

2.3.2 Radioaktivni nizovi

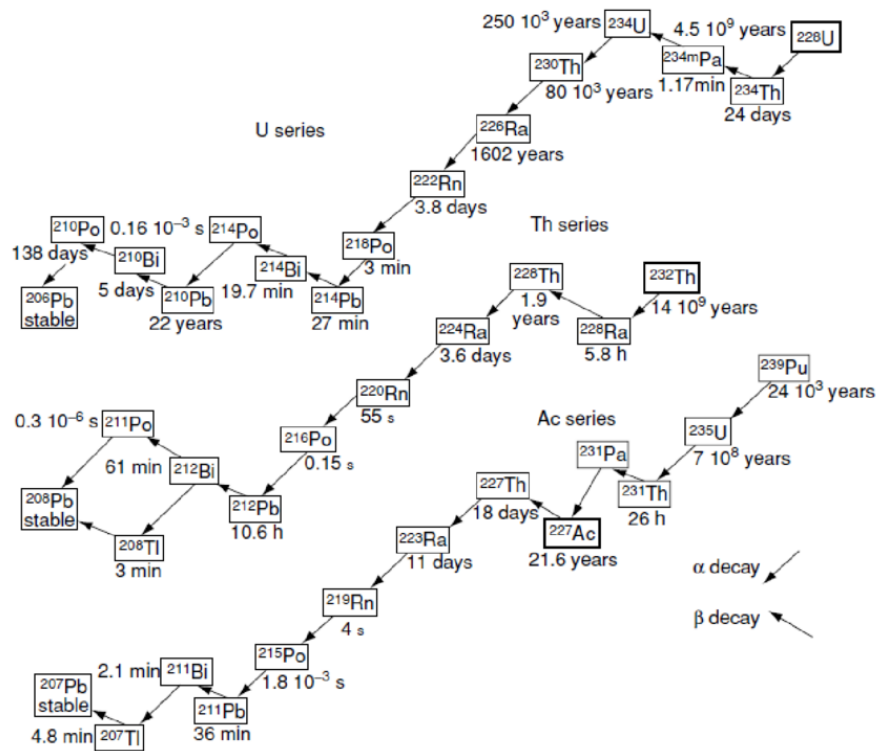
Nakon otkrića radioaktivnosti 1896. godine, utvrđeno je da većina prirodno radioaktivnih nuklida pripada jednom od tri povezana radioaktivna niza (Slika 2.1):

1. **Uranijumov niz** (^{238}U)
2. **Torijumov niz** (^{232}Th)
3. **Aktinijumov niz** (^{235}U)

Svaki niz počinje dugoživećim izvorno prisutnim radionuklidom i završava se **stabilnim izotopom olova (Pb)**.

- Uranijumov niz se završava izotopom ^{206}Pb
- Torijumov niz se završava izotopom ^{208}Pb

- Aktinijumov niz se završava izotopom ^{207}Pb



Slika 2.1 Radioaktivni nizovi: uranijuma, torijuma i aktinijuma.

U radioaktivnim nizovima uspostavlja se **sekularna radioaktivna ravnoteža** ukoliko je vreme poluraspada pretka mnogo veće od vremena poluraspada potomka (Tabela 2.1). Nakon uspostavljanja ravnoteže, aktivnost potomka i pretka bivaju izjednačene, za uzastopne nuklide $A \rightarrow B$ važi:

$$\lambda_A N_A = \lambda_B N_B \quad (2.14)$$

Ovaj odnos omogućava određivanje aktivnosti kratkoživećih radionuklida na osnovu dugoživećih predaka, što je od velikog značaja u analizi prirodne radioaktivnosti u biološkim matricama. Neki primeri sekularnih radioaktivnih ravnoteža i vremena koja su potrebna za njihovo uspostavljanje su dati u Tabeli 2.1.

Tabela 2.1 Neki primeri sekularnih ravnoteža.

Predak ($T_{1/2}$)	Potomak ($T_{1/2}$)	Vreme potrebno za postizanje ravnoteže
^{238}U ($1,3 \cdot 10^9$ godina)	^{234}U ($2,5 \cdot 10^5$ godina)	$1,75 \cdot 10^6$ godina
^{235}U ($7 \cdot 10^8$ godina)	^{231}Pa ($3,3 \cdot 10^4$ godina)	$2,24 \cdot 10^5$ godina
^{232}Th ($1,4 \cdot 10^{10}$ godina)	^{228}Ra (5,7 godina)	39,9 godina
^{226}Ra ($1,6 \cdot 10^3$ godina)	^{222}Rn (4,8 dana)	28 dana

Radionuklidi ulaze u organizam preko:

- hrane (biljna hrana i mleko životinja koje pasu na kontaminiranoj zemlji);
- vode (rastvoreni radionuklidi iz tla);
- vazduha (pre svega radon i njegovi produkti raspada).

Najznačajniji izvor unutrašnjeg zračenja je radon (^{222}Rn), gas nastao raspadom urana i torijuma u zemljištu. Radon se nakuplja u zatvorenim prostorima i prosečna doza zavisi od geoloških karakteristika tla i konstrukcije objekata. Ostali važni radionuklidi u telu uključuju ^{40}K , ^{238}U , ^{232}Th i njihove produkte raspada.

2.3.3 Prirodni radionuklidi u zemljištu i njihov značaj

Značajan deo ukupne doze zračenja u životnoj sredini potiče od prirodnih radionuklida prisutnih u zemljištu, prvenstveno od izotopa ^{40}K , kao i radionuklida uranijumove i torijumove serije. Izotop ^{40}K , sa periodom poluraspada od $1,25 \cdot 10^9$ godina, predstavlja esencijalni element neophodan za normalno funkcionisanje ćelijskog metabolizma (Strumińska-Parulska i Falandysz, 2020).

Prirodni uranijum čini mešavina radioizotopa ^{238}U (99%), ^{235}U (0,71%) i ^{234}U (0,006%), od kojih ^{238}U ima posebno značajnu ulogu zbog svojih produkata raspada. Njegov potomak, ^{226}Ra , ima period poluraspada od 1602 godine i dalje se raspada do radona, važnog radioaktivnog gasa u životnoj sredini. ^{232}Th , sa veoma dugim periodom poluraspada, manje je radioaktivan od uranijuma, ali je široko rasprostranjen u Zemljinoj kori i ekosistemima (Rakić, 2019).

2.4 Veštačka radioaktivnost

Veštačka radioaktivnost predstavlja proces transformacije stabilnih jezgara u nestabilna, prilikom interakcije određenih čestica (poput neutrona, protona, α -čestica...) sa jezgrima atoma, pri čemu nastaju nova jezgra, koja ne postoje u prirodi. Veštački proizvedeni radionuklidi (često nazivani antropogeni radionuklidi) imaju široku primenu u raznim sferama ljudskog društva – u medicini, industriji, zaštiti životne sredine, itd. Međutim, veštački radionuklidi (dominantno ^{137}Cs , ^{134}Cs i ^{90}Sr) su u najvećoj meri dospeli u životnu sredinu kao posledica testiranja nuklearnog oružja i nuklearnih akcidenata. Ovi radionuklidi transportuju se na velike udaljenosti različitim mehanizmima i, slično prirodnim radionuklidima, dospevaju u lanac ishrane.

Pečurke imaju izraženu sposobnost akumulacije pojedinih radionuklida iz životne sredine, uključujući i **antropogene radionuklide** koji potiču uglavnom od nuklearnih testova i nuklearnih akcidenata, među kojima je najznačajniji Černobiljska nesreća. Među veštačkim radionuklidima koji se najčešće nalaze u pečurkama navode se ^{137}Cs , ^{134}Cs i ^{90}Sr .

Dosadašnja istraživanja ukazuju da je ^{137}Cs najznačajniji antropogeni radionuklid u pečurkama, kako zbog svog relativno dugog vremena poluraspada (~30 godina), tako i zbog hemijske sličnosti sa kalijumom, što omogućava njegovo efikasno usvajanje iz zemljišta. Sposobnost akumulacije radiocezijuma u pečurkama prvi put je opisana početkom sedamdesetih godina, a kasnija istraživanja su pokazala da je ona izraženo zavisna od vrste pečurke.

Raspodela ^{137}Cs unutar plodnog tela pečurke nije homogena. Kod pojedinih vrsta, kao što je *Xerocomus badius*, primećena je visoka akumulacija ^{137}Cs u kožici kape, koja se dovodi u vezu sa prisustvom specifičnih pigmenata, poput norbadiona A⁴ (Ronda i sar., 2022).

Za razliku od radiocezijuma, većina studija pokazuje da pečurke ne akumuliraju ^{90}Sr u značajnim količinama, niti radioizotope plutonijuma. Koncentracije ^{90}Sr u pečurkama su uglavnom znatno niže u poređenju sa ^{137}Cs , što se objašnjava različitim mehanizmima usvajanja i biohemijskim ponašanjem stroncijuma u pečurkama.

Aktivnost antropogenih radionuklida u pečurkama zavisi od više faktora, uključujući:

- vrstu pečurke,
- stepen kontaminacije zemljišta,
- vreme proteklo od nuklearnog akcidenta,
- sloj zemljišta iz kojeg pečurka usvaja hranljive materije i vodu.

S obzirom na relativno visoku upotrebu šumskih pečuraka u pojedinim regionima Evrope, prisustvo antropogenih radionuklida, naročito ^{137}Cs , predstavlja značajan faktor pri proceni radiološke izloženosti stanovništva putem ishrane.

Pečurke, zahvaljujući dugotrajnom opstanku micelijuma i efikasnim mehanizmima usvajanja, imaju sposobnost selektivne akumulacije ovih radionuklida. Time učestvuju u njihovoj

⁴ **Norbadion A** je prirodno organsko jedinjenje izolovano iz pečurke *Suillus bovinus*. Poznat je po sposobnosti vezivanja teških metala, naročito radioaktivnog cezijuma, zbog čega se proučava njegova moguća primena u dekontaminaciji i zaštiti od radioaktivnog zračenja.

redistribuciji u ekosistemu i mogu predstavljati potencijalni izvor izloženosti za druge organizme, uključujući čoveka, putem ishrane.

2.5 Transfer faktor (TF)

Sadržaj radionuklida u pečurkama izražava se kao koncentracija aktivnosti ($Bq \cdot kg^{-1}$) suve ili sveže mase). Za procenu stepena akumulacije koristi se transfer faktor (TF), koji se definiše kao odnos koncentracije radionuklida u plodnim telima i supstratu:

$$TF = \frac{C_{\text{pečurka}}}{C_{\text{supstrat}}} \quad (2.15)$$

gde C predstavlja koncentraciju radionuklida.

2.6 Procena ingestionog rizika

2.6.1 Efektivna doza zračenja

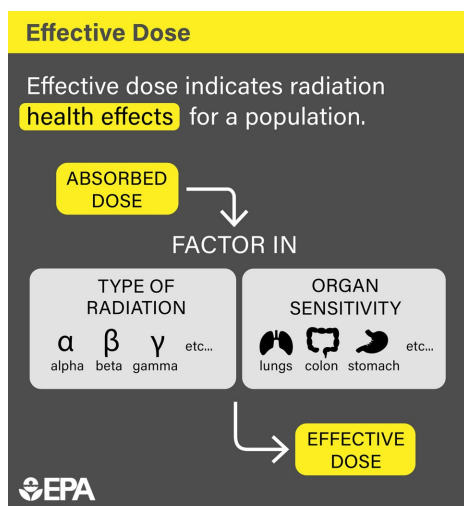
Efektivna doza (Slika 2.2) uzima u obzir apsorbovanu dozu, kao i vrstu zračenja i osjetljivost pojedinih tkiva i organa. Efektivna doza, izražena u sivertima (Sv , mSv , μSv), predstavlja apsorbovanu energiju zračenja u telu, uzimajući u obzir biološki efekat različitih tipova zračenja. Dobijeni rezultat predstavlja pokazatelj potencijalnog rizika za dugoročne zdravstvene posledice izlaganja, kao što je karcinom.

Efektivna doza se koristi za postavljanje regulatornih granica (Slika 2.3) koje služe zaštiti populacije od dugoročnih zdravstvenih efekata. Takođe omogućava stručnjacima da upoređuju očekivane zdravstvene posledice različitih situacija izlaganja zračenju.

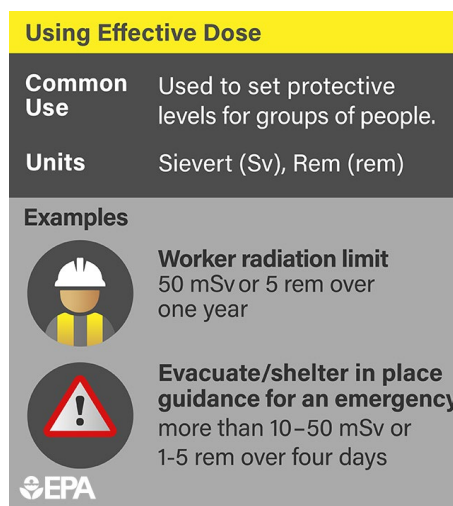
Pošto je ova vrednost izračunata aproksimacija, a ne fizička veličina, ne može se koristiti za predviđanje zdravstvenih efekata kod pojedinaca.

Prosečna godišnja doza od prirodnog fonskog zračenja u SAD-u iznosi oko $3,1 mSv$, pri čemu je pojedinačan doprinos (Wahl, 2010):

- Kosmičko zračenje: $0,3 mSv$ (~11%)
- Terestrijalno zračenje: $0,2 mSv$ (~7%)
- Radionuklidi u organizmu: $2,6 mSv$ (~82%), od čega radon i produkti raspada daju $2,3 mSv$

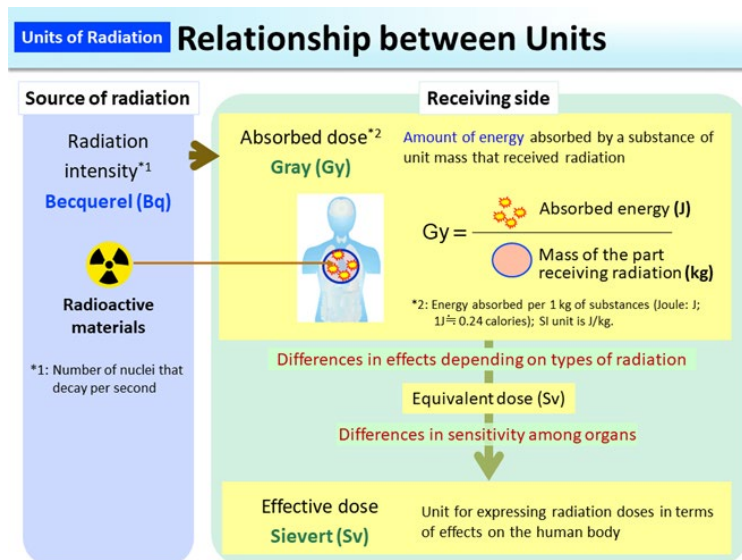


Slika 2.2 Efektivna doza zračenja (slika preuzeta sa sajta: <https://www.epa.gov/radiation/radiation-terms-and-units>).



Slika 2.3 Dozvoljene efektivne doze zračenja (slika preuzeta sa sajta: <https://www.epa.gov/radiation/radiation-terms-and-units>).

Dakle, apsorbirana doza daje osnovnu informaciju o količini energije zračenja u tkivu, dok efektivna doza omogućava realniju procenu mogućih dugoročnih zdravstvenih efekata izlaganja zračenju (Slika 2.4).



Slika 2.4 Apsorbirana i ekvivalentna doza zračenja
(<https://www.env.go.jp/en/chemi/rhm/basic-info/2018/02-03-03.html>).

2.6.2 Efektivna ingestiona doza

Efektivna ingestiona doza predstavlja doprinos ukupnoj efektivnoj dozi koji nastaje usled unosa radionuklida u organizam putem hrane i vode. Nakon ingestije, radionuklidi se apsorbiraju u gastrointestinalnom traktu, a zatim se distribuiraju po različitim organima i tkivima u zavisnosti od njihovih fizičko-hemijskih osobina. Zračenje koje emituju uneti radionuklidi dovodi do ozračivanja unutrašnjih organa tokom određenog vremenskog perioda, čime se ostvaruje tzv. ukupna (eng. *committed*) doza. Efektivna ingestiona doza obuhvata zbir ekvivalentnih doza u pojedinim organima, pri čemu se kao težinski faktori⁵ koriste faktori tkiva definisani od strane **Međunarodne komisije za radiološku zaštitu (ICRP)**. Na taj način, ova veličina omogućava procenu ukupnog radiološkog rizika po ljudsko zdravlje i izražava se u jedinicama milisivert po godini ($mSv \cdot y^{-1}$). Efektivna ingestiona doza može se izraziti formulom:

$$E_{ing} = A \cdot C \cdot u \quad (2.16)$$

⁵ **Težinski faktori** su faktori koji odražavaju osetljivost organa na zračenje.

gde je A koncentracija aktivnosti radionuklida u hrani ($Bq \cdot kg^{-1}$), C koeficijent efektivne doze⁶ ($\mu Sv \cdot Bq^{-1}$), a u godišnji unos hrane ($kg \cdot y^{-1}$).

Efektivna ingestiona doza ima značajnu ulogu u proceni izloženosti stanovništva prirodnim i veštačkim izvorima jonizujućeg zračenja. Posebno je važna u analizi radiološke bezbednosti hrane i vode, proceni posledica nuklearnih i radioloških akcidenata, kao i u planiranju i sprovođenju mera zaštite stanovništva. Na osnovu procenjenih ingestionih doza moguće je upoređivanje sa propisanim dozvoljenim granicama i donošenje odluka o ograničenju ili zabrani upotrebe kontaminiranih namirnica.

UNSCEAR (*United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation*) je Naučni komitet UN-a koji proučava izvore jonizujućeg zračenja i njihove efekte na ljude i životnu sredinu. Njegovi izveštaji sadrže naučno utemeljene podatke o izloženosti stanovništva i metodama procene doza, uključujući efektivnu dozu od ingestije radionuklida. U sledećoj tabeli (Tabela 2.2) su prikazani podaci sa koeficijentima efektivne ingestione doze dobijene iz UNSCEAR (2000) izveštaja, koji se koriste za proračun godišnje efektivne doze.

Tabela 2.2 Godišnji unos i efektivna ingestiona doza radionuklida iz uranijumovih i torijumovih serija (1 – odojčad, 2 – deca, 3 – odrasli).

Radionuklid	Unos aktivnosti (Bq)			Koeficijenti efektivne ingestione doze ($\mu Sv \cdot Bq^{-1}$)			Efektivna doza (μSv)			
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	Usrednjeno
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
Ukupno							260	200	110	140

⁶ **Koeficijent efektivne doze** (izražen u $Sv \cdot Bq^{-1}$) predstavlja količinu doze zračenja koju organizam prima po jedinici aktivnosti radioaktivnog materijala (koji može biti unesen, udisan ili prisutan u okolini).

U Republici Srbiji postoji **“Pravilnik o granicama sadržaja radionuklida u vodi za piće, životnim namirnicama, stočnoj hrani, lekovima, predmetima opšte upotrebe, građevinskom materijalu i drugoj robi koja se stavlja u promet”** (Službeni glasnik RS, br. 36/18), u kojem su utvrđene maksimalne dozvoljene vrednosti ^{137}Cs u različitim vrstama hrane i pića radi zaštite stanovništva od jonizujućeg zračenja. Član 12, koji nam je značajan za ovaj rad, glasi:

Granica sadržaja ^{137}Cs u mleku i mlečnim proizvodima, hrani za odojčad, povrću, voću, žitaricama, mesu i proizvodima od mesa, jajima, ostalim namirnicama kao što su svinjska mast, ulje, šećer, slatkiši, alkoholnim i bezalkoholnim pićima je $15 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$, odnosno $15 \text{ Bq} \cdot \text{l}^{-1}$.

Granica sadržaja ^{137}Cs u mleku u prahu, bobičastom divljem voću (borovnica, brusnica, kupine, jagode, maline, ribizle, ogrozd), divljači, ribi, morskim plodovima, pečurkama (svežim i proizvodima od pečuraka), lekovitom bilju, čajevima i kafi je $150 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$, odnosno $150 \text{ Bq} \cdot \text{l}^{-1}$.

Granica sadržaja ^{137}Cs u suvim pečurkama, aromama, začinima i ostalim namirnicama koje se koriste manje od 2 kg godišnje po glavi stanovnika je $600 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$, odnosno $600 \text{ Bq} \cdot \text{l}^{-1}$.

3. MAKROGLJIVE I NJIHOVA ULOGA BIOINDIKATORA STANJA ŽIVOTNE SREDINE

Gljive, koje su kroz istoriju imale značajnu ulogu za čoveka, danas čine važan deo prirodnih ekosistema. Iako se procenjuje da na Zemlji postoji oko 1,5 miliona vrsta gljiva, do sada je identifikovano oko 69 000 vrsta, a mnoge zemlje imaju bogatu raznolikost jestivih vrsta koje spontano rastu usled povoljnih florističkih i klimatskih uslova. Gljive se uglavnom konzumiraju u regionima gde su prirodno rasprostranjene. Imaju sposobnost akumulacije teških metala (kadmijum, bakar, arsen) i radionuklida, što ih čini značajnim bioindikatorima stanja životne sredine (Korkmaz i sar., 2016).

Pojam "makrogljive" odnosi se na gljive koje formiraju makroskopska plodna tela vidljiva golim okom i obuhvata pripadnike carstva *Ascomycota* i *Basidiomycota*. Plodna tela se razlikuju morfološki i poznata su pod nazivima: pečurke (agarikoidne), puhare (gasteroidne), smrčci (morheloidne), zvezdače (asteroidne), tartufi (hipogeična), koralne gljive (koraloidne), koraste (kortikoidne), zdelaste/tanjiraste (pezizoidne), batinaste (klavaroidne) itd. (Slika 3.1) (Rakić, 2019). U ovom radu su ispitivani uzorci makrogljiva vidljivih golim okom i strukture koja se sastoji od drške i šešira, te će se u eksperimentalnom delu koristiti termin „pečurka“.

Gljive, zahvaljujući velikoj površini micelijuma i specifičnoj strukturi ćelijskog zida, efikasno apsorbuju radionuklide iz zemljišta, uključujući ^{137}Cs , ^{40}K , ^{226}Ra i ^{228}Ra . Akumulacija radionuklida u gljivama zavisi od osobina zemljišta, pH vrednosti, vrste gljiva i drugih ekoloških faktora. Od navedenih radionuklida koji dospevaju u zemljište putem atmosferske depozicije, najznačajniji su ^{137}Cs i ^{90}Sr , zbog dugog vremena poluraspada, velike bioraspodivnosti i sposobnosti migracije kroz trofičke lance. Zbog navedenih osobina, gljive predstavljaju dobar bioindikator za praćenje akumulacije radionuklida i procenu potencijalnog rizika po ljudsko zdravlje (Korkmaz i sar., 2016; Rakić i sar., 2014; Sarap, 2017).

Takođe, brojna istraživanja su potvrdila da pečurke mogu akumulirati visoke koncentracije metala različitim fizičko-hemijskim i biološkim mehanizmima. Studije sprovedene u blizini industrijskih postrojenja pokazale su dobru korelaciju između koncentracija metala u pečurkama, emisija zagađujućih materija i sadržaja metala u zemljištu, što potvrđuje njihov značaj u biomonitoringu životne sredine (Rakić, 2019).

Makrogljive imaju ključnu ulogu u ekosistemu: mikorizne vrste su neophodne za rast biljaka, posebno šumskih drvenastih vrsta, dok saprotrofne razgrađuju organski materijal i vraćaju hranljive materije zemljištu. Jestive makrogljive koriste se u ishrani ljudi i životinja, a mnoge imaju lekovita svojstva.

Za monitoring prirodnih staništa, makrogljive su značajne jer se zbog makroskopskih plodnih tela lako evidentiraju i uzorkuju za kasniju identifikaciju vrsta.

3.1 Akumulacija radionuklida u pečurkama

Faktori koji utiču na akumulaciju radionuklida u pečurkama uključuju ekološke i geološke karakteristike staništa, kao što su klima, padavine, tip tla i humusa, pH i tekstura tla, tip šumskog pokriva, koncentracije stabilnog cezijuma i kalijuma, biološke karakteristike pečuraka, uključujući dubinu i trajanje micelijuma, vrstu pečurke, funkcionalnu grupu u ishrani i tip plodnog tela. Na osnovu ovih karakteristika, pečurke se mogu koristiti kao bioindikatori radioaktivne kontaminacije i promena u biološkoj dostupnosti radionuklida (Kioupi i sar., 2015).

Plodna tela makrogljiva sadrže stabilni izotop cezijuma (^{133}Cs), čije koncentracije mogu značajno varirati između vrsta čak i unutar istog staništa. Sličan obrazac uočen je i za veštačke radionuklide antropogenog porekla, kao što su ^{134}Cs , ^{137}Cs i ^{90}Sr , koji do pečuraka dospevaju pretežno putem atmosferskog taloženja (Rakić, 2019).

Prema pojedinim autorima, dostupnost i akumulacija radionuklida u gljivama u najvećoj meri zavise od uslova životne sredine. Naime, koncentracije radionuklida mogu značajno varirati ne samo između različitih rodova, već i unutar iste vrste, između populacija ili sojeva, zbog čega se lokacija i vreme uzorkovanja često navode kao ključni faktori (Elstner i sar., 1989).

Najveća biološka raspoloživost radiocezijuma u pozitivnoj je korelaciji sa njegovim visokim sadržajem u zemljištu, velikim udelom humusa, niskim pH vrednostima i malim sadržajem esencijalnih elemenata, naročito kalijuma. Suprotno tome, viši sadržaj gline i niži udeo peska mogu smanjiti kontaminaciju pečuraka, jer se cezijum snažno vezuje za minerale gline i time postaje manje dostupan biljkama. Međutim, pojedine pečurke imaju sposobnost da usvajaju elemente iz oblika koji su biljci nedostupni, zahvaljujući specifičnim enzimskim i fiziološkim mehanizmima (Rakić, 2019).

Za razliku od navedenog, drugi autori ističu da je akumulacija radionuklida u većoj meri determinisana taksonomskim i nutritivnim karakteristikama samih vrsta makrogljiva (Elstner i sar., 1989). Tako su pojedine familije prepoznate kao izraziti akumulatori cezijuma (*Cortinariaceae*, *Clavariaceae*, *Entolomataceae*, *Strophariaceae*), dok druge pokazuju tendenciju diskriminacije i slabijeg usvajanja cezijuma (*Amanitaceae*, *Boletaceae*, *Russulaceae*) (Rakić, 2019).

Razlike u koncentracijama radiocezijuma uočene su i između različitih funkcionalnih grupa gljiva. Uopšteno, sadržaj radionuklida opada u sledećem nizu: saprotrofne terikolne gljive⁷ sa micelijom u površinskim slojevima zemljišta ili na uginulom biljnom materijalu najbrže bivaju kontaminirane neposredno nakon radioaktivnog taloženja, dok mikorizne gljive⁸, povezane sa drvećem i micelijom u dubljim slojevima zemljišta, često postižu visoke koncentracije radionuklida sa vremenskim zakašnjenjem. Kontaminacija lignikolnih gljiva⁹ zavisi pre svega od stepena zagađenosti stabla domaćina, ali i od direktne depozicije radionuklida iz atmosfere (Rakić, 2019).

⁷ **Saprotrofne terikolne gljive** su gljive koje se hrane razlaganjem mrtve organske materije (saprotrofi) i žive u zemljištu (terikolne). Imaju važnu ulogu u kruženju materije u ekosistemima jer razgrađuju biljne i životinjske ostatke i obogaćuju zemljište hranljivim materijama.

⁸ **Mikorizne gljive** su gljive koje žive u simbiozi sa korenjem biljaka, pri čemu formiraju mikorizu – zajednicu u kojoj gljiva biljci pomaže u usvajanju vode i mineralnih materija iz zemljišta, a zauzvrat dobija organske supstance (šećere) nastale fotosintezom. Ova simbioza je veoma važna za rast i razvoj mnogih biljnih vrsta.

⁹ **Lignikolne gljive** su gljive koje razlažu lignin, složeni organski polimer u drvetu, i rastu na mrtvom drveću ili drvenastim biljkama. One igraju ključnu ulogu u razgradnji drvenaste materije i reciklaži ugljenika u ekosistemima.

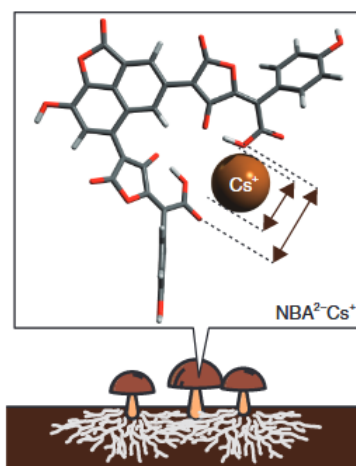
3.1.1 Biomolekulski osnovi akumulacije cezijuma u pečurkama

Radiocezijum oslobođen tokom havarije u nuklearnoj elektrani Fukušima (2011. godina) zadržan je delimično u šumskim ekosistemima, posebno u gljivama, lišajevima i drveću, pri čemu su najviše koncentracije zabeležene u pečurkama. Sličan fenomen primećen je i nakon nesreće u Černobilju (1986. godina), gde su visoke koncentracije cezijuma uočene u pigmentima lociranim u plodnim telima gljiva.

Jedan od reprezentativnih pigmenata je norbadion A (NBA; $C_{35}H_{18}O_{15}$) (Slika 3.1), dominantni pigment pečuraka (*Bay Boletus*) u Evropi i vrste *Pisolithus arrhizus* u borovim šumama Japana. Poznato je da norbadion A ima sposobnost selektivnog vezivanja jona cezijuma. Ovaj mehanizam vezivanja ispitivan je eksperimentalno i pomoću simulacija molekulske dinamike, pri čemu je utvrđeno da je selektivnost posledica specifične „makazaste“ molekulske strukture norbadiona A (Suno i sar., 2019). U navedenom istraživanju korišćene su savremene kvantno-hemijske metode za izračunavanje strukture norbadiona A, slobodne energije formiranja kompleksa sa cezijum jonima, kao i energije vezivanja u vodenom okruženju, koje odgovara uslovima u živim organizmima. S obzirom na to da je kalijum biološki rasprostranjen element i da se takođe vezuje za norbadion A, mogućnost akumulacije cezijuma procenjena je analizom energije zamene K^+ jona Cs^+ jonima.

Rezultati su pokazali da oblik norbadiona A sa dva disocirana protona (NBA^{2-}) formira stabilniji kompleks sa cezijum jonima nego sa kalijumom ili natrijumom, što ukazuje na izraženu selektivnost prema cezijumu. Za razliku od većine biomolekula, kod kojih je vezivanje kalijuma stabilnije od vezivanja cezijuma, norbadion A pokazuje suprotnu tendenciju. Ova pojava se objašnjava dimenzijama „makazastog“ molekuskog razmaka, koji odgovara prečniku cezijum jona.

S obzirom na to da je više gljivičnih pigmenata (poput norbadiona A i badiona A) karakterisano sličnom makazastom strukturom, pretpostavlja se da upravo ovakva molekulska organizacija predstavlja jedan od glavnih razloga izražene akumulacije radiocezijuma u gljivama.



Slika 3.1 Mehanizam koncentracije radioaktivnog cezijuma u pečurkama (Suno i sar., 2019).

4. OSNOVE GAMA-SPEKTROMETRIJE KORIŠĆENJEM HPGe DETEKTORA

4.1 Gama-zračenje

Detektori od germanijuma visoke čistoće (*HPGe – High Purity Germanium*) projektovani su za merenje gama-zračenja. Kada se jezgro atoma nalazi u pobuđenom stanju, ono može emitovati energiju u obliku fotona kako bi prešlo u stabilnije stanje niže energije. Ovi fotoni se nazivaju gama-zračenje. Gama-zračenje ima karakteristične energije koje zavise od izotopa iz kog je emitovano, što omogućava jednostavnu identifikaciju radionuklidnog sastava uzorka na osnovu merenja energije gama-zračenja (Lindberg, 2018).

4.1.1 Interakcija fotona sa materijom

Postoji više različitih načina na koje gama-zračenje može stupiti u interakciju sa materijom. Foton može biti apsorbovan od strane atoma u procesu koji se naziva **fotolektrični efekat** (*photoelectric effect*). Tokom ove interakcije, celokupna energija fotona prenosi se na elektron iz unutrašnje elektronske ljuske atoma, koji potom biva izbačen iz te ljuske (Krmr, 2013).

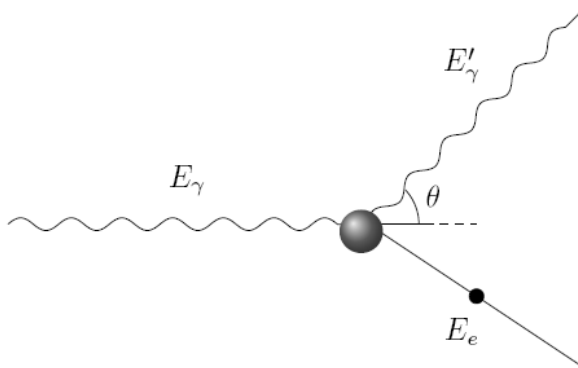
Ukoliko foton nije u potpunosti apsorbovan, može doći do njegovog skretanja, pri čemu se deo energije prenosi na elektron koji se odbija. Ova vrsta interakcije naziva se **Komptonovo rasejanje** (*Compton scattering*) (Slika 4.1).

Energija prenetna elektronu, E_e , zavisi od ugla rasejanja, θ , i može se izračunati pomoću izraza:

$$E_e = E_\gamma \left(1 - \frac{1}{1 + \left(\frac{E_\gamma}{m_e c^2}\right)(1 - \cos\theta)} \right) \quad (4.1)$$

gde je E_γ energija početnog fotona, m_e masa elektrona, a c brzina svetlosti (Krmr, 2013).

Foton koji ima dovoljno veliku energiju, $E_\gamma \geq 2m_e$, može dovesti do stvaranja para elektron–pozitron u procesu koji se naziva **proizvodnja para**. Nastali elektron i pozitron potom mogu nezavisno međusobno stupiti u interakciju sa materijom i predavati svoju energiju različitim atomima.



Slika 4.1 Prikaz rasejanja fotona na elektronu.

4.1.2 Atenuacija fotona

Verovatnoća interakcije gama-zračenja sa materijom zavisi od vrste materijala. Uopšteno, fotoni češće stupaju u interakciju sa materijalima većeg atomskog broja, jer veći atomski broj znači i veći broj elektrona sa kojima foton može ostvariti interakciju prilikom prolaska kroz atom.

Intenzitet zračenja I , meren u jednostavnom sistemu koji se sastoji od detektora i radioaktivnog izvora razdvojenih slojem materijala, opisan je izrazom:

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (4.2)$$

gde je μ koeficijent slabljenja specifičan za materijal, x debljina materijala, a I_0 intenzitet zračenja bez prisustva materijala ($x = 0$).

4.1.3 Aktivnost uzorka

Broj fotona koji tokom merenja prolaze kroz detektor može se izračunati na osnovu aktivnosti izvora i njegove pozicije. Aktivnost većine izvora korišćenih za karakterizaciju bila je poznata u trenutku njihove proizvodnje, A_0 , a aktivnost u trenutku merenja, A , dobija se izrazom:

$$A = A_0 e^{-t/\tau} \quad (4.3)$$

gde je t vreme proteklo od proizvodnje izvora do merenja, a $\tau = \frac{1}{\lambda}$ je srednje vreme života izvora, a dobija se usrednjavanjem vremena života po celom skupu radioaktivnih jezgara jedne vrste.

Verovatnoća da radioaktivni raspad rezultuje emisijom fotona zavisi od radionuklida, pa se u račun uključuje i faktor verovatnoće emisije P .

Prostorni ugao Ω između tačkastog izvora postavljenog duž ose simetrije detektora i kristala može se izraziti kao:

$$\Omega = 2\pi(1 - \cos(\theta)) \quad (4.4)$$

gde je θ ugao između ose simetrije i prave koja spaja izvor sa ivicom kristala. Pošto se fotoni emituju izotropno, deljenjem ovog prostornog ugla sa prostornim uglom sfere i množenjem sa prethodnim izrazima dobija se konačan izraz za broj fotona koji prolaze kroz detektor u jednoj sekundi:

$$N = A_0 e^{-t/\tau} \cdot P \cdot \frac{2\pi(1 - \cos(\theta))}{4\pi} \quad (4.5)$$

gde je N broj fotona u sekundi koji prolaze kroz detektor.

4.2 HPGe detektor

Detektori od germanijuma visoke čistoće imaju najveću energetska rezoluciju i zato predstavljaju najbolji izbor za gama-spektroskopiju. Germanijum se koristi umesto silicijuma zbog većeg atomskog broja i gustine, što povećava verovatnoću fotoefekta i smanjuje srednji slobodan put fotona u detektoru.

Zbog male energije potrebne za stvaranje para elektron–šupljina (2,9 eV), HPGe detektori moraju raditi na veoma niskoj temperaturi ($-196\text{ }^{\circ}\text{C}$), koja se postiže hlađenjem tečnim azotom, kako bi se smanjili termalni šumovi. Interakcija gama-zračenja sa aktivnom zapreminom dovodi do stvaranja parova elektron–šupljina, pri čemu je broj parova proporcionalan energiji upadnog fotona, a prikupljeno naelektrisanje daje informaciju o energiji i intenzitetu zračenja (Tanović, 2024).

HPGe detektor je u osnovi inverzno polarizovana poluprovodnička dioda, koja može biti p-tipa ili n-tipa u zavisnosti od primesa. Elektrode se postavljaju na kristal kako bi se omogućilo sakupljanje naboja, ali one predstavljaju „mrtav sloj“ jer ne doprinose detekcionom signalu.

Prema geometriji, HPGe detektori se dele na planarne i koaksijalne. Planarni detektori se koriste za niskoenergetsku gama i X-spektroskopiju i imaju dobru rezoluciju ispod 100 keV. Koaksijalni detektori, koji su najčešće u upotrebi, imaju veću aktivnu zapreminu i veću efikasnost detekcije, naročito u varijanti sa zatvorenim i zaobljenim krajem. N-tip koaksijalnih detektora su pogodniji za detekciju niskoenergetskih fotona zbog tanjeg mrtvog sloja u odnosu na p-tip.

4.2.1 Efikasnost detektora

Svako merenje apsolutne aktivnosti emisije gama-zračenja zahteva poznavanje efikasnosti detektora. Brzina emitovanja za tačkasti izvor može se izračunati merenjem površine ispod fotopika za fiksni vremenski interval.

Kalibracija efikasnosti se uglavnom vrši koristeći izvore poznatih aktivnosti i relativnih intenziteta gama-linija, ukoliko izvor emituje više od jedne gama-linije. Za svaku energiju gama-zračenja iz tabele efikasnost se može izračunati po formuli:

$$\varepsilon = \frac{R}{A \cdot p_{\gamma}} \quad (4.6)$$

gde je R (s^{-1}) brzina brojanja pod vrhom ukupne energije, A (Bq) aktivnost izvora, a p_{γ} kvantni prinos, tj. verovatnoća emisije fotona date energije. Aktivnost kalibracionog izvora mora biti korigovana na raspad, uzimajući u obzir vreme proteklo od dana izdavanja sertifikata kalibracionog izvora do dana korišćenja izvora za potrebe kalibracije.

4.2.2 Aktivnosti radioizotopa

Aktivnost radioizotopa može se izračunati pomoću intenziteta odabrane gama-linije u spektru:

$$A = \frac{I(E)}{\varepsilon(E) \cdot p_{\gamma}(E) \cdot m} \quad (4.7)$$

gde je $\varepsilon(E)$ efikasnost detektora na datoj energiji, $p_{\gamma}(E)$ kvantni prinos ili broj gama prelaza date energije po jednom raspadu, a $I(E)$ spektralni intenzitet gama-linije od kojeg je oduzet fon, a m je masa uzorka (Jovančević, Knežević i Nikolov, 2022).

5. EKSPERIMENTALNI DEO

Ispitivanje radioaktivnosti u životnoj sredini neophodno je sprovoditi radi procene izloženosti stanovništva jonizujućem zračenju. Sadržaj radionuklida u uzorcima životne sredine određuje se primenom metoda kao što su: **određivanje ukupne alfa i ukupne beta aktivnosti, gama-spektrometrija, radiohemijsko-analiitičke metode, kao i druge tehnike** (Sarap i sar., 2023).

5.1 Određivanje koncentracije aktivnosti radionuklida merenjem na HPGe detektoru

5.1.1 Uzorkovanje i priprema uzoraka

Uzorkovanje pečuraka vršeno je prilikom uvoza u Republiku Srbiju na graničnim prelazima, u prisustvu graničnog fitosanitarnog inspektora u skladu sa standardnom metodom uzorkovanja (IAEA, 1989). Ovakvo uzorkovanje se obavlja radi gama-spektrometrijske analize uzoraka, kojom se određuju koncentracije aktivnosti radionuklida u uzorcima, a zatim usklađivanja sa zakonskom regulativom (Službeni glasnik RS, 2018).

Plodna tela gljiva, sakupljena za potrebe određivanja sadržaja radionuklida (^{137}Cs , ^{40}K , ^{226}Ra i ^{232}Th), pažljivo se čiste od ostataka supstrata pomoću četkice i seku na manje delove. Vrste sa krupnim plodnim telima analiziraju se kao pojedinačni sporokarpi, dok se kod sitnijih vrsta kombinuje više plodnih tela u jedan uzorak kako bi se obezbedila dovoljna masa za analize (Rakić, 2019).

Uzorci gljiva suše se u sušnici na temperaturi od $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ do postizanja konstantne, apsolutno suve mase. Radi postizanja homogenosti, osušeni uzorci plodnih tela melju se u fini prah.

Uzorci su pakovani u cilindrične posude prečnika 6,7 cm i visine 6,2 cm, a zatim zapečaćeni voskom kako bi se sprečio gubitak radona.

5.1.2 Merenje na HPGe detektoru

Aktivnost prirodnih radionuklida određena je standardnom metodom gama-spektrometrije korišćenjem niskofonskog HPGe detektora (GMX-20190, relativna efikasnost 33,5%, energetska rezolucija 1,92 keV za gama-liniju ^{60}Co na 1332 keV), uz olovnu zaštitu debljine 12 cm (Slika 5.1). Merni sistem je smešten u prizemlju Departmana za fiziku, Prirodno-matematičkog fakulteta Univerziteta u Novom Sadu, gde je koncentracija radona niska (prosečno $(30 \pm 5)\text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$). Niska koncentracija radona i pasivna olovna zaštita omogućili su značajno smanjenje fonskog zračenja (Knežević Radić i sar., 2023).

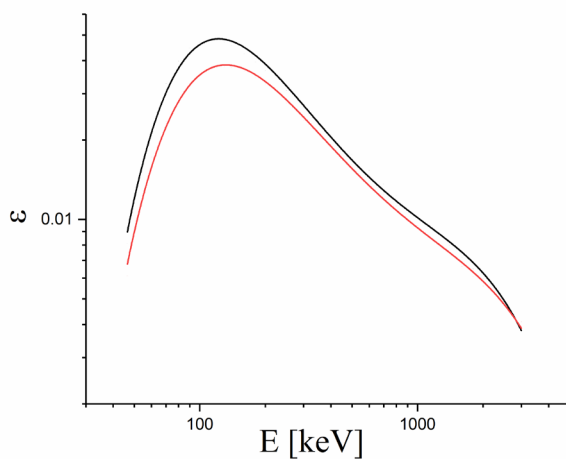
Akvizicija i analiza gama-spektara izvršene su pomoću softvera Canberra Genie 2000, uz tipično vreme merenja od oko 3000 s.

Kalibracija detektora izvedena je korišćenjem standardnog referentnog materijala u silikonskoj smoli, češki standard, zapremine 250 cm^3 , pakovanog u cilindričnu posudu (*Czech Metrological Institute*). Korekcije efekta samoapsorpcije, usled različite gustine matrica pečuraka, primenjene su pomoću softvera ANGLE, dok je korekcija efekta pravog koincidentnog sabiranja urađena korišćenjem softvera EFFTRAN (Knežević Radić i sar., 2023). Kriva efikasnosti korišćena za određivanje koncentracije aktivnosti radionuklida u matrici koja odgovara pečurkama (gustine $0,9\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, sastavljene od celuloze $\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5$ i vode) je data na Slici 5.2.

Aktivnosti radionuklida određene su na osnovu karakterističnih gama-linija, dok je minimalna detektabilna aktivnost (MDA) izračunata prema Kirijevoj relaciji. Detalji niskofonske gama-spektrometrije su dati u reference (Mrđa i sar., 2024).



Slika 5.1 HPGe detektor (GMX-20190).



Slika 5.2 Kriva efikasnosti pika pune energije za standardni referentni materijal (crno) i za analizirane uzorke pečuraka (crveno). Jednačina krive efikasnosti ($\epsilon = \exp(-142,67268372 + 91,69453430 \cdot x - 22,12509537 \cdot x^2 + 2,32968688 \cdot x^3 - 0,09112337 \cdot x^4)$), gde je $x = \ln E$.

5.1.3 Rezultati određivanja koncentracija aktivnosti radionuklida i ingestione doze

U cilju procene prisustva prirodnih i veštačkih gama-emitera u uzorcima pečuraka, izvršena su gama-spektrometrijska merenja pomoću HPGe detektora. Na osnovu dobijenih rezultata određene su koncentracije aktivnosti radionuklida, koje su prikazane u Tabeli 5.1. Merna nesigurnost je data na nivou poverenja od 95% ($k=2$). Napomena: koncentracije radionuklida u tabeli koje su manje od neke vrednosti su uzete da su jednake nuli prilikom određivanja pojedinačne i ukupne godišnje efektivne doze. Na osnovu izmerenih koncentracija aktivnosti radionuklida, procenjena je doza koja potiče od ingestije. Za procenu ove doze, potrebno je izračunati koliku dozu daje svaki radionuklid pojedinačno, uzimajući u obzir ingestione dozne koeficijente. Ovi koeficijenti su uzeti iz publikacije ICRP Publication 72 (1996) i dati su u Tabeli 5.2.

Tabela 5.1 Nazivi analiziranih uzoraka, zemlje porekla i vrednosti koncentracija aktivnosti dobijenih gama-spektrometrijskim merenjima.

Redni broj uzorka	Naziv uzorka	Zemlja porekla	Koncentracija radionuklida [$\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$]			
			^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K	^{137}Cs
1	Lisičarka	Belorusija	16,1±2,0	4,7±1,2	65±22	64±5
2	Lisičarka	Rusija	13,1±1,0	4,5±1,1	150±20	19±3
3	Sušena lisičarka	Rusija	10,1±1,0	3,6±1,1	890±60	1,6±0,7
4	Beli šampinjon	Mađarska	<10	<4	55±16	<5
5	Sitni beli šampinjon	Bosna i Hercegovina	<12	<5	110±30	<5
6	Bukovača	Mađarska	49±11	20±4	100±20	12±6
7	Bukovača	Mađarska	36±10	15±5	53±15	<6
8	Bukovača	Bosna i Hercegovina	<10	<5	<40	<3
9	Smeđi šampinjon	Mađarska	<14	<10	<40	<6
10	Smrčak	Severna Makedonija	89±5	4,2±1,1	47±14	4,7±1,9
11	Suvi smrčak	Crna Gora	85±5	4,7±1,2	40±12	186±13
12	Suvi smrčak	Crna Gora	80±5	3,8±1,0	35±10	161±13
13	Suvi smrčak	Crna Gora	75±3	3,2±0,8	30±8	200±9
14	Suvi smrčak	Crna Gora	78±4	<5	32±6	140±9
15	Zamrznuti vrganj	Rusija	<8	<6	48±15	2,2±0,7
16	Zamrznuti vrganj	Rusija	<7	<5	84±22	5,3±1,2
17	Zamrznuti vrganj	Rusija	<10	<8	50±9	3,4±0,7
18	Sušeni vrganj	Bosna i Hercegovina	<12	<7	368±39	85±7
19	Sušeni vrganj	Italija	<12	<10	382±36	18,1±2,3
20	Sušeni vrganj	Nemačka	<8	<7	660±70	<3
21	Bukovača	Bosna i Hercegovina	<10	<5	<40	<3
22	Bukovača	Mađarska	<8	<6	53±15	<6

Da bi se procenila godišnja efektivna ingestiona doza, potrebno je uzeti u obzir godišnju potrošnju pečuraka u ishrani ljudi. S obzirom da u Srbiji ne postoji zvanični statistički podatak o količini pečuraka koja se konzumira godišnje (*Anketa o potrošnji domaćinstava*) korišćen je podatak dat za prosečnu godišnju potrošnju u Evropi, koja iznosi 1,7 kg po osobi godišnje (*IndexBox tržišni izveštaj (mushroom & truffle)*).

Formula za određivanje godišnje doze koja potiče od svakog pojedinačnog radionuklida od ingestije pečuraka je:

$$E_{ing}[mSv] = C [Bq \cdot kg^{-1}] \cdot m [kg] \cdot e_{ing} [nSv \cdot Bq^{-1}] \cdot 10^{-6} [mSv \cdot nSv^{-1}] \quad (5.1)$$

gde je C koncentracija aktivnosti radionuklida data u Tabeli 5.1, m je prosečna godišnja potrošnja pečuraka po osobi i iznosi 1,7 kg, e_{ing} je ingestioni dozni koeficijent dat u Tabeli 5.2. **Ingestioni dozni koeficijent** je broj koji pokazuje koliku efektivnu dozu zračenja primi čovek kada unese u organizam 1 Bq nekog radionuklida putem hrane ili pića.

Tabela 5.2 Vrednosti ingestionog doznog koeficijenta korišćeni za procenu godišnje ingestione doze.

Radionuklid	Ingestioni dozni koeficijent [nSv·Bq ⁻¹]
²²⁶ Ra	280
²³² Th	230
⁴⁰ K	6,2
¹³⁷ Cs	13

Nakon određivanja pojedinačnih godišnjih efektivnih doza za svaki uzorak gljive, određuje se ukupna godišnja efektivna doza od ingestije kao suma svih pojedinačnih godišnjih efektivnih doza za dati uzorak. Vrednosti su date u Tabeli 5.3.

Primer određivanja pojedinačne godišnje efektivne doze od ingestije i ukupne godišnje efektivne doze za prvi uzorak iz tabele:

Redni broj uzorka	Naziv uzorka	Zemlja porekla	Koncentracija radionuklida [Bq·kg ⁻¹]			
			²²⁶ Ra	²³² Th	⁴⁰ K	¹³⁷ Cs
1	Lisičarka	Belorusija	16,1±2,0	4,7±1,2	65±22	64±5

- **Pojedinačne godišnje efektivne doze od ingestije:**

1) ^{226}Ra

$$m = 1,7 \text{ kg}$$

$$C = 16,1 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$e_{ing} = 230 \text{ nSv} \cdot \text{Bq}^{-1}$$

$$E_{ing}[\text{mSv}] = 16,1 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot 1,7 \text{ kg} \cdot 280 \text{ nSv} \cdot \text{Bq}^{-1} \cdot 10^{-6} \text{ mSv} \cdot \text{nSv}^{-1}$$

$$E_{ing}[^{226}\text{Ra}] = 7,664 \cdot 10^{-3} \text{ mSv}$$

2) ^{232}Th

$$m = 1,7 \text{ kg}$$

$$C = 4,7 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$e_{ing} = 230 \text{ nSv} \cdot \text{Bq}^{-1}$$

$$E_{ing}[\text{mSv}] = 4,7 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot 1,7 \text{ kg} \cdot 230 \text{ nSv} \cdot \text{Bq}^{-1} \cdot 10^{-6} \text{ mSv} \cdot \text{nSv}^{-1}$$

$$E_{ing}[^{232}\text{Th}] = 1,838 \cdot 10^{-3} \text{ mSv}$$

3) ^{40}K

$$m = 1,7 \text{ kg}$$

$$C = 65 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$e_{ing} = 6,2 \text{ nSv} \cdot \text{Bq}^{-1}$$

$$E_{ing}[\text{mSv}] = 65 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot 1,7 \text{ kg} \cdot 6,2 \text{ nSv} \cdot \text{Bq}^{-1} \cdot 10^{-6} \text{ mSv} \cdot \text{nSv}^{-1}$$

$$E_{ing}[^{40}\text{K}] = 6,851 \cdot 10^{-4} \text{ mSv}$$

4) ^{137}Cs

$$m = 1,7 \text{ kg}$$

$$C = 64 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$e_{ing} = 13 \text{ nSv} \cdot \text{Bq}^{-1}$$

$$E_{ing}[\text{mSv}] = 64 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot 1,7 \text{ kg} \cdot 13 \text{ nSv} \cdot \text{Bq}^{-1} \cdot 10^{-6} \text{ mSv} \cdot \text{nSv}^{-1}$$

$$E_{ing}[^{137}\text{Cs}] = 1,414 \cdot 10^{-3} \text{ mSv}$$

- **Ukupna godišnja efektivna doza od ingestije:**

$$E_u = E_{ing}[^{226}\text{Ra}] + E_{ing}[^{232}\text{Th}] + E_{ing}[^{40}\text{K}] + E_{ing}[^{137}\text{Cs}]$$

$$E_u [\text{uzorak 1}] = 7,664 \cdot 10^{-3} \text{ mSv} + 1,838 \cdot 10^{-3} \text{ mSv} + 6,851 \cdot 10^{-4} \text{ mSv} + 1,414 \cdot 10^{-3} \text{ mSv}$$

$$E_u [\text{uzorak1}] = 0,012 \text{ mSv} = 12 \mu\text{Sv}$$

Za svaki od uzoraka iz tabele je računata pojedinačna godišnja efektivna doza i ukupna godišnja efektivna doza, na isti način kako je prikazano u postupku gore. Zatim su podaci uneti u tabelu 5.3.

Tabela 5.3 Nazivi analiziranih uzoraka, zemlje porekla i vrednosti ukupnih godišnjih efektivnih doza od ingestije za svaki pojedinačni uzorak.

Redni broj uzorka	Naziv uzorka	Zemlja porekla	Ukupna godišnja efektivna doza [μSv]
1	Lisičarka	Belorusija	12
2	Lisičarka	Rusija	9,997
3	Sušena lisičarka	Rusija	16
4	Beli šampinjon	Mađarska	0,580
5	Sitni beli šampinjon	Bosna i Hercegovina	1,159
6	Bukovača	Mađarska	32
7	Bukovača	Mađarska	0,559
8	Bukovača	Bosna i Hercegovina	-
9	Smeđi šampinjon	Mađarska	-
10	Smrčak	Severna Makedonija	44
11	Suvi smrčak	Crna Gora	46
12	Suvi smrčak	Crna Gora	43
13	Suvi smrčak	Crna Gora	42
14	Suvi smrčak	Crna Gora	40
15	Zamrznuti vrganj	Rusija	0,555
16	Zamrznuti vrganj	Rusija	1,003
17	Zamrznuti vrganj	Rusija	0,602
18	Sušeni vrganj	Bosna i Hercegovina	5,758
19	Sušeni vrganj	Italija	4,426
20	Sušeni vrganj	Nemačka	6,956
21	Bukovača	Bosna i Hercegovina	-
22	Bukovača	Mađarska	0,559

5.2 Određivanje ukupne alfa i beta aktivnosti merenjem na gasnom proporcionalnom brojaču

Metoda određivanja ukupne alfa i ukupne beta aktivnosti pokazala se kao efikasna *skrining* metoda za brzu procenu nivoa kontaminacije radionuklidima. Ukupna alfa aktivnost obuhvata aktivnost svih alfa emitera, izuzev ^{222}Rn , dok ukupna beta aktivnost uključuje sve beta emitere, osim ^3H (Sarap i sar., 2023). Rezultati istraživanja su značajni, jer daju osnovne radiološke informacije od vitalnog značaja za procenu izloženosti stanovništva.

5.2.1 Uzorkovanje i priprema uzoraka

Od 22 analizirana uzorka pečuraka, 5 uzoraka je analizirano metodom ukupne alfa i beta aktivnosti (Tabela 5.4).

Tabela 5.4 Spisak analiziranih uzoraka, zemlje porekla i laboratorijske oznake.

Naziv pečurke	Zemlja porekla	Oznaka uzorka
Lisičarka	Belorusija	450/25
Beli šampinjoni	Mađarska	479/25
Sitni beli šampinjoni	Bosna i Hercegovina	480/25
Bukovača	Mađarska	481/25
Smeđi šampinjoni	Mađarska	482/25

Priprema uzoraka pečuraka za merenje ukupne alfa/beta aktivnosti obuhvata sledeće korake: merenje svežeg uzorka (Slika 5.3), sušenje u sušnici na na 105 °C tokom 48-72 h (Slika 5.4), merenje suvog uzorka (Slika 5.5), mineralizacija uzorka u laboratorijskoj peći za žarenje na 450 °C tokom 24 h metodom suvog spaljivanja, merenje mase izarenog uzorka i homogenizacija mineralnog ostatka (Slika 5.6) i odmeravanje uzorka u planšet u kojoj se meri. Podaci o pojedinačnim koracima pripreme uzoraka su prikazani u Tabeli 5.5.



a)

b)

Slika 5.3 a) Sitni beli šampinjoni; b) merenje mase svežeg uzorka.



Slika 5.4 Sušenje uzoraka u sušnici na 105 °C.



a)

b)

Slika 5.5 a) Uzorci nakon sušenja na 105 °C; b) Merenje mase suvih uzoraka.



Slika 5.6 Uzorci nakon žarenja na 450 °C.

Tabela 5.5 Podaci pojedinačnih etapa pripreme uzoraka.

Naziv uzorka	Masa prazne zdele [g]	Masa svežeg uzorka [g]	Masa uzorka posle sušenja [g]	Masa uzorka posle žarenja [g]
Lisičarka	791,39	516,34	37,13	8,72
Beli šampinjoni	791,24	885,92	73,99	8,59
Sitni beli šampinjoni	405,49	551,24	39,73	4,41
Bukovača	324,03	465,08	48,84	4,07
Smeđi šampinjoni	463,75	536,53	41,81	4,94

5.2.2 Osnovni principi rada i karakteristike niskofonskog gasnog proporcionalnog brojača Thermo Eberline FHT 770T

Merenja su obavljena u Laboratoriji za zaštitu od zračenja i zaštitu životne sredine Instituta za nuklearne nauke “Vinča”, Instituta od nacionalnog značaja za Republiku Srbiju, Univerziteta u Beogradu, na **niskofonskom gasnom proporcionalnom brojaču Thermo Eberline FHT 770T** (Slika 5.7).

Princip rada ovog tipa detektora je zasnovan na jonizaciji i šematski je prikazan na Slici 5.8. Jonizujuća čestica prolazi kroz efikasnu zapreminu detektora, koja je u ovom slučaju gas, pri čemu interaguje sa gasom i dolazi do stvaranja određenog broja jonskih parova; sakupljanjem jonskih parova na elektrodama dobija se informacija o zračenju. Pošto je intenzitet zračenja dat brojem detekcija u jediničnoj zapremini brojača u jedinici vremena, njegovo merenje svodi se na merenje broja električnih impulsa koji se pojavljuju na izlazu brojača (Sarap, 2017).

Detektor je predviđen za istovremeno merenje šest uzoraka. Površina prozora svakog od šest detektora-brojača koji su raspoređeni na tri horizontalna klizača, iznosi 28 cm^2 , a za merenje uzoraka se koriste planšete od nerđajućeg čelika prečnika 5,9 cm. Sastavni deo detektora je i niskofonska zaštita od zračenja koju čini olovno kućište (olovne ploče) debljine zida 10 cm. Temperaturski opseg za rad detektora je od $+5$ do $+40$ °C. Za ispiranje radne zapremine detektora koristi se gasna mešavina argon - metan (90 % Ar i 10 % CH₄) (Sarap, 2017).

Za merenje ukupne alfa i ukupne beta aktivnosti koristi se oko 260 mg mineralizovanog uzorka biljnog materijala ili prehrambenog proizvoda. Uzorci se fiksiraju i mere u planšetama od nerđajućeg čelika, prečnika 59 mm. Vreme merenja uzoraka je 14 400 s u četiri serije merenja. Efikasnost niskofonskog gasnog proporcionalnog brojača za merenje ukupne alfa i ukupne beta aktivnosti je određena upotrebom tačkastih kalibracionih izvora ²⁴¹Am i ⁹⁰Sr, koji su nabavljeni od Češkog metrološkog instituta iz Praga, i iznose 27 % i 32 %, redom. **Efikasnost zavisi od pozicije u detektoru.** Tačnost i reproduktivnost mernog uređaja (provera efikasnosti detekcije) se verifikuju jednom nedeljno, pomoću navedenih kalibracionih izvora i sastavni su deo procedure kontrole kvaliteta (Sarap, 2017).

Da bi se odredila efikasnost brojanja potrebno je izvršiti kalibraciju detektora, koja se vrši softverski za svaku mernu poziciju u detektoru, merenjem brzine brojanja kalibracionog izvora i odgovarajućeg fona (pozadinskog zračenja) u istom vremenskom intervalu. Kalibracija detektora za merenje alfa i beta aktivnosti i određivanje platoa radnog naponu su urađene korišćenjem standardnog kalibracionog izvora ⁹⁰Sr (EM145, Češki Institut za metrologiju, Prag), koji ima sledljivost do BIPM (fra. *Bureau International des Poids et Mesures*) (Sarap, 2017).

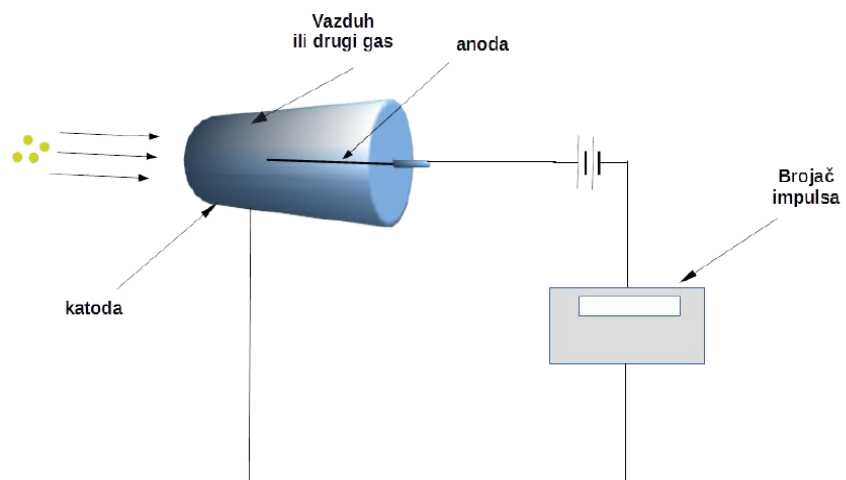
Praćenje ukupnog odbroja pozadinskog zračenja (eng. *background*) bez kalibracionog izvora, neophodno je kako bi se utvrdilo da nije došlo do kontaminacije detektora radioaktivnim materijalom.



a)

b)

Slika 5.7 a) Niskofonski gasni proporcionalni brojač Thermo Eberline FHT 770T; b) Izgled i raspored planšeta.



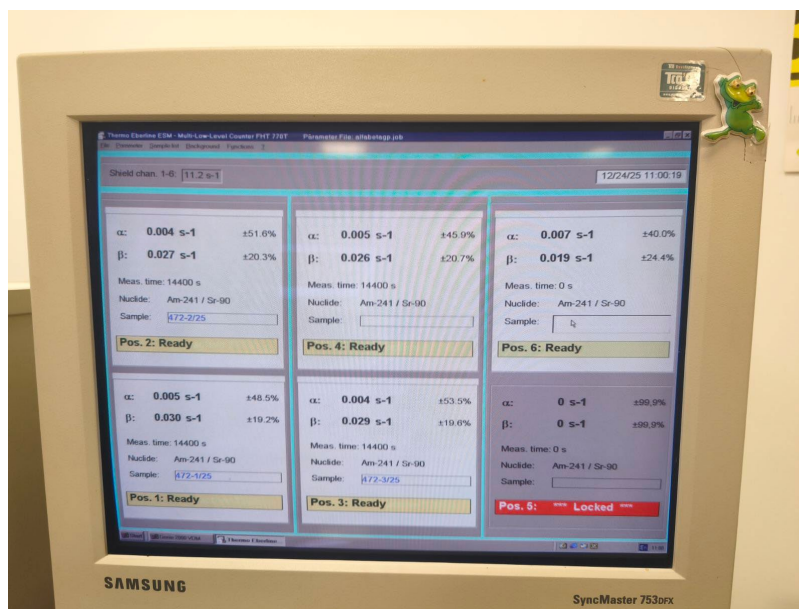
Slika 5.8 Šematski prikaz principa rada gasnih detektora.

5.2.3 Analiza uzoraka i računanje ukupne alfa i beta aktivnosti

Analiza uzoraka se vrši primenom **MARLAP akreditovane metode** za određivanje ukupne alfa i ukupne beta aktivnosti u čvrstim matriksima. **MARLAP** (*Multi-Agency Radiological Laboratory Analytical Protocols*) predstavlja skup preporučenih laboratorijskih protokola za analizu radionuklida u uzorcima iz životne sredine. Ovi protokoli su razvijeni u saradnji više američkih federalnih agencija sa ciljem obezbeđivanja pouzdanih, uporedivih i standardizovanih rezultata merenja radioaktivnosti u različitim medijumima životne sredine.

U okviru MARLAP metode, određivanje ukupne alfa i ukupne beta aktivnosti primenjuje se kao integralna, odnosno skrining metoda za preliminarnu procenu prisustva radionuklida u uzorcima. Metoda ne omogućava identifikaciju pojedinačnih radionuklida, već daje zbirnu informaciju o aktivnosti svih alfa i svih beta emitera prisutnih u čvrstom uzorku, uz primenu odgovarajućih korekcija na fonsko zračenje i efikasnost detektora (MARLAP, 2004).

Analiza uzoraka se vrši tako što se pripremljen uzorak u planšeti postavi na odgovarajuću poziciju u detektoru (Slika 5.7 b), upiše se broj uzorka na toj poziciji, zadaju se odgovarajući parametri merenja i nakon toga se pokreće merenje uzorka (Slika 5.9).



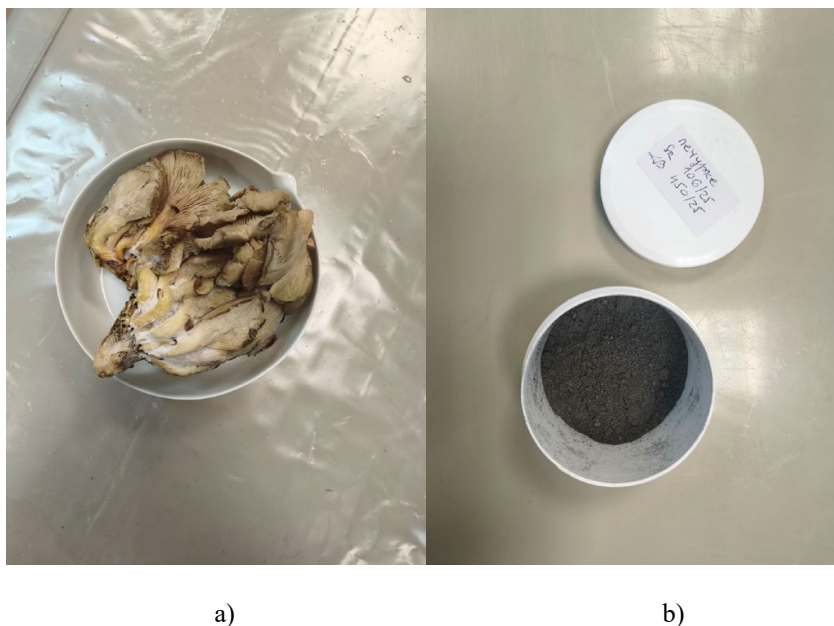
Slika 5.9 Unos podataka u program merenja.

Ukupna alfa i ukupna beta aktivnost ($A_{\alpha\beta}$) izražene u $Bq \cdot kg^{-1}$ se izračunavaju pomoću izraza (5.1):

$$A_{\alpha\beta} = \frac{(N - N_0)}{\varepsilon \cdot m} \quad (5.1)$$

gde je: N - alfa ili beta odbroj za mereni uzorak (s^{-1}), N_0 - alfa ili beta odbroj za pozadinsko zračenje (s^{-1}), ε - efikasnost mernog uređaja za merenje alfa ili beta efikasnosti, m - masa uzorka (kg).

Primer analize i izračunavanja ukupne alfa/beta aktivnosti je dat za slučaj uzorka lisičarke (Tabela 5.4), Slika 5.10.



Slika 5.10 a) Uzorak sveže lisičarke; b) Mineralizovan uzorak lisičarke.

- **Efikasnost za poziciju 4** : $\varepsilon_{\alpha} = 27,0 \%$; $\varepsilon_{\beta} = 32,6 \%$
- **Alfa i beta odbroji za četiri serije merenja:**

$$N_{\alpha} (1) = 0,433 s^{-1}$$

$$N_{\beta} (1) = 2,421 s^{-1}$$

$$N_{\alpha} (2) = 0,282 s^{-1}$$

$$N_{\beta} (2) = 2,190 s^{-1}$$

$$N_{\alpha} (3) = 0,297 s^{-1}$$

$$N_{\beta} (3) = 2,196 s^{-1}$$

$$N_{\alpha} (4) = 0,307 s^{-1}$$

$$N_{\beta} (4) = 2,195 s^{-1}$$

Podatke za proračun (razliku odbroja alfa/beta za mereni uzorak i fonskog odbroja podeljenu sa efikasnošću za mernu poziciju) softver automatski izračuna i to je prikazano u podacima iznad.

- Izračunate ukupne alfa i beta aktivnosti (na osnovu gore navedenih podataka) za svaku seriju merenja i odgovarajuće merne nesigurnosti:

$$A_{\alpha}(1) = (47,4 \pm 2,8) \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$A_{\beta}(1) = (159,3 \pm 4,6) \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$A_{\alpha}(2) = (30,9 \pm 2,1) \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$A_{\beta}(2) = (144,1 \pm 4,2) \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$A_{\alpha}(3) = (32,5 \pm 2,2) \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$A_{\beta}(3) = (144,5 \pm 4,3) \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$A_{\alpha}(4) = (33,6 \pm 2,2) \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$A_{\beta}(4) = (144,4 \pm 4,2) \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$$

- **Srednja vrednost ukupne alfa i beta aktivnosti i merna nesigurnost:**

$$\bar{A}_{\alpha} = (36,1 \pm 2,3) \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1} \quad \bar{A}_{\beta} = (148,1 \pm 17,3) \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Ukupna alfa i ukupna beta aktivnost za sve analizirane uzorke pečuraka su prikazane u Tabeli 5.6. Rezultati merenja su izraženi sa mernom nesigurnošću na nivou poverenja od 95% i dati su kao srednja vrednost za četiri serije merenja.

5.2.4 Rezultati određivanja ukupne alfa i beta aktivnosti

Nakon očitavanja podataka merenja, ukupna alfa i beta aktivnost je računata za svaki navedeni uzorak pečuraka postupkom koji je prethodno prikazan na primeru lisičarke. Rezultati određivanja ukupne alfa i beta aktivnosti uzoraka pečuraka su dati u Tabeli 5.6.

Tabela 5.6 Ukupne alfa i beta aktivnosti analiziranih uzoraka pečuraka.

Identifikacioni broj uzorka	Naziv uzorka	Ukupna alfa aktivnost [Bq · kg ⁻¹]	Ukupna beta aktivnost [Bq · kg ⁻¹]
450/25	Lisičarka	36,1 ± 2,3	148,1 ± 17,3
479/25	Beli šampinjoni	21,0 ± 1,0	98,9 ± 2,8
480/25	Sitni beli šampinjoni	18,4 ± 1,2	89,2 ± 2,5
481/25	Bukovača	14,7 ± 1,1	82,5 ± 2,4
482/25	Smeđi šampinjoni	12,1 ± 1,1	69,3 ± 2,2

6. DISKUSIJA REZULTATA

6.1 Određivanje koncentracije aktivnosti radionuklida u pečurkama merenjem na HPGe detektoru

6.1.1 Koncentracija aktivnosti ^{137}Cs

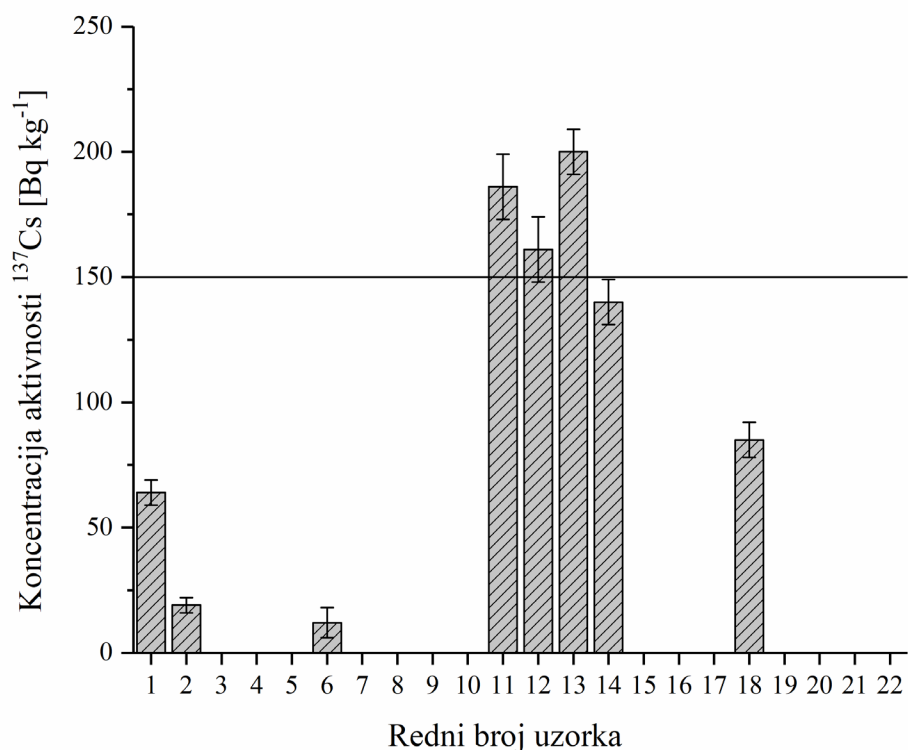
Radiocesijum (^{137}Cs) je produkt nuklearne fisije ^{235}U i drugih fisibilnih izotopa u nuklearnim reaktorima, a u ekosisteme dospeva putem padavina. Prisustvo ^{137}Cs u prirodi izaziva posebnu zabrinutost zbog njegovog dugog perioda poluraspada (30,1 godina), lake migracije kroz trofičke lance usled visoke rastvorljivosti u vodi i velike biološke dostupnosti, jer se po hemijskom ponašanju može porediti sa kalijumom i rubidijumom. Cezijum se pretežno nalazi u površinskom sloju zemljišta, najčešće na dubini od 0 do 5 cm, ali i u dubljim slojevima, pri čemu je značajan deo koncentrisan u micelijumu pečuraka, gde može činiti oko 30–50 % ukupne količine. Ovakva raspodela posledica je vezivanja cezijuma za komplekse organske materije, čestice gline ili mineralne površine, što dovodi do njegove manje koncentracije u rastvoru zemljišta i ograničene migracije kroz profile tla. Pošto gljive deluju kao svojevrsni rezervoar radioaktivnog cezijuma, ovaj radionuklid se može dalje uključiti u lanac ishrane konzumacijom jestivih i lekovitih pečuraka (Rakić i sar., 2014).

Na prostoru Balkanskog poluostrvo najveći deo ovog radionuklida potiče od radioaktivnog oblaka nastalog nakon nesreće u Černobilju 1986. godine, kada su se dugoživeći radionuklidi taložili na zemljištu i ušli u lanac ishrane. Cezijum se meri jer predstavlja pouzdan indikator radioaktivne kontaminacije životne sredine, a njegovo praćenje omogućava procenu radiološke ispravnosti hrane i potencijalnog rizika po zdravlje stanovništva. Zbog relativno dugog vremena poluraspada i mobilnosti u ekosistemu, njegova kontrola ima značajnu ulogu u dugoročnom monitoringu radioaktivnosti.

Izmerene aktivnosti za uzorke ispitivane u ovom radu kretale su se u opsegu od **1,6-200 Bq·kg⁻¹**, što ukazuje na značajnu varijabilnost koncentracije radionuklida među analiziranim uzorcima. Najveće koncentracije aktivnosti ^{137}Cs izmerene su za uzorak **suvi smrčak iz Crne Gore**, a izmerene koncentracije su u opsegu **140-200 Bq·kg⁻¹**. Visoka koncentracija aktivnosti ^{137}Cs izmerena je i kod uzorka **sušeni vrganj iz Bosne i Hercegovine**, a iznosila je **85 Bq·kg⁻¹**.

Maksimalna dozvoljena koncentracija ^{137}Cs u svežim pečurkama i proizvodima od pečuraka iznosi 150 Bq·kg⁻¹, a u suvim pečurkama 600 Bq·kg⁻¹. Sa druge strane, poljoprivredni proizvodi koji potiču iz zemalja susednih mestu nesreće u nuklearnoj elektrani Černobilj i dalje imaju znatno više dozvoljene limite (npr. 600 Bq·kg⁻¹, za radiocesijum u hrani koja nije namenjena odojčadima), što ilustruje nesklad u evropskim propisima (Rakić i sar., 2014).

Povišene aktivnosti ^{137}Cs u pojedinim područjima Crne Gore posledica su neravnomernog taloženja radioaktivnih padavina nakon černobiljske nesreće, kao i karakteristika šumskog zemljišta koje omogućava dugotrajno zadržavanje ovog radionuklida. Prostorna raspodela ^{137}Cs nakon černobiljske havarije bila je izrazito heterogena i zavisila je pre svega od meteoroloških uslova i padavina tokom prolaska radioaktivnog oblaka, kao i od karakteristika terena koje utiču na zadržavanje radionuklida u zemljištu. Koncentracije aktivnosti ^{137}Cs za analizirane uzorke prikazane su na Slici 6.1. Kao što se može videti na slici, sve izmerene vrednosti svežih pečuraka su ispod granice od 150 Bq·kg⁻¹, kao i za četiri uzorka suvih pečuraka koje su ispod 600 Bq·kg⁻¹.



Slika 6.1 Koncentracije aktivnosti ^{137}Cs za uzorke pečuraka analiziranih u ovom radu.

Prilikom određivanja koncentracije aktivnosti radionuklida ^{137}Cs u različitim vrstama gljiva sa planinskih područja u Republici Srbiji, zabeležen je širok raspon vrednosti od 5,8 do 10 240 $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Rakić, 2019). U poređenju sa tim rezultatima, aktivnosti ^{137}Cs izmerene u ovom istraživanju bile su znatno niže i kretale su se u intervalu od 1,6 do 200 $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$. Dobijeni rezultati potvrđuju izraženu varijabilnost koncentracije ^{137}Cs među analiziranim uzorcima, pri čemu maksimalna izmerena vrednost za suhu pečurku (200 $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$) ne prelazi propisane granične vrednosti u Republici Srbiji.

Uočene razlike mogu se objasniti različitim geografskim poreklom uzoraka, tipom zemljišta, vrstom gljiva, nadmorskom visinom, kao i razlikama u stepenu depozicije radiocezijuma nakon černobiljske nesreće.

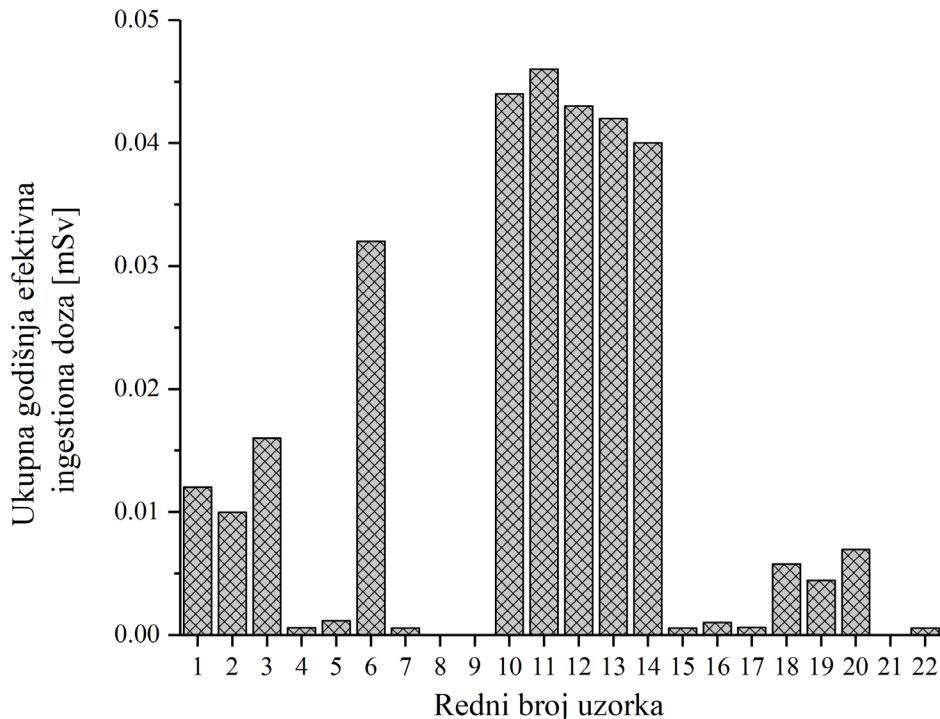
6.1.2 Ukupne godišnje efektivne ingestione doze

^{40}K , ^{226}Ra i ^{228}Ra predstavljaju izotope prirodnog porekla u zemljištu. Jedan od najvažnijih antropogenih izvora zagađenja životne sredine primordijalnim radionuklidima, ^{226}Ra i ^{40}K , je proizvodnja i primena fosfornih đubriva (Rakić i sar., 2014).

^{40}K se javlja u prirodi kao deo prirodnog kalijuma i samim tim učestvuje u metaboličkim procesima živih organizama. Zbog toga je ^{40}K u plodonosnim telima gljiva često prisutan, a skoro svaki analizirani uzorak u ovom radu je sadržao određenu koncentraciju aktivnosti ^{40}K .

Za svaki uzorak je računata pojedinačna godišnja efektivna ingestiona doza i ukupna godišnja efektivna ingestiona doza, zatim su podaci uneti u Tabelu 5.3, koja je prikazana u

eksperimentalnom delu rada. Ukupne godišnje efektivne ingestione doze za analizirane uzorke prikazane su na Slici 6.2.



Slika 6.2 Ukupne godišnje efektivne ingestione doze za analizirane uzorke u ovom radu.

Ukupne godišnje efektivne ingestione doze kretala su se u širokom opsegu od **0,555 – 46 μ Sv**. Lisičarke iz Belorusije i Rusije imale su umerene doze (9,997–12 μ Sv), pri čemu su sušene lisičarke iz Rusije imale nešto veću dozu. **Bukovača iz Mađarske** pokazuje značajnu razliku između uzoraka (**0,559 i 32 μ Sv**). **Smrčak iz Severne Makedonije i suvi smrčak iz Crne Gore** beleže najveće doze (**40–46 μ Sv**), a najveći doprinos ukupnoj godišnjoj efektivnoj ingestionojoj dozi kod datih uzoraka je od ^{226}Ra (36–42 μ Sv). Sušeni vrganj iz Bosne i Hercegovine, Italije i Nemačke imao je više efektivne doze (4,426–6,956 μ Sv) u odnosu na zamrznuti vrganj iz Rusije (0,555–1,003 μ Sv). Rezultati potvrđuju da vrste pečuraka i geografsko poreklo značajno utiču na akumulaciju ^{137}Cs i naglašavaju potrebu za praćenjem radionuklida u jestivim vrstama. **Za sve analizirane uzorke, ukupne godišnje efektivne ingestione doze su ispod regulativnih granica (1 mSv), kao i ispod prosečne vrednosti godišnje efektivne doze koja potiče od ingestije hrane (0,3 mSv (UNSCEAR, 2024)), što potvrđuje relativno nizak radiološki rizik analiziranih pečuraka.**

6.1.3 Poređenje rezultata sa sličnim studijama

Poređenje rezultata sprovedenog istraživanja sa rezultatima sličnih naučnih radova predstavlja važan korak u njihovoj interpretaciji. Takvo poređenje omogućava da se utvrdi da li su dobijeni rezultati u skladu sa postojećim saznanjima ili ukazuju na određena odstupanja. Takođe, na taj način se rad postavlja u širi naučni kontekst, čime se pokazuje njegov doprinos postojećim istraživanjima i omogućava bolje razumevanje dobijenih rezultata.

U Tabeli 6.1 dato je poređenje rezultata ingestivnih doza za različite vrste pečuraka iz sličnih istraživanja i prikazane su reference za svaki naučni rad čiji su rezultati navedeni u tabeli.

Pojedinačne godišnje efektivne doze različitih radionuklida pokazuju značajne razlike između regiona. Za ^{238}U , doze su zabeležene uglavnom u Turskoj (Tekirdag: **4,8–17,5 mSv**, Amasja: **6,5–16 mSv**), dok su u Severnoj Kini, Kini (Junan), Severnoj Koreji, Poljskoj, Hrvatskoj i evropskim zemljama iz ovog rada zanemarljive ili podaci nisu dostupni.

Najveće pojedinačne godišnje doze ^{226}Ra su zabeležene u Severnoj Kini (**1,0–34,3 mSv**), dok su u evropskim zemljama iz ovog rada vrednosti znatno niže (**0,0048–0,042 mSv**), ukazujući da koncentracija radijuma u pečurkama znatno varira između regiona.

Sličan trend se vidi i kod ^{232}Th . Najveće doze su u Severnoj Kini (**2,26–32,3 mSv**), dok su vrednosti za zemlje iz ovog rada, znatno niže (**0,0013–0,0078 mSv**). Ovo potvrđuje da su prirodne koncentracije torijuma u pečurkama daleko veće u nekim delovima Azije nego u Evropi.

Za ^{40}K , Severna Kina beleži relativno visoke doze (**208–2388 mSv**), dok Kina (Junan) i Poljska takođe pokazuju značajno visoke vrednosti (**1200–1900 mSv**). Turska (Tekirdag i Amasja) takođe ima visoke doze (**224,7–2048,5 mSv**), što pokazuje da su prirodne koncentracije kalijuma u pečurkama značajne u ovim regionima. Nasuprot tome, uzorci pečuraka iz zemalja iz ovog rada imaju minimalne doze (**0,0003–0,0094 mSv**), što ukazuje na znatno manji doprinos prirodnog kalijuma u evropskim zemljama.

Doze koje potiču od ^{137}Cs su najviše u Poljskoj (**4,2–1600 mSv**) i Hrvatskoj (**0,95–1210 mSv**), dok je Severna Kina umerenija (**0,6–130,3 mSv**). U evropskim zemljama iz ovog rada vrednosti su zanemarljive (**0,00004–0,0044 mSv**), što pokazuje da je kontaminacija ^{137}Cs nakon nuklearnih testiranja i nesreća znatno manja u ovim zemljama u poređenju sa istočnoazijskim i centralnoevropskim regionima.

Tabela 6.1 Poređenje rezultata ingestivnih doza za različite vrste pečuraka sa sličnim istraživanjima.

Grupa uzoraka*	Zemlja porekla	Pojedinačna godišnja efektivna ingestiona doza [mSv]					E_{ing} [mSv]	Reference
		^{238}U	^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K	^{137}Cs		
1.	Severna Kina	–	1,0-34,3	2,26-32,3	208-2388	0,6-130,3	$2,6 \cdot 10^{-3}$ - $2,4 \cdot 10^{-3}^{**}$	Wang i sar., 2021
2.	Kina (Junan)	–	–	–	1200-1500	<1,2	–	Falandysz i sar., 2016
3.	Severna Koreja	–	–	–	–	1,0-21,4	$2,0 \cdot 10^{-5}$	Lee i sar., 2018
4.	Poljska	–	–	–	1300-1900	4,2-1600	–	Falandysz i sar., 2016
5.	Turska (Tekirdag)	4,8-17,5	–	1,3-11,9	287,4-1940,9	3,9-127,8	–	Akkaya i Aktaş, 2025
6.	Turska (Amasja)	6,5-16	–	1,3-5,7	224,7-2048,5	3,1-63,7	–	Akkaya i Aktaş, 2025
7.	Hrvatska	–	–	–	–	0,95-1210	–	Tucaković i sar., 2018
8.	Hrvatska	–	–	–	–	1,05-36,8	–	Tucaković i sar., 2018
9.	Belorusija Rusija Mađarska Bosna i Hercegovina Severna Makedonija Crna Gora Italija Nemačka	–	0,0048–0,042	$1,3 \cdot 10^{-3}$ – $7,810^{-3}$	$0,3 \cdot 10^{-3}$ – 0,094	$4 \cdot 10^{-5}$ – $4,4 \cdot 10^{-3}$	0,000555– 0,046	Ovaj rad

*U tabeli 6.2 su date grupe uzoraka, svakoj od datih grupa pripadaju određene vrste analiziranih uzoraka pečuraka.

**računata samo od ^{137}Cs

Tabela 6.2 Latinski nazivi vrsta analiziranih uzoraka pečuraka iz naučnih radova razvrstani po grupama.

Grupa uzoraka	Latinski nazivi vrste pečuraka
1.	<i>Armillaria mellea</i> <i>Ganoderma</i> <i>Agrocybe aegerita</i> <i>Flammulina velutipes</i> <i>Lentinus edodes (Berk.) Sing.</i> <i>Agricus blazei murrill</i> <i>Boletus edulis Bull</i> <i>Suillus luteus</i> <i>Lentinula edodes</i> <i>Morchella esculenta</i> <i>Pleurotus citrinopileatus Sing.</i> <i>Panellus serotius</i> <i>Hygrophorus lucorum Kalchbr</i> <i>Sarcomyxa edulis</i> <i>Lepista nuda</i> <i>Lactarius deliciosus</i> <i>Chroogomphus rutilus</i>
2.	<i>Cantharellus (Cantharellus cibarius,</i> <i>Cantharellus tubaeformis, and Cantharellus minor)</i>
3.	<i>Lentinula edodes</i> <i>Sparassis crispa</i> <i>Sarcodon asparatus</i> <i>Sarcodon imbricatus</i> <i>Tricholoma matsutake</i> <i>Entoloma sarcopum</i> <i>Rhodophyllus crassipes</i> <i>Boletopsis leucomelaena</i> <i>Tricholomopsis rutilans</i>
4.	<i>Cantharellus (Cantharellus cibarius,</i> <i>Cantharellus tubaeformis, and Cantharellus minor)</i>
5.	<i>Amanita caesarea</i> <i>Lycoperdon perlatum</i> <i>Macrolepiota procera</i> <i>Lactarius deliciosus</i> <i>Lactarius vellereus</i> <i>Suillus luteus</i> <i>Boletus edulis</i> <i>Armillaria mellea</i> <i>Tricholoma terreum</i> <i>Hydnum repandum</i>
6.	<i>Lactarius deliciosus</i> <i>Lactarius deliciosus</i> <i>Armillaria mellea</i> <i>Hygrophorus chrysodon</i> <i>Hygrophorus latitabundus</i> <i>Tricholoma fracticum</i> <i>Ganoderma lucidum</i> <i>Macrolepiota procera</i> <i>Tricholoma imbricatum</i> <i>Hydnum repandum</i> <i>Ganoderma applanatum</i>
7.	<i>Mycorrhizal species</i>
8.	<i>Saprotrophic species</i>
9.	<i>Cantharellus cibarius</i> <i>Agaricus bisporus</i> <i>Pleurotus ostreatus</i> <i>Morchella esculenta</i> <i>Boletus edulis</i>

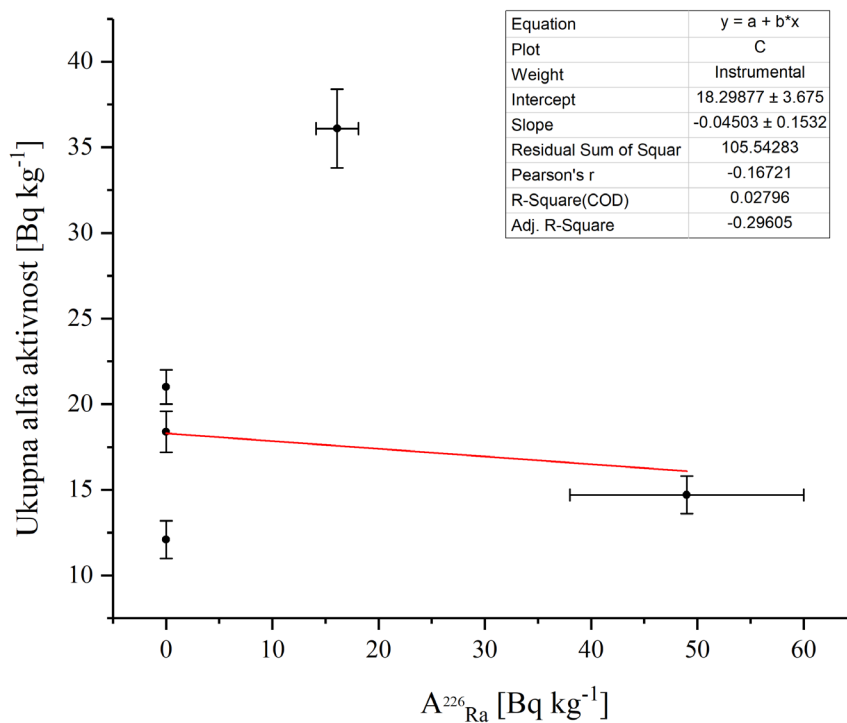
6.2 Određivanje ukupne alfa/beta aktivnosti u pečurkama merenjem na gasnom proporcionalnom brojaču

6.2.1 Korelacije ukupne alfa/beta aktivnosti sa koncentracijom pojedinačnih radionuklida

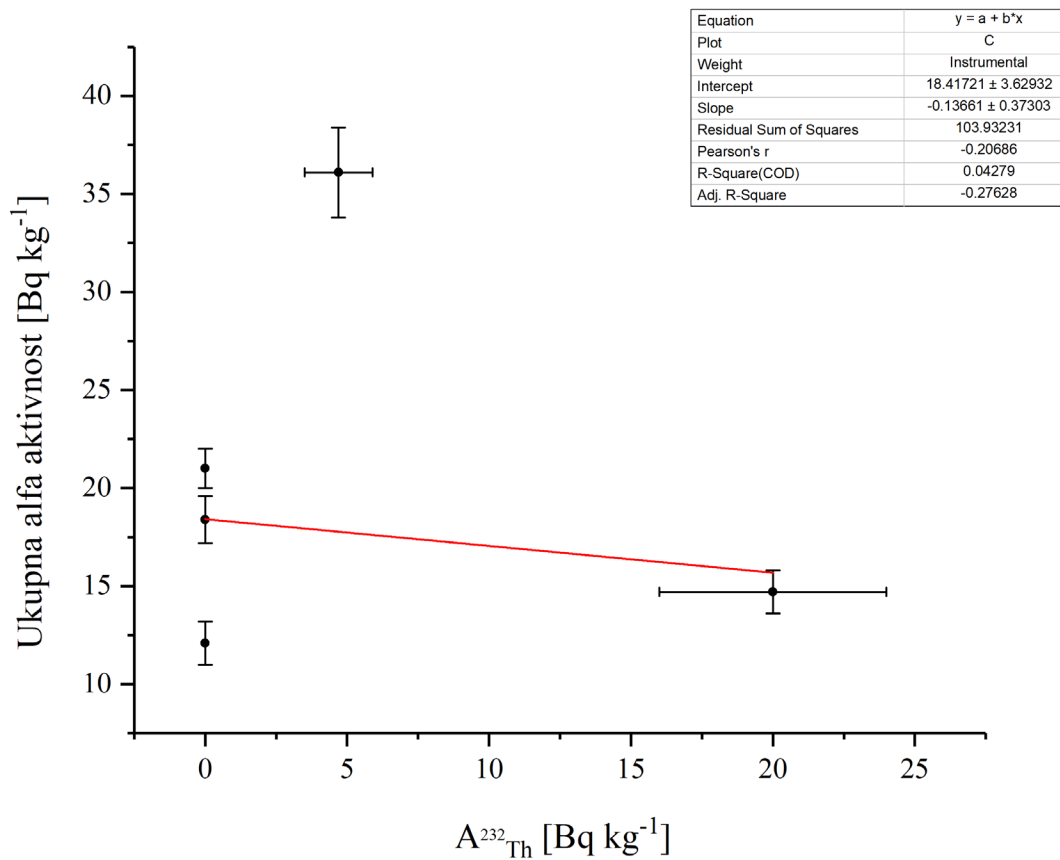
Analiza korelacija između ukupne alfa i beta aktivnosti i koncentracija aktivnosti pojedinačnih radionuklida određenih gama-spektrometrijom vrši se u cilju procene njihovog doprinosa ukupnoj radioaktivnosti uzoraka. Na taj način moguće je ispitati da li promene u koncentraciji određenih radionuklida utiču na varijacije ukupne alfa ili beta aktivnosti. Koeficijent korelacije predstavlja meru statističke povezanosti između posmatranih veličina i omogućava procenu postojanja i jačine linearne veze između njih.

Među radionuklidima analiziranim u ovom radu, ^{226}Ra i ^{232}Th su primarno alfa emiteri, dok su ^{40}K i ^{137}Cs beta emiteri. Poznavanje vrste zračenja pojedinačnih radionuklida omogućava bolje razumevanje doprinosa svakog od njih ukupnoj alfa i beta aktivnosti u uzorcima.

Na svakom predstavljenom grafiku (Slike 6.3–6.6) prikazane su korelacije između ukupne alfa ili ukupne beta aktivnosti, u zavisnosti da li je određeni radionuklid primarno alfa ili beta emiter, i koncentracije aktivnosti za dati radionuklid kod analiziranih uzoraka.



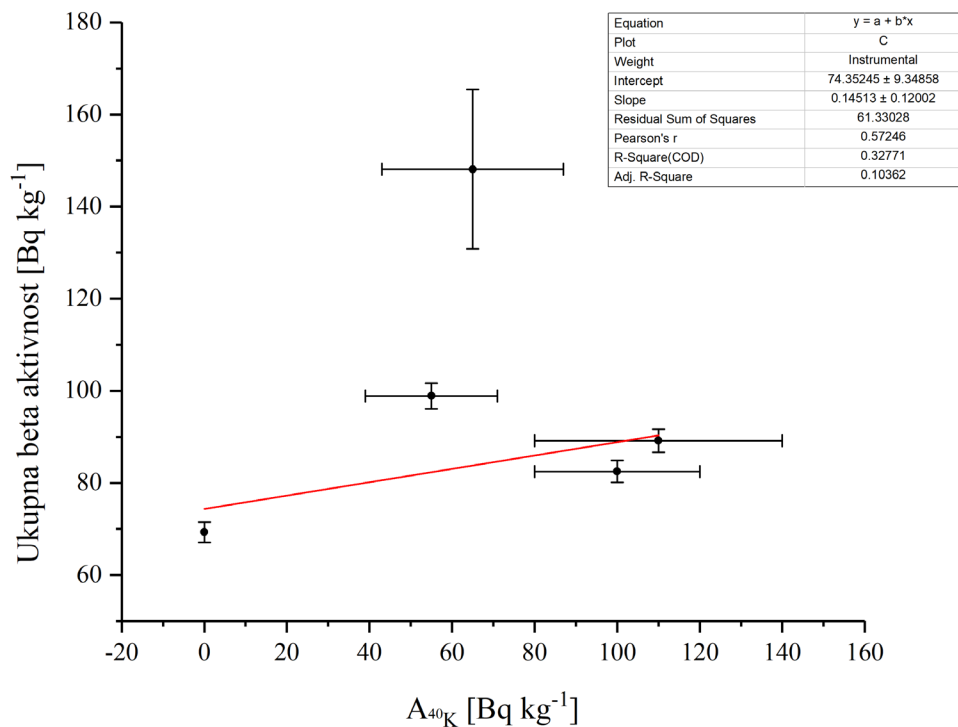
Slika 6.3 Korelacija ukupne alfa aktivnosti i koncentracije aktivnosti ^{226}Ra u merenim uzorcima.



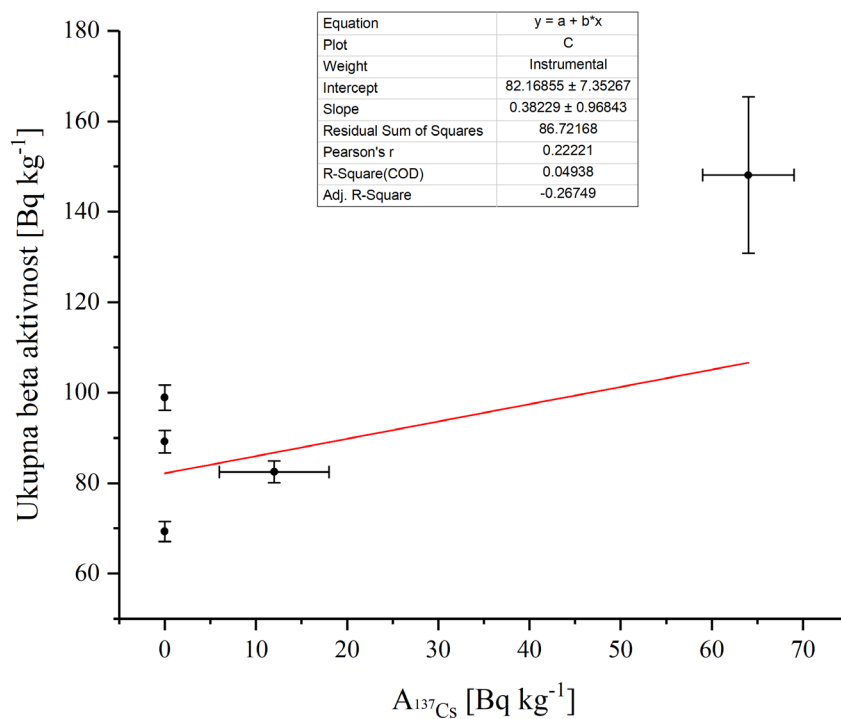
Slika 6.4 Korelacija ukupne alfa aktivnosti i koncentracije aktivnosti ^{232}Th u merenim uzorcima.

Ukupna alfa aktivnost u analiziranim uzorcima ne pokazuje značajnu korelaciju sa koncentracijom aktivnosti ^{226}Ra i ^{232}Th (Slike 6.3 i 6.4, respektivno). Ovakav rezultat je očekivan, s obzirom na to da metoda određivanja ukupne alfa aktivnosti obuhvata doprinos svih alfa emitera prisutnih u uzorku, dok ^{226}Ra predstavlja samo jedan radionuklid iz uranijumskog niza. Značajan deo ukupne alfa aktivnosti u prehrambenim uzorcima može poticati od radionuklida kao što je ^{210}Po , koji se ne mora nalaziti u sekularnoj ravnoteži sa ^{226}Ra (UNSCEAR, 2000). Takođe, mali broj analiziranih uzoraka može dodatno uticati na slab statistički odnos između ovih veličina.

Ukupna beta aktivnost u uzorcima pečuraka pokazuje pozitivnu korelaciju sa koncentracijama aktivnosti radionuklida ^{40}K i ^{137}Cs (Slike 6.5 i 6.6, respektivno). U slučaju ^{40}K uočena je slaba do umerena pozitivna korelacija, što je očekivano s obzirom na to da je ^{40}K prirodni radionuklid koji je uobičajeno prisutan u prehrambenim namirnicama i predstavlja značajan izvor β -zračenja. Korelacija između ukupne beta aktivnosti i ^{137}Cs je takođe pozitivna, ali slabija, što ukazuje na to da ovaj radionuklid ima manji doprinos ukupnoj beta aktivnosti u analiziranim uzorcima. Relativno nizak koeficijent korelacije u oba slučaja može se objasniti činjenicom da metoda određivanja ukupne beta aktivnosti obuhvata doprinos svih β -emitera prisutnih u uzorku, uključujući i radionuklide koji nisu određeni gama-spektrometrijom. Takođe, varijabilnost može biti posledica razlika između vrsta pečuraka, njihovih staništa i sposobnosti akumulacije pojedinih radionuklida.



Slika 6.5 Korelacija ukupne beta aktivnosti i koncentracije aktivnosti ^{40}K u merenim uzorcima.



Slika 6.6 Korelacija ukupne beta aktivnosti i koncentracije aktivnosti ^{137}Cs u merenim uzorcima.

7. ZAKLJUČAK

U okviru ovog rada izvršeno je ispitivanje koncentracija aktivnosti ključnih radionuklida (^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K , ^{137}Cs) i određivanje ukupne alfa i beta aktivnosti u uzorcima pečuraka iz uvoza sa različitih lokaliteta. Dobijeni rezultati ukazuju na prisustvo analiziranih radionuklida, pri čemu su aktivnosti ^{137}Cs u analiziranim uzorcima značajno niže u poređenju sa prethodno objavljenim podacima u Republici Srbiji, kao i ispod vrednosti propisanih zakonskom regulativom, što ukazuje na relativno nizak stepen kontaminacije radioaktivnim cezijumom u datim evropskim državama odakle su pečurke uvezene.

Analiza ukupne alfa aktivnosti pokazala je da ^{226}Ra i ^{232}Th imaju ograničen doprinos ukupnoj alfa aktivnosti, dok se veći deo može pripisati drugim alfa emiterima. Ukupna beta aktivnost u uzorcima pokazala je pozitivan trend sa koncentracijom ^{40}K i ^{137}Cs , pri čemu je doprinos prirodnog ^{40}K dominantan, a ^{137}Cs manji, ali uočljiv u pojedinim uzorcima.

Dobijene ukupne efektivne godišnje ingestione doze pokazale su značajnu varijabilnost među uzorcima, ali su u svim analiziranim uzorcima ispod regulativnih granica i proseka u svetu, potvrđujući relativno nizak radiološki rizik korišćenja pečuraka u ljudskoj ishrani. Poređenje sa sličnim naučnim istraživanjima je pokazalo da su rezultati ovog rada u skladu sa prethodnim istraživanjima.

Ovaj rad potvrđuje značaj praćenja radionuklida u pečurkama kao indikatora radioaktivne kontaminacije životne sredine, ističući istovremeno nisku opasnost analiziranih uzoraka jestivih pečuraka po ljudsko zdravlje, ali i potrebu za kontinuiranim monitoringom radi dugoročnog praćenja stanja ekosistema, bezbednosti hrane i izloženosti stanovništva jonizujućem zračenju.

REFERENCE

Akkaya, A., Aktaş, S., 2025, *Radioactive contaminants in edible mushrooms: A comparative study of ^{137}Cs and natural radionuclides in Amasya and Tekirdağ, Türkiye*, Journal of Fungi, 11(5), 351.

Elstner E. F. i sar., 1989, *Radioactivity in mushrooms, mosses and soil samples of defined biotops in SW Bavaria — two years after “Chernobyl”*, Oecologia, 80(2), 173–177.

Falandysz J. i sar., 2016, *Evaluation of the activity concentrations of ^{137}Cs and ^{40}K in some chanterelle mushrooms from Poland and China*, Environmental Science and Pollution Research International, 23(19), 20039–20048.

IAEA (International Atomic Energy Agency), 1989, *Measurement of radionuclides in food and the environment: A Guidebook*, Technical Reports Series No. 295, IAEA, Vienna.

ICRP (International Commission on Radiological Protection), 1996, *ICRP Publication 72: Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides*, Annals of the ICRP.

Jovančević N., Knežević D., Nikolov J., 2022, *Eksperimentalne vežbe iz nuklearne fizike*, Univerzitet u Novom Sadu, Prirodno-matematički fakultet, Departman za fiziku, Novi Sad.

Kioupi V. i sar., 2015, *Bioaccumulation of artificial Cs-137 and natural radionuclides Th-234, Ra-226, and K-40 in Basidiomycetes fruit bodies in Greece*, Journal of Environmental Radioactivity, 23(1), 613–624.

Knežević Radić J. i sar., 2023, *Diatomaceous earth: radiological characterization and risk assessment*, Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 332, 3227–3234.

Knežević Radić J. i sar., 2025, *Preliminarno ispitivanje radioaktivnosti zemljišta i gljiva sa područja Fruške Gore*, Zbornik radova XXXIII Simpozijum Društva za zaštitu od zračenja Srbije i Crne Gore, 01-03. oktobar 2025, Banja Koviljača, Srbija, 9–16.

Korkmaz M. E. i sar., 2016, *Measurement of Gross Alpha and Beta Activities in Mushroom Samples*, Cumhuriyet University Faculty of Science Science Journal (CSJ), 37 (4).

Krmar M., 2013, *Uvod u nuklearnu fiziku*, Univerzitet u Novom Sadu, Prirodno-matematički fakultet, Departman za fiziku, Novi Sad.

Lee S. H., i sar. 2018, *Evaluation of abundance of artificial radionuclides in food products in South Korea and sources*, Journal of Environmental Radioactivity, 184–185, 46–52.

Lindberg W., 2018, *Characterization of an HPGe Detector for Experiments on Radioactive Mushrooms*, Master's thesis, Uppsala University, Department of Physics and Astronomy.

MARLAP, 2004, *Multi-Agency Radiological Laboratory Analytical Protocols Manual*, Volume II, Appendix F, Part II, U.S. EPA / MARLAP.

Mrđa D. i sar., 2024, *Low-level gamma ray counting on environmental samples*, Journal of Environmental Radioactivity, 278, 107511.

Rakić M. i sar., 2014, *Radionuclides in some edible and medicinal macrofungal species from Tara Mountain, Serbia*, Environmental Science and Pollution Research, 21(19), 11283–11292.

Rakić M., 2019, *Diverzitet makrogljiva i njihova uloga u monitoringu stanja šumskih ekosistema Srbije*, Doktorska disertacija, Univerzitet u Novom Sadu, Prirodno-matematički fakultet, Novi Sad.

Ronda O. i sar., 2022, *Accumulation of radioisotopes and heavy metals in selected species of mushrooms*, Food Chemistry, 367, 130670.

Sarap N. B., 2017, *Praćenje distribucije radionuklida ⁹⁰Sr u poljoprivrednom zemljištu i biljnim kulturama metodom spektrometrije beta zračenja*, Doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Fizički fakultet, Beograd.

Sarap N. i sar., 2023, *Analiza trenda promene ukupne alfa i ukupne beta aktivnosti u poljoprivrednom ekosistemu*, Zbornik radova XXXII Simpozijum Društva za zaštitu od zračenja Srbije i Crne Gore, 04-06. oktobar 2023, Budva, Crna Gora, 86–92.

Službeni glasnik RS (br. 36/18), *Pravilnik o granicama sadržaja radionuklida u vodi za piće, životnim namirnicama, stočnoj hrani, lekovima, pre predmetima opšte upotrebe, građevinskom materijalu i drugoj robi koja se stavlja u promet*, 2018.

Strumińska-Parulska D., Falandysz J., 2020, *A review of the occurrence of alpha-emitting radionuclides in wild mushrooms*, International Journal of Environmental Research and Public Health, 17(21), 8220.

Suno H. i sar., 2019, *Quantum Chemical Calculations for the Norbadiene A Complexes with Cs⁺, K⁺, and Na⁺ in Gas and Aqueous Phases*, Chemical Physics Letters, 730.

Tanović T., 2024, *Koincidentni sistem HPGe detektora i plastičnog scintilatora za ispitivanje interakcija kosmičkog zračenja*, Master rad, Univerzitet u Novom Sadu, Prirodno-matematički fakultet, Novi Sad.

Tucaković I. i sar., 2018, *¹³⁷Cs in mushrooms from Croatia sampled 15–30 years after Chernobyl*, Journal of Environmental Radioactivity, 181, 147–151.

UNSCEAR, 2000, *Sources and Effects of Ionizing Radiation*, Volume I, Annex B: Exposures from natural radiation sources, United Nations, New York.

UNSCEAR, 2024, *Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation*, Volume II Scientific Annex B, United Nations, New York.

Wahl L. E., 2010, *Environmental Radiation*, Lawrence Berkeley National Laboratory Publication.

Wang S. i sar., 2021, *Radionuclide content and risk analysis of edible mushrooms in northeast China*, Radiation Medicine and Protection, 2(4), 165–170.

BIOGRAFIJA



Jovana Gašparović rođena je 11. oktobra 1993. godine u Novom Sadu. Osnovnu školu „Petefi Šandor“ u Novom Sadu pohađala je od 2000. do 2008. godine, gde je dobila Vukovu diplomu. Nakon toga upisala je Gimnaziju „Jovan Jovanović Zmaj“, prirodno-matematički smer, koju je završila 2012. godine kao odličan đak. Upravo tokom srednjoškolskog obrazovanja razvila je posebno interesovanje za fiziku, koje je proisteklo iz radoznalosti i ljubavi prema prirodi i njenim zakonitostima. Osnovne akademske studije fizike, istraživački smer, završila je na Prirodno-matematičkom fakultetu Univerziteta u Novom Sadu, stekavši zvanje diplomiranog fizičara 2024. godine, a zatim je upisala master akademske studije nuklearne fizike na istom fakultetu. U slobodno vreme neguje interesovanja za pisanje, crtanje i slikanje, čitanje poezije i boravak u prirodi.

UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

Redni broj:

RBR

Identifikacioni broj:

IBR

Tip dokumentacije: Monografska dokumentacija

TD

Tip zapisa: Tekstualni štampani materijal

TZ

Vrsta rada: Master rad

VR

Autor: Jovana Gašparović

AU

Mentor: doc. dr Jovana Knežević Radić

MN

dr Nataša Sarap

Naslov rada: Radiološka karakterizacija jestivih pečuraka iz uvoza i procena ingestione doze

NR

Jezik publikacije: srpski (latinica)

JP

Jezik izvoda: srpski/engleski

JI

*Zemlja
publikovanja:* Republika Srbija

ZP

Uže geografsko područje: Vojvodina

UGP

Godina: 2026

GO

Izdavač: Autorski reprint

IZ

Mesto i adresa: Prirodno-matematički fakultet, Trg Dositeja Obradovića 4, Novi Sad

MA

Fizički opis rada: 7 poglavlja/59 strana/10 tabela/7 grafika/15 slika

FO

Naučna oblast: Fizika

NO

Naučna disciplina: Nuklearna fizika

ND

Predmetna odrednica/ ključne reči: radioaktivnost, prirodni i veštački radionuklidi, makrogljive, bioindikator, akumulacija radionuklida, ingestiona doza, gama-spektrometrija, HPGe detektor, ukupna alfa i beta aktivnost

PO

UDK

Čuva se: Biblioteka departmana za fiziku, PMF-a u Novom Sadu

ČU

Važna napomena: nema

VN

Izvod: Rad se bavi ispitivanjem radioaktivnosti u životnoj sredini sa posebnim fokusom na makrogljive kao bioindikator zagađenja i njihove sposobnosti akumulacije radionuklida iz zemljišta. Posebna pažnja posvećena je proceni ingestione doze zračenja kao ključnog pokazatelja potencijalnog rizika po zdravlje ljudi usled njihove konzumacije. U eksperimentalnom delu određene su koncentracije aktivnosti radionuklida primenom gama-spektrometrije i merenjem ukupne alfa i ukupne beta aktivnosti.

IZ

Datum prihvatanja

teme od NN veća: 5. 3. 2026.

DP

Datum odbrane:

29. 4. 2026.

DO

Članovi komisije:

KO

Predsednik: prof. dr Petar Mali

član: dr Jan Hansman

član: doc. dr Robert Lakatoš

član: doc. dr Jovana Knežević Radić

član: dr Nataša Sarap

UNIVERSITY OF NOVI SAD

FACULTY OF SCIENCES

KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number:

ANO

*Identification
number:*

INO

Document type: Monograph publication

DT

Type of record: Textual printed material

TR

Content code: MSc thesis

CC

Author: Jovana Gašparović

AU

Mentor/comentor: dr Jovana Knežević Radić

MN

dr Nataša Sarap

Title: Radiological characterization of imported edible mushrooms and assessment of the ingestion dose

TI

Language of text: Serbian (Latin)

LT

*Language of
abstract:* English

LA

*Country of
publication:* The Republic of Serbia

CP

Locality of publication: Vojvodina

LP

Publication year: 2026

PY

Publisher: Author's reprint

PU

Publication place: Faculty of Sciences, Trg Dositeja Obradovića 4, Novi Sad

PP

Physical description: 7 chapters / 59 pages / 10 tables / 7 graphs / 15 figures

PD

Scientific field: Physics

SF

Scientific discipline: Nuclear physics

SD

Subject/ Key words: radioactivity, natural and artificial radionuclides, macrofungi, bioindicators, radionuclide accumulation, ingestion dose, gamma spectrometry, HPGe detector, total alpha and beta activity

SKW

UC

Holding data: Library of Department of Physics, Trg Dositeja Obradovića 4

HD

Note: none

N

Abstract: The study investigates radioactivity in the environment, with particular emphasis on macrofungi as bioindicators of environmental contamination and their capacity to accumulate radionuclides from soil. Special attention is given to the assessment of the ingestion radiation dose as a key parameter for evaluating the potential risk to human health associated with their consumption. In the experimental section, activity concentrations of radionuclides were determined by gamma spectrometry, and total alpha and beta activities were measured.

AB

Accepted by the Scientific Board: 5. 3. 2026.

ASB

Defended on: 29. 4. 2026.

DE

Thesis defend board:

DB

President: prof. dr Petar Mali

Member: dr Jan Hansman

Member: dr Robert Lakatoš

Member: dr Jovana Knežević Radić

Member: dr Nataša Sarap