



UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNO-MATEMATIČKI
FAKULTET
DEPARTMAN ZA FIZIKU



Radioaktivnost zemljišta Vojvodine

- diplomski rad -

Mentor:

Prof.dr Nataša Todorović

Kandidat:

Vladica Nikolić 111/05

Novi Sad, 2011

PREDGOVOR

Diplomski rad je urađen pod mentorstvom dr. Nataše Todorović, vanrednog profesora na Prirodno-matematičkom fakultetu, Univerziteta u Novom Sadu. Eksperimentalni deo rada je urađen u Laboratoriji za nuklearnu fiziku Departmana za fiziku, Prirodno-matematičkog fakulteta u Novom Sadu.

Ovom prilikom bih želela da se zahvalim prof. Nataši za veliku pomoć, podršku i korisne sugestije koje mi je dala u toku izrade rada.

Takođe bih zahvalila svojim roditeljima, Mileni i Rajku, kao i sestri Vanji, koji su mi bili ogromna podrška u toku studija, izvor bezuslovne ljubavi i razumevanja.

Vladica Nikolić

SADRŽAJ:

1. UVOD	5
2. OSNOVNI POJMOVI	6
2.1. Radioaktivnost, zakon radioaktivnog raspada i karakteristične veličine	6
2.2. Vrste radioaktivnih raspada	8
2.3. Prirodna radioaktivnost.....	10
2.4. Veštačka radioaktivnost	13
3. DETEKTORI	14
3.1. Osnovne karakteristike detektora.....	14
3.2. Poluprovodnički detektori.....	17
3.2.1. Germanijumski detektor.....	18
3.2.2. Primena germanijumskih detektora u γ spektrometriji.....	19
4. GAMA SPEKTROMETRIJA.....	20
4.1. Gama zraci i njihova interakcija sa materijom	20
4.2. Specifičnosti gama spektrometrije prirodnih uzoraka	25
4.3. Izvori zračenja.....	27
4.4. Geometrija izvor- detektor	27
4.5. Oblik gama spektara i njihove osobine	28
4.6. Komponente fona	29

4.7. Analiza spektara	30
5. EKSPERIMENTALNI DEO	34
5.1. Određivanje koncentracije aktivnosti radionuklida poljoprivrednog zemljišta	34
5.1.1. Analizirano poljoprivredno zemljište Vojvodine	34
5.1.2. Uzorkovanje i metodologija merenja.....	40
a) Uzorkovanje i priprema uzoraka	40
b) Metodologija merenja	42
5.1.3. Rezultati merenja i diskusija.....	48
5.2. Procena maksimalne koncentracije radionuklida u biljnim kulturama ..	63
5.2.1. Transfer faktor radionuklida iz zemljišta u biljku	63
5.2.2. Rezultati merenja i diskusija.....	66
6. ZAKLJUČAK	77
7. LITERATURA.....	79
8. BIOGRAFIJA	80

DOKUMENTACIJA

1. UVOD

U eri napredka nuklearne tehnologije, proizvodnje veštačkih radionuklida intezivnijim korišćenjem nuklearne energije, pa i akcidentnih situacija na nuklearnim postrojenjima praćenih kontaminacijom velikih naseljenih regiona, pažnja javnosti bi trebala da bude usmerena na kontrolu izlaganja stanovništva ionizujućem zračenjem.

Radionuklidi ispušteni u prirodu, preko različitih mehanizama dospevaju u ljudski organizam iz vazduha, vode i hrane i na taj način doprinose ozračivanju čoveka. Na osnovu sistematskih merenja prirodnih radionuklida u zemljištu, namirnicama, stočnoj hrani, vazduhu i vodama i na osnovu dobijenih rezultata, može se konstatovati različiti sadržaji pomenutih radionuklida koji se putem namirnica unose u organizam stanovnika nekog područja

Gama spektrometrija je metoda koja je primenjena u ispitivanju radioaktivnosti poljoprivrednog zemljišta uzorkovanog sa 50 lokacija na području AP Vojvodine u 2010. godini. Ona se pokazuje kao vrlo pouzdana i pogodna metoda određivanja koncentracije radionuklida

Program ovog diplomskog rada obuhvata :

- Određivanje koncentracije aktivnosti radionuklida: ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{40}K i ^{137}Cs , iz snimljenih spektara uzoraka poljoprivrednog zemljišta, sa svih 50 lokacija.
- Procena maksimalne koncentracije aktivnosti radionuklida u biljnim kulturama (na osnovu međunarodnih podataka za transfer faktore radionuklida iz zemljišta u biljke) koje bi se uzgajale na datom poljoprivrednom zemljištu.
- Poređenje dobijenih rezultata sa merenjima izvršenim pre deset godina na istim lokacijama.

2. OSNOVNI POJMOVI

2.1 Radioaktivnost, zakon radioaktivnog raspada i karakteristične veličine

Radioaktivnost je spontani proces u kojem se atomsko jezgro, emitujući jednu ili više čestica ili kvanata elektromagnetskog zračenja, preobražava u drugo jezgro. Jedinica za radioaktivnost u SI sistemu je Bekerel (Bq). Jedan Bq je definisan kao jedna transformacija (ili raspad) u sekundi. Druga jedinica koja se još koristi je Curie i iznosi:

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ raspad/s}$$

Atomska jezgra sa nepovoljnim odnosom broja protona i broja neutrona su nestabilna i putem radioaktivnog raspada prelaze u stabilnije stanje. Nekada su i potomci nestabilni, i u tom slučaju će se i oni raspasti, prozvodeći radijaciju. Sledeći potomak koji nastane, isto može biti radioaktiv, a ovo može dovesti do nekoliko uzastopnih raspada. Na kraju je dobijen stabilan elemenat. Ovo se naziva lančani raspad.

Pojavu radioaktivnosti otkrio je Henri Bekerel (*Henri Becquerel*) 1896. godine proučavajući uranove soli. Desetak godina kasnije Radeford (*Rutherford*) i Sodi (*Soddy*) su objasnili radioaktivnost kao proces transmutacije nestabilnog u stabilan element emisijom radioaktivnog zračenja.

Zakon radioaktivnog raspada

Zakon radioaktivnog raspada je izведен na osnovu eksperimenata. Međutim, može se formulisati i matematički uz isvesne pretpostavke. Broj atoma neke supstance, iako je konačan, razmatra se kao kontinualna promenljiva. U sistemu sastavljenom od velikog broja atoma, nikad se ne zna koji će se od atoma raspasti tj. u vremenskom intervalu Δt svaki atom ima šansu da se raspade, pa je zbog toga radioaktivni raspad slučajan događaj. Na ovakve sisteme može se pripremiti račun verovatnoće. Prema računu verovatnoće, radioaktivni raspad ne zavisi od predistorije atoma, već od dužine intervala Δt u kojem se posmatranja vrše. [1]

Neka je sistem u početnom trenutku $t=0$ imao N_0 atoma. U nekom intervalu $\Delta t=t-t_0$, gde je $t_0=0$, svaki atom ima podjednaku verovatnoću da doživi radioaktivni raspad. Međutim, samo se jedan deo raspada, dok preostali neraspadnuti deo može da bude dat u sledećem obliku:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} = N_0 e^{-t/\tau}. \quad (1)$$

gde je $N(t)$ broj atoma koji nije pretrpeo radioaktivni raspad u vremenu t , N_0 je broj atoma u početnom trenutku vremena posmatranja, a λ je konstanta radioaktivnog raspada i karakteristična za svaki element, τ je srednji život atoma, odnosno jezgra. Dakle, zakon radioaktivnog raspada govori o tome koliki će broj atoma početnog radioizotopa ostati neraspadnut u izvoru, po isteku vremena t merenog od početnog trenutka posmatranja.

Karakteristične veličine

Za sve radioaktivne supstance karakteristične su sledeće veličine: [1]

- **Brzina radioaktivnog raspada – aktivnost A**

Aktivnost predstavlja apsolutni broj atoma koji se raspao u jedinici vremena:

$$A = -\frac{dN}{dt} = \lambda N \quad (2)$$

- **Konstanta raspada.**

Konstanta radioaktivnog raspada, λ , predstavlja verovatnoću da se neki atom raspadne u jedinici vremena. Određuje se iz zakona radioaktivnog raspada. Zavisi od vrste radioizotopa i ne zavisi od temperature, pritiska i hemijskog okruženja.

- **Period poluraspada.**

Period poluraspada, je vreme za koje se broj radioaktivnih atoma smanji na polovinu od svoje početne vrednosti N_0 . Period poluraspada je povezan sa konstantom raspada preko relacije:

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

Period poluraspada zavisi od vrste radioizotopa, ne zavisi od količine radioaktivnih atoma, od temperature, pritiska i hemijskog okruženja.

- **Srednji život.**

Srednji život, τ , predstavlja verovatno vreme života većine atoma. Veza sa konstantom raspada je sledeća:

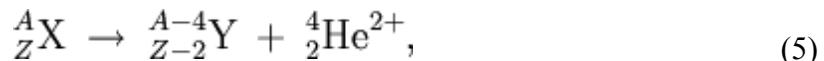
$$\tau = \frac{1}{\lambda}. \quad (4)$$

2.2 Vrste radioaktivnih raspada

Nestabilan predak (roditelj) X, sa atomskim rednim brojem Z, i masenim atomskim brojem A, prelazi u svoj potomak, Y, jednim od radioaktivnih raspada: [1]

- **Alfa raspad**

Alfa raspad je oblik radioaktivnog raspada u kojem se atomsko jezgro izbacivanjem alfa čestice (atomskog jezgra helijuma) preobraća u jezgro sa masenim brojem A, manjim za 4 jedinice i nanelektrisanjem Z, manjim za 2 jedinice:



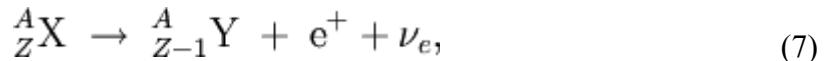
Kada prolazi kroz supstancialnu sredinu, alfa zračenje interaguje sa česticama sredine tako što ih uglavnom jonizuje i usled toga alfa čestice gube energiju. Koliki je domet alfa čestice (pređeni put od izvora sve do trenutka kada istroši svoju kinetičku energiju) zavisi od njene kinetičke energije i vrste sredine kroz koju prolazi. U vazduhu se zaustavljaju na putanji od nekoliko cm.

- **Beta plus raspad (β^+)**

Kada je u jezgru višak protona u odnosu na neutrone, proton se transformiše u neutron uz emisiju pozitrona, čestice iste mase kao elektron, ali suprotnog nanelektrisanja, koja se ovde zove β^+ čestica ili β^+ radioaktivno zračenje, i neutrina, ν (čestica bez nanelektrisanja i mase koja je manja od hiljaditog dela mase elektrona, dakle nulte mase, kao i antineutrino):



β^+ radioaktivnim raspadom od radioaktivnog pretka dobija se izotop elementa čiji je redni broj Z, za jedan manji, a istog masenog broja A, kao radioaktivni izotop:

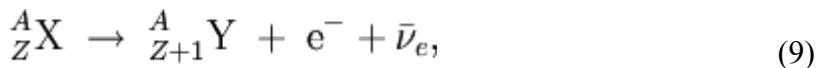


- **Beta minus raspad (β^-)**

Kada je u jezgru višak neutrona u odnosu na protone, neutron se transformiše u proton uz emisiju elektrona koji se naziva β^- - čestica ili β^- - radioaktivno zračenje i čestice antineutrina, $\bar{\nu}_e$ (čestica bez nanelektrisanja i nulte mase u mirovanju):



Od radioaktivnog pretka dobija se potomak, izotop elementa čiji je redni broj, Z , veći za jedan, a maseni broj, A , ostaje isti



- **K zahvat**

Kod ovog procesa jezgro zahvata jedan od svojih orbitalnih elektrona iz K ljeske, proton se transformiše u neutron, a stvara se neutrino. U K ljesci nastaje šupljina koja se popunjava elektronom sa nekog višeg nivoa i energija prelaza je emitovana u vidu karakterističnog fotona ili Augerovog elektrona.



Elektronskim zahvatom od radioaktivnog pretka se dobija izotop čiji je atomski redni broj za jedan manji, dok atomski maseni broj ostaje nepromenjen.

- **Gama raspad**

Ekscitovano, odnosno pobuđeno jezgro potomka nastalo β^+ ili β^- raspadom se deekscituje, tj. vraća u svoje osnovno stanje emisijom jednog ili više gama-fotona. Metastabilno jezgro X^* sa atomskim rednim i masenim brojem, Z i A , γ raspadom prelazi u osnovno stanje pri čemu nema promene A i Z .



Gama zračenje interaguje sa česticama sredine kroz koju prolazi na tri načina :

- **Fotoefektom**, pri čemu gama foton nestaje
- **Komptonovim efektom**, pri čemu foton gubi deo svoje energije i menja putanju usled ovakve interakcije

- **Stvaranjem elektron – pozitronskog para;** ovaj mehanizam moguć je u polju jezgra i foton mora posedovati minimalnu energiju (zbir energija mirovanja elektrona i pozitrona) 1,02 MeV. Nakon kreacije para, foton nestaje.

Iako je red energije gama čestica sličan alfa i beta česticama, fotoni nemaju električni naboj. Zato ih odlikuje ogromna prodornost kroz većinu materijala. Intenzitet gama čestice eksponencijalno opada dok putuje kroz neki materijal i vazduh.

$$I(d) = I_0 \cdot e^{-\mu d} \quad (12)$$

μ - je linearни koeficijent apsorpcije materijala koji karakteriše svaku sredinu kroz koju prolazi gama zračenje

d - širina materijala

I_0 – početni intenzitet (početna energija gama čestice)

- **Unutrašnja konverzija**

Uместо emitovanja gama fotona, pobuđeno jezgro može svoju energiju pobuđivanja i predati elektronu iz K ljeske, koji će biti izbačen sa kinetičkom energijom jednakoj razlici energije ekscitacije i energije vezivanja elektrona. Nastala šupljina u K ljesci se popunjava elektronima sa viših energijskih nivoa, uz emitovanje fotona ili Augerovog elektrona energije jednakе energiji prelaza.

2.3 Prirodna radioaktivnost

Pojava prirodne radioaktivnosti vezana je za proces sinteze jezgra. Prirodna radioaktivnost je spontana i ne može se ubrzati dodavanjem energije spolja. Prva jezgra formirana su pre nekoliko milijardi godina. Najveći broj nestabilnih jezgara koji je ušao u Zemljin sastav se do sada raspao. Do današnjih dana preživeli su neki dugoživeći izotopi sa periodom poluraspada većim od 500 miliona godina.

Radioaktivni elementi (radionuklidi) se nalaze svuda oko nas u vazduhu, vodi, zemljištu. Čine sastavne delove stena, mora i okeana, građevinskih materijala. U normalnim uslovima preko 70% ukupne godišnje doze koju prima stanovništvo potiče od prirodnih izvora jonuzujućeg zračenja. [6] Zbog toga je neophodno vršiti njihov monitoring i registrovati potencijalno povišene vrednosti njihove aktivnosti, koja bi moogla da ugrozi čovekovo zdravlje.

Radionuklide koji su osnovni izvor prirodne radioaktivnosti možemo podeliti u dve kategorije:

- **Kosmički radionuklidi**

Primarno kosmičko zračenje je galaktičkog i solarnog porekla, a sastoji se od nanelektrisanih čestica visoke energije. Veći deo ovih zraka čine protoni, a manji deo alfa čestice. Primarni sunčevi kosmički zraci nastaju prilikom eksplozija na Suncu, kada nastaju protoni i alfa čestice, koje potom putuju ka Zemlji.

Sekundarni kosmički zraci nastaju kao posledica sudara primarnih zraka sa jezgrima elemenata koji se nalaze u atmosferi. Prilikom tih sudara se najčeće oslobođaju protoni i neutroni, ali i druge čestice kao što su alfa i γ zraci. U γ spektrima najveći deo ovog zračenja ne proizvodi linije, već samo učestvuje u kontinuumu.

- **Primoradijalni (prvobitni) radionuklidi**

Većina radionuklida koji se nalaze na Zemlji se mogu grupisati u jedan od tri radioaktivna niza odnosno familije. To su uranijum-radijumski, uranijum-aktinijumska i torijumski niz. Pored ova tri, u laboratorijskim uslovima je stvoren i četvrti niz, neptunijumski. Prirodni radioaktivni nizovi nastaju raspadom tri radioizotopa ^{235}U , ^{238}U i ^{232}Th . Budući da im je period poluraspada jako dug, možemo ih još uvek naći u prirodi. Njihovi potomci su takođe nestabilni, pa se raspadaju, stvarajući nova nestabilna lakša jezgra, sve dok ne stignu do stabilnog izotopa gde se niz završava. Osnovni procesi transformacije jezgara su alfa i beta raspad. U Tabeli 1 su date osnovne karakteristike radioaktivnih nizova, dok su u Tabeli 2 predstavljene osobine primoradijalnih radionuklida koji su bitni za ovaj rad, odnosno čija se koncentracija aktivnosti merila u uzorcima zemljišta.

<i>Ime niza</i>	<i>Polazno jezgro</i>	<i>Period poluraspada [godina]</i>	<i>Krajnji član</i>
Torijumov	^{232}Th	$1.4 \cdot 10^{10}$	^{208}Pb
Uranijum-radijumov	^{238}U	$4.5 \cdot 10^9$	^{206}Pb
Uranijum-aktinijumov	^{235}U	$7.2 \cdot 10^8$	^{207}Pb
Neptunijumski	^{237}Np	$2.14 \cdot 10^6$	^{205}Tl

Tabela 1. Osnovne karakteristike radioaktivnih nizova

Uranijum-radijumov niz počinje sa radioizotopom ^{238}U i nakon 8 α raspada, 6 β raspada i tri granjanja, dolazi do stabilnog ^{206}Pb . ^{238}U je alfa emiter i zastupljenost u prirodnom uranu mu je 99,274%. Budući da ne dolazi do emisije intezivnog gama zračenja nakon njegovog raspada, ovaj niz se putem gama spektrometrije identificuje preko intezivnih gama linija drugih članova niza.

Uranijum-aktinijumov niz počinje izotopom ^{235}U i nakon 7α i 4β raspada uz tri granjanja se završava stabilnim izotopom olova ^{207}Pb . U prirodnom uraniju, zastupljenost ^{235}U je 0,7204%, a za razliku od predhodnog niza, ovaj se može prepoznati na osnovu dve gama linije karakteristične za raspad prvog člana. Detektovane linije gama zračenja su na energijama od 143,78keV i 185,72keV.

Torijumov niz počinje izotopom ^{232}Th i nakon 6α i 4β se uz dva granjanja završava stabilnim izotopom olova ^{208}Pb . S obzirom da je alfa raspad ovog radionuklida praćen emisijom gama zračenja od samo 59,0 keV, postojanje ovog niza u gama spektrometrijskim merenjima se može ustanoviti na osnovu zračenja koje emituju neki drugi članovi niza.

Pored njih, u prirodi možemo pronaći nekoliko nestabilnih radionuklida koji ne pripadaju jednom od radioaktivnih nizova. Radi se o izotopima koji takođe imaju dug period poluraspada, a među njima najznačajniji je ^{40}K , čije su karakteristike takođe date u Tabeli 2. Kalijum je najrasprostranjeniji element u životnoj sredini i ulazi u sastav svih organizama. Doprinos ^{40}K u ukupnoj aktivnosti prirodnih radioaktivnih materija za većinu bioloških sistema je preko 90%. Budući da se u tolikoj meri nalazi u zemljinoj kori, prilikom gama spektrometrijskih merenja, neizbežno se pojavljuje i kalijumova gama linija od 1,46MeV.

<i>Radionuklid</i>	<i>Simbol</i>	<i>$T_{1/2} [\text{godina}]$</i>	<i>Prirodna aktivnost</i>
Uranijum 238	^{238}U	$4.47 \cdot 10^9$	0.5 do 4.7 ppm urana u stenama
Torijum 232	^{232}Th	$1.41 \cdot 10^{10}$	1.6 do 20 ppm u stenama
Radijum 226	^{226}Ra	$1.60 \cdot 10^3$	16Bq/kg u krečnjaku i 48 Bq/kg u vulkanskim stenama
Kalijum 40	^{40}K	$1.28 \cdot 10^9$	0.037 do 1.1 Bq/kg u zemljишtu

Tabela 2. Osnovne karakteristike primoradijalnih radionuklida

Treba istaći da je po zdrastvenim efektima najopasniji ^{238}U (1g ^{238}U u ravnoteži sa produktima raspada emituje u jednoj sekundi $9.84 \cdot 10^4$ α čestice, koje kada prođu u tkivo tokom desetobilionitog dela sekunde izazivaju ionizaciju atoma, a zatim formiranjem slobodnih radikala prouzrokuju promene u molekulima važnim za funkciju ćelije). [12] ^{226}Ra je takođe dugoživeći α emiter, koji se ugrađuje u kosti i deponovan tamo dugo ozračuje koštano tkivo i izaziva sarkom kostiju.

2.4 Veštačka radioaktivnost

Veštačka ili indukovana radioaktivnost podrazumeva ubacivanje nekih čestica (neutrona, protona, deutrona, α -čestica, γ -zraka) u jezgro atoma, pri čemu nastaju nova jezgra koja imaju sva radioaktivna svojstva. Proces proizvodnje veštačkih radioaktivnih jezgara jeste nuklearna reakcija. Prvu nuklearnu reakciju uzrokovao je Ernest Raderford (*Ernest Rutherford*) 1919. godine, i tada je otkrio da se bombardovanjem azota α -česticama dobijaju kiseonik i proton. [1]

Veštački izvori zračenja imaju široku primenu. Koriste se kao izvori energije u nuklearnim elektranama, u industriji za kontrolu kvaliteta materijala, u prehrani za sterilizaciju hrane, u širokom spektru medicinskih zahvata, od sterilizacije pribora pa do uništavanja tumorskog tkiva. Upotreba ovih veštačkih izvora zračenja znatno povećava doze zračenja koje prima pojedinac.

Najbrojnija grupa ovih veštački stvorenih radioizotopa su fisioni produkti ili fragmenti, koji nastaju nakon cepanja teških jezgara, najčešće uranijuma ili torijuma. Fisioni procesi su osnovni izvor energije, kako nuklearnog oružja, tako i procesa koji se odvijaju u nuklearnim elektranama. Drugim rečima, najveću količinu ovih fragmenata dobijamo nakon testiranja nuklearnog oružja ili ukoliko dođe do havarije na elektranama. Budući da je period poluraspada za ove radionuklide kratak, predstavljaju realnu i veliku opasnost po ljudsku populaciju neposredno nakon probe nuklearnog oružja ili havarije. Zabranom testiranja nuklearnog oružja iznad površine zemlje, zabeležen je pad tako nastalih radionuklida. [2]

Ovi radionuklidi se na različite načine mogu transportovati na velike distance nakon što se konačno natalože, tako da se mogu naći svuda u životnoj sredini. U ekosistemu Vojvodine, najznačajniji veštački radionuklid je ^{137}Cs , koji je tu dospeo nakon havarije nuklearne elektrane u Černobilu. Budući da mu je period poluraspada 30.17 godina, očekuje se da će se još dugo detektovati u zemljишtu. Predstavlja fisioni fragment, a njegovo štetno dejstvo se ogleda u emisiji γ i β zraka. On se hemijski ponaša kao kalijum i natrijum, a apsorpcija u krvi je potpuna, tako da je on biološki, potencijalno vrlo opasan. Cezijum emituje samo jednu grupu fotona energije 661,5keV, tako da se aktivnost može ustanoviti na osnovu ove gama linije.

3. DETEKTORI

Pod pojmom detektor zračenja se podrazumeva više ili manje kompleksan uređaj koji vrši detekciju jonizujućeg ili neutronskog zračenja, kao i merenje bilo koje od bitnih osobina zračenja. Najjednostavniji detektori daju informaciju o prisustvu ili odsustvu zračenja, dok složeniji mere i njihove glavne karakteristike. Neke od veličina kojima se kvalitativno i kvantitativno opisuje zračenje su intenzitet zračenja, tip zračenja, energija u slučaju fotonskog zračenja i kod čestičnog: masa, nanelektrisanje, srednji život, spin, magnetni moment, energija i brzina. U opštem slučaju postoji mnogo različitih detektora, pa iako nijedan detektor ne može ispuniti sve zahteve. Postoje multifunkcionalni detektori koji mogu odrediti dve ili više karakteristika odjednom.

U užem smislu bi se detektor mogao smatrati uređajem u kojem dolazi do interakcije čestice zračenja sa materijom, a kao rezultat te interakcije se dobija neki signal ili slika, čijim se daljim obrađivanjem dobija informacija o nekoj osobini samog zračenja ili tela koje emituje to zračenje.

3.1. Osnovne karakteristike detektora

1. Efikasnost detektora

Efikasnost detektora predstavlja verovatnoću da će nuklearna čestica prolaskom kroz detektor biti detekovana, odnosno to je broj registrovanih događaja u odnosu na ukupan broj događaja. Kod detekcije zračenja razmatramo dve vrste efikasnosti: absolutnu efikasnost i sopstvenu efikasnost detektora. **Apsolutna ili totalna efikasnost** se definiše kao broj registrovanih događaja u odnosu na ukupan broj događaja

$$\varepsilon_{tot} = \frac{N_R}{N_U} \quad (13)$$

i ona je funkcija geometrije detektora i verovatnoće interakcije unutar detektora.

Često se absolutna efikasnost razlaže na dva dela: **sopstvenu efikasnost** ε_{int} i **geometrijsku efikasnost** ε_{geom} . Totalna tj. absolutna efikasnost je onda data proizvodom

$$\varepsilon_{tot} = \varepsilon_{int} \varepsilon_{geom} . \quad (14)$$

Sopstvena efikasnost predstavlja odnos registrovanih događaja sa brojem događaja koji su realno pogodili detektor

$$\epsilon_{\text{int}} = \frac{\text{registrovani dogadaji}}{\text{događaji koji pogadaju detektor}} \quad (15)$$

Ovde verovatnoća zavisi od preseka interakcije između upadnog zračenja i detektorskog medijuma. Sopstvena efikasnost je onda funkcija tipa zračenja, energije zračenja i detektorskog materijala. Geometrijska efikasnost pokazuje koji deo prostornog ugla zračenja je obuhvaćen detektorom. Ona u potpunosti zavisi od geometrijske konfiguracije izvora i detektora, ali je neophodno uzeti u obzir i ugaonu raspodelu zračenja. [1]

2. Osetljivost detektora

Osetljivost detektora se ogleda kao sposobnost detektora da detektuje male intenzitete zračenja. Detektori su dizajnirani da budu osetljivi na određenu vrstu zračenja u određenom energetskom području. Detektorska osetljivost zavisi od više faktora :

- efikasnog preseka za jonizujuće zračenje unutar detektora
- mase detektora
- inherentnog detektorskog šuma
- zaštitnog materijala koji okružuje osetljivu zapreminu detektora

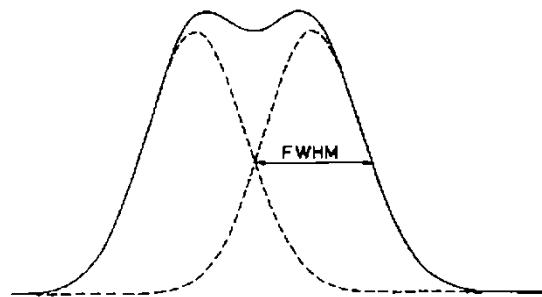
Efikasni presek i masa detektora određuju verovatnoću da upadno zračenje pretvori deo ili celinu svoje energije u ionizujuće zračenje unutar detektora. Ionizujući signal mora biti jači od određenog minimuma da bi bio od koristi, a taj minimum zavisi od šuma detektora i propratne elektronike. Debljina zaštitnog materijala oko osetljive zapremine detektora takođe postavlja donju granicu za energiju koja može da se detektuje. [1]

3. Energetska rezolucija detektora

Energetska rezolucija detektora predstavlja njegovu sposobnost da razlikuje dve čestice bliskih energija. Idealno svaka energija bi bila predstavljena jednim pikom delta funkcije, ali u realnom slučaju svaki pik ima oblik Gausove raspodele sa konačnom širinom. Rezolucija se uglavnom daje u odnosu na poluširinu maksimuma i dve energije koje upadaju u ovaj interval se smatraju nerazloživim. Označavajući ovu širinu kao ΔE , formula za relativnu rezoluciju na energiji E je

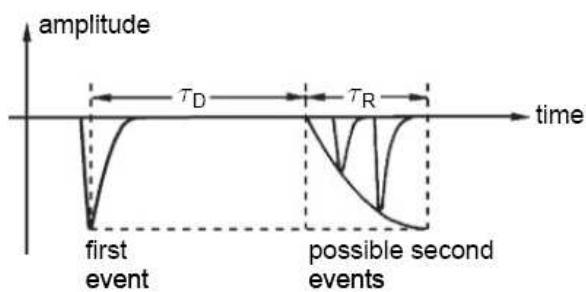
$$R = \frac{\Delta E}{E} \quad (16)$$

Rezolucija se uglavnom izražava u procentima i germanijumski detektor ima rezoluciju reda 0.1%.



Slika 1. Definisanje energetske rezolucije

4. Vremenska rezolucija i mrtvo vreme



Vremenska rezolucija predstavlja sposobnost detektora da registruje dve vremenski uzastopne čestice (tj. dve čestice koje će uzastopno ostvariti interakciju sa materijalom detektora). Proticanje izvesnog vremena pre nego što je detektor u stanju da nakon detekcije jedne čestice detektuje sledeću česticu je neizbežno.

Slika 2. Prikaz T_D i T_R

To vreme za koje detektor nije u stanju da detektuje čestice je mrtvo vreme (T_D). Teži se ka što manjem mrtvom vremenu. Nakon mrtvog vremena detektor određeni vremenski period može da detektuje događaje samo sa smanjenom efikasnošću. Ovo vreme je vreme oporavka (recovery time T_R), i tek nakon njegovog isticanja detektor može da radi sa normalnom osetljivosti.

Mrtvo vreme je vreme koje je potrebno detektoru da obradi neki događaj i uglavnom je povezano sa dužinom trajanja strujnog signala. U zavisnosti od tipa, detektori mogu biti osetljivi ili neosetljivi za druge događaje unutar ovog intervala. U slučaju neosetljivog detektora svaki drugi događaj koji upadne u ovaj interval se izgubi, dok je kod osetljivog moguće gomilanje signala što ga izobličuje i na kraju je moguć gubitak informacije o oba događaja.[1]

3.2. Poluprovodnički detektori

Postoji veliki broj načina na koji možemo da izvršimo podelu detektora. Jedna od kategorija obuhvata poluprovodničke detektore, koji su jedna od osnovnih grupa detektora u nuklearnoj fizici. Najviše su u upotrebi u γ -spektrometriji, gde se koriste već dugi niz godina, a u novije vreme pronalaze primenu i u fizici elementarnih čestica. Merenje uzoraka za ovaj rad je izvršeno na 4 različita detektor, ali svi su bili poluprovodnički germanijumski detektori i stoga je u daljem tekstu dat njihov detaljan opis kao i princip rada.

Poluprovodnički detektori su u suštini ionizacione komore sa čvrstim telima kao sredinom brojanja. Zbog njihove velike gustine u odnosu na gasne detektore, oni mogu da apsorbuju čestice sa višim energijama. Princip rada poluprovodničkih detektora zasniva se na postojanju tzv. zonske strukture (valentna i provodna zona) elektronskih energetskih nivoa. Vrši se pobuđivanje elektrona iz valentne u provodnu zonu materijala detektora kao posledice interakcije upadne čestice sa detektorom. Novonastalo prazno mesto u valentnoj zoni-šupljina, ponaša se kao pozitivno nanelektrisanje. U principu, poluprovodnički detektori možemo zamisliti kao ionizacione komore u čvrstom stanju, gde se parovi elektron-šupljina ponašaju kao parovi elektron-jon u gasnoj komori. Detektor se proizvodi u obliku diode, tj. predstavlja p-n spoj (akceptorski i donorski poluprovodnik respektivno). Poluprovodnički kristal (dioda) je usendvičen između dve veoma tankе elektrode. Napon se na p-n dovodi tako da imamo inverzno polarisanu diodu, čime povećavamo potencijalnu barijeru, odnosno električno polje u njoj, usled čega imamo veću detekcionu oblast. Pod dejstvom električnog polja dolazi do nagomilavanja elektrona i šupljina na elektrodama generisanim upadnom česticom što daje signal proporcionalan gubitku energije upadne čestice. Bitna karakteristika je da je ovaj signal linearan, tj. proporcionalan je ionizacionom gubitku.

Prednost poluprovodničkih detektora je pre svega što se proizvodi veći broj nosilaca nanelektrisanja nego kod gasnih detektora, što imaju brz odgovor (oba nanelektrisanja utiču na formiranje detektovanog signala) i što mogu biti izuzetno malih dimenzija. Odlikuje ih velika energetska rezolucija, dobra linearost kao i relativno brzo vreme odziva. Dodatna pogodnost je što se mogu proizvoditi u malim dimenzijama ili kao prenosivi detektori. Glavna karakteristika ovih detektora zbog kojih je njihova primena u velikoj meri, je mogućnost detekcije čestica veoma male energije. Mogućnost detekcije čestica veoma male energije je posledica toga što za proizvodnju ovih detektora koristimo poluprovodničke materijale. Njih karakteriše širina zabranjene zone od oko 1eV, odakle sledi da je za stvaranje para elektron-šupljina dovoljna energija 3-4eV. Kao poluprovodnički materijali se najčešće upotrebljavaju germanijum (Ge) i silicijum (Si). Posledica ovih karakteristika je da se dobri signali dobijaju čak i sa detektorima sačinjenim od veoma tankih pločica Si-kristala, 200-300 μm debljine. [1]

3.2.1 Germanijumski detektor

Za germanijumske detektore se koristi termin HPGe – high-purity germanium (germanijum visoke čistoće) da bi se naglasilo da nisu dopirani (kao što su ranije bili sa litijumom). Germanijumski detektor spada u poluprovodničke detektore, a njegova širina zabranjene zone Ge kristala iznosi 0,72 eV. Problem prvih detektora ovog tipa je bila veličina i nečistoće koje su ometale precizna merenja prilikom prikupljanja elektrona i šupljina. Danas je, međutim, ovaj problem rešen novim metodama proizvodnje i rasta kristala Ge.

Karakteriše ga: velika moć razlaganja i dobra efikasnost. Prednost ove vrste detektora je odlična energetska rezolucija i linearnost. Ove karakteristike ih čine idealnim detektorima za γ -spektrometriju.

Glavni nedostatak ovih detektora jeste potreba za niskim operativnim temperaturama, što zahteva poseban sistem za hlađenje, najčešće tečnim azotom. Potrebna je radna temperatura od oko 77 K što dalje zahteva dugo vreme hlađenja pre početka rada, kao i konstantno održavanje niske temperature za vreme rada detektora. Ovo je potrebno da bi se sprečilo termalno pobuđivanje elektrona iz valentne zone, koji bi onda imali dovoljno energije da preskoče zabranjenu zonu. Hlađenje, dakle omogućava da svi detektovani, pobuđeni elektroni potiču upravo od gama zraka koje merimo. Kad nisu u upotrebi HPGe detektori se mogu držati na sobnim temperaturama.

Jedna od mogućih podela na osnovne tipove HPGe detektora je podela po oblasti primenjivosti. U zavisnosti od načina primene detektora zanimljive su nam određene oblasti energija. Ako koristimo širok interval energija, na primer od < 5 keV do nekoliko MeV, onda ćemo sigurno koristiti koaksijalni detektor. Ako posmatramo samo niske energije, odnosno energije X – zraka koji se javljaju u prirodi i zraci koji su nastali fluorescencijom, onda ćemo pre koristiti detektor X – zraka. Ako opseg posmatranih energija pored nisko energetskih X – zraka obuhvata i energije do nekoliko stotina keV, onda ćemo koristiti polu-planarni detektor [14].

- ***Koaksijalni germanijumski detektor***

Koaksijalni detektori su najpopularniji tip i oni imaju najširi energetski opseg. Mogu da registruju i broje γ – zrake od nešto ispod 5 keV pa do nekoliko MeV. Oblik im je uglavnom kružnog cilindra. Jedna od njihovih specifičnih prednosti je što mogu da procesiraju fotone od jednog do drugog kraja cilindra i preko cele bočne strane cilindra. Pošto oni mogu biti i dimenzija 8cm x 8cm ovo rezultuje velikom korisnom površinom pa je verovatnoća za interakciju za dati uzorak dosta visoka. Rezolucija ne varira puno sa veličinom kristala pa je izbor veličine povezan sa očekivanom aktivnošću uzorka i cenom.

- ***Poluplanarni germanijumski detektori***

Ovi detektori se koriste u području od ispod 5 keV do nekoliko stotina keV. Energijska rezolucija ovih detektora je mnogo veća od koaksijalnih do nekoliko stotina keV, iznad kojih energijska rezolucija opada i pikovi gube simetriju. Poluplanarni Ge detektori su cilindrični kristali čija je širina veća od njihove dužine i uglavnom samo jednom površinom detektuju fotone.

- ***Detektori x zraka***

Ovi kristali mogu biti od 10 mm^2 površine pa do 100 mm^2 . Dizajnirani su za energije od manje od 500 eV do više od 60 keV iako se najveći mogu koristiti i za preko 100 keV. Iako su ovi detektori mali, oni imaju najbolju energetsku rezoluciju od svih detektora u čvrstom stanju, što se postiže velikim aktivnim područjem kombinovanim sa visokom gustinom germanijuma. Kod ovih detektora sastav materijala ulaznog prozora određuje donju granicu energija koje možemo posmatrati. Ovi detektori se mogu koristiti u analizi materijala, analizi površina i kod X -teleskopa.

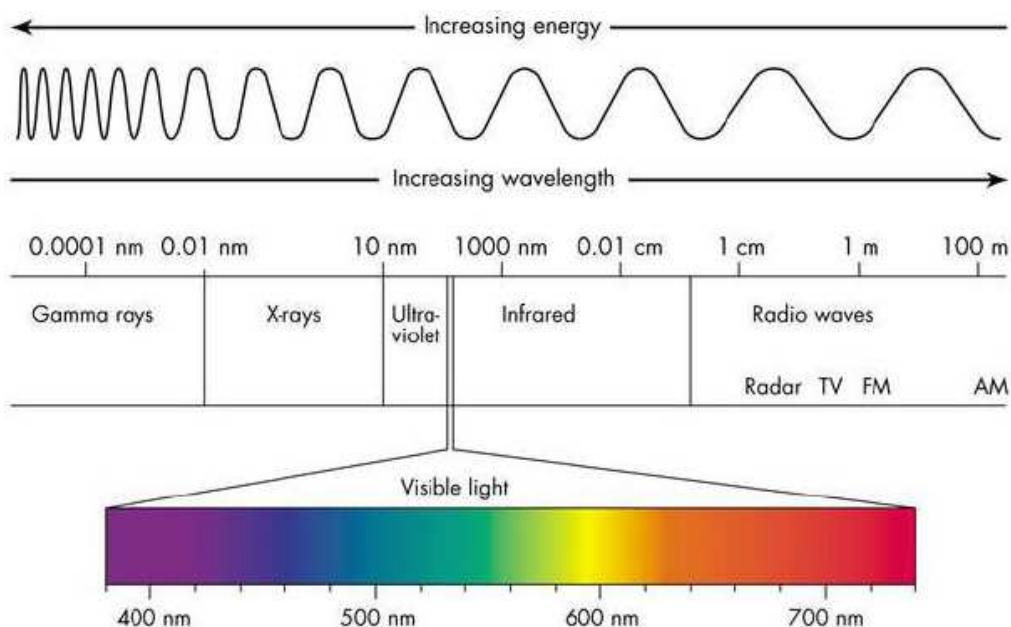
3.2.2 Primena germanijumskih detektora u γ spektrometriji

Germanijumski detektori imaju jako dobru sposobnost da identifikuju i klasifikuju radionuklide koji emituju γ -zračenje. HPGe detektori kombinuju osjetljivost (sposobnost velike zapremine detektora da detektuje slab signal) i selektivnost (imaju uglavnom visoku energijsku rezoluciju za razlaganje signala) zbog čega se primenjuju u mnogim oblastima γ -spektrometrije. Za ovaj rad je izuzetno važna primena γ spetrometrije za kontrolu radioaktivnog zagadenja životne sredine, konkretno kontaminacije zemljišta.

4. GAMA SPEKTROMETRIJA

4.1. Gama zraci i njihova interakcija sa materijom

Gama zraci su visoko-energetski elektromagneti talasi koji nastaju deekscitacijom pobuđenih stanja u jezgrima atoma. [2] Odlikuje ih najmanja talasna dužina u elektromagnetnom spektru i stoga predstavljaju najprodornije fotone. Gama čestice je otkrio 1900. godine francuski fizičar Pol Urlih Vilar prilikom posmatranja uranijuma. Mesto koje zauzimaju na energetskoj elektromagnetnoj skali je predstavljeno na Slici 3.



Slika 3: Spektar elektromagneti zraka

Gama fotoni sa supstancijom, tj. sa atomima koji čine datu supstanciju mogu interagovati na različite načine, od kojih su najbitniji Fotoelektrični efekat, Komptonovo rasejanje i stvaranje para elektron-pozitron, koji su u narednom tekstu objašnjeni. Ovi osnovni mehanizmi interakcije visokoenegetskog elektromagnetcnog zračenja sa materijom su od ključnog značaja za detekciju zračenja i γ spektrometriju. Svi ovi procesi stvaraju slobodne elektrone koji u supstanciji stvaraju parove ion-elektron ili elektron-šupljina, koji nam služe za detekciju fotona ili određivanje energije fotona. Koji od ova tri efekta će se dogoditi zavisi od energije koju nosi foton, kao i od atomskog broja atoma sredine.

- **Fotoelektrični efekat**

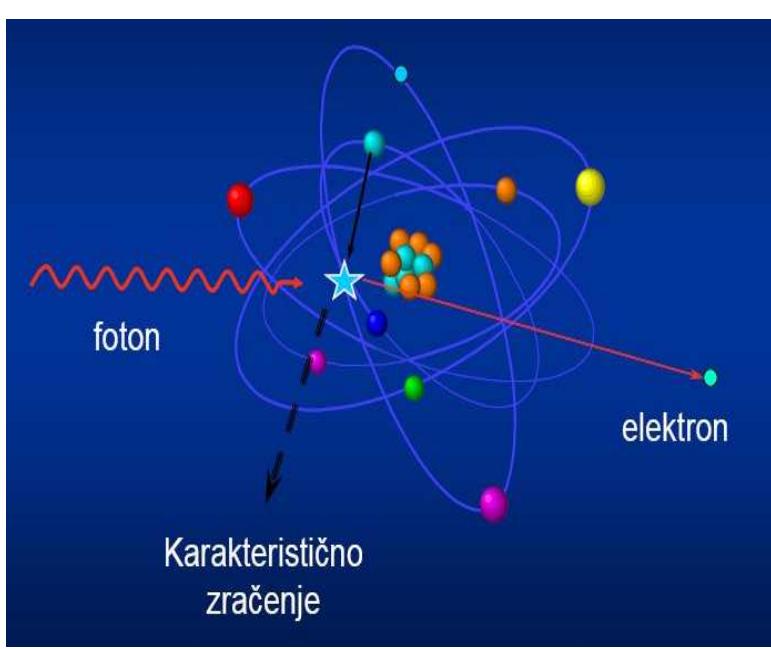
Fotoelektrični efekat predstavlja apsorpciju fotona od strane atomskog elektrona nakon čega elektron napušta atom. Energija izbačenog elektrona je

$$E = h\nu - E_v \quad (17)$$

gde je E_v energija veze elektrona u atomu. Presek za fotoefekat se ne može izraziti preko jedinstvenog analitičkog izraza, njegova zavisnost od atomskog broja materijala Z i energije fotona $E_\gamma = h\nu$ se može izraziti kao

$$\sigma_{p.e} = \text{const} \cdot Z^{4.5} \cdot E_\gamma^{-3} \quad (18)$$

Jaka zavisnost od Z pokazuje da su materijali velikog rednog broja vrlo efikasni što se tiče apsorpcije fotona. Sa druge strane jaka zavisnost preseka od energije fotona je razlog zbog koga je ovaj efekat dominantan način interakcije na niskim energijama, a postaje zanemarljiv na visokim energijama. Na slici 4 je šematski prikaz Fotoelektrični efekat. [2]

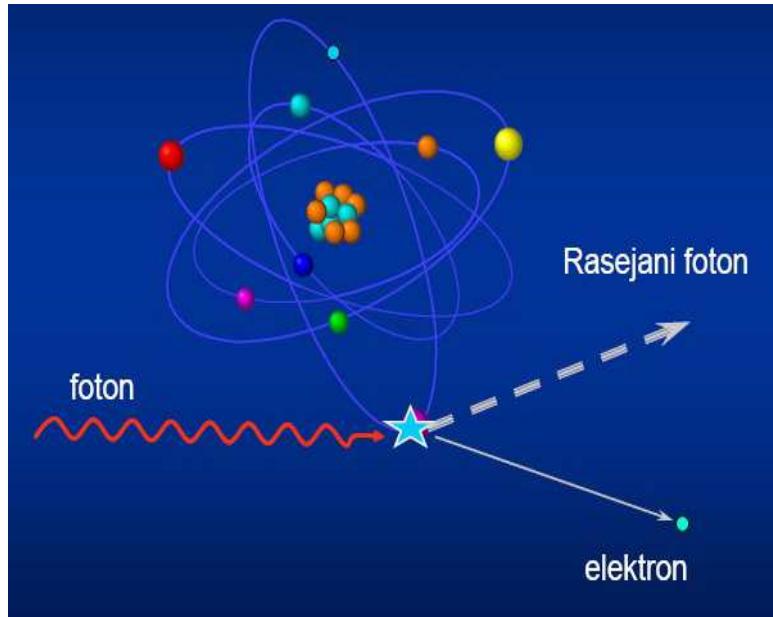


Elektron koji je napustio elektronski omotač, ostavio je prazno mesto na nekoj od lusaka, usled čega dolazi do deekscitacije nekog od elektrona sa viših nivoa, pri čemu se emituje foton ili više fotona, energije koja odgovara energiji X-zraka, ili dolazi do emisije Ožeovih elektrona. Ukoliko se proces odvija u kompaknoj materiji, verovatno će energija oslobođenog elektrona biti u potpunosti apsorbovana pre izlaska iz materije. Isto će se dogoditi i sa emitovanim X-zracima, odakle sledi da će se u većini slučajeva celokupna energija predati okolnoj materiji.

Slika 4. Šematski prikaz Fotoelektričnog efekta

- **Komptonovo rasejanje**

Komptonovo rasejanje je pojava rasejanja fotona na slobodnom elektronu ili na vezanom elektronu čija je energija veze mnogo manja od energije upadnog fotona. Foton prenosi deo svoje energije na elektron dok se ostatak javlja u vidu sekundarnog fotona, što je šematski predstavljeno na Slici 5.



Primenom zakona održanja energije i impulsa dobijamo relacije za energiju rasejanog fotona $h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \gamma(1 - \cos \theta)}$, kao i vezu između uglova φ i θ $\cot \varphi = (1 + \gamma) \tan \frac{\theta}{2}$, gde je θ ugao između pravca kretanja upadnog i rasejanog fotona, $\gamma = h\nu/m_e c^2$, dok je φ ugao između pravca kretanja upadnog fotona i elektrona nakon rasejanja.[1]

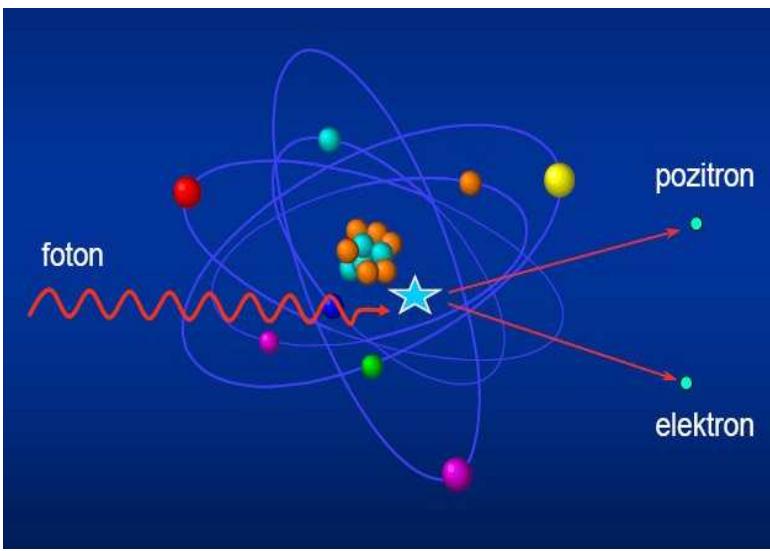
Slika 5. Šematski prikaz Komptonovog rasejanja

Formula za diferencijalni efikasni presek Komptonovog rasejanja je jedna od prvih koja je dobijena kvantnom elektrodinamikom i poznata je kao Klein-Nishina formula [2],

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{r_e^2}{2} \frac{1}{[1 + \gamma(1 - \cos \theta)]^2} \left(1 + \cos^2 \theta + \frac{\gamma^2 (1 - \cos \theta)^2}{1 + \gamma(1 - \cos \theta)} \right) \quad (19)$$

gde je r_e klasični radijus elektrona.

- *Stvaranje parova*



Stvaranje para elektron-pozitron (e^-e^+) je efekat koji može da se odigra jedino u prisustvu masivnog jezgra, kada foton koji proizvodi par ima minimum energije od $2m_0c^2 = 1022 \text{ keV}$, što je energija mirovanja 2 elektrona (energije mirovanja elektrona i pozitrona su jednake). Zapravo do stvaranja para dolazi u Kulonovom polju jezgra kada imamo foton dovoljno velike energije.

Slika 6. Šematski prikaz stvaranja para elektron-pozitron

Novonastali par, ostatak energije fotona ($E_\gamma - 2m_0c^2$) odnosi u vidu kinetičke energije podeljene na ove dve čestice. Elektron i pozitron se usporavaju u okolnom materijalu. Pozitron će gubiti energiju u materijalu, i kad izgubi svu svoju kinetičku energiju doćiće do anihilacije pozitrona sa nekim elektronom pri čemu će nastati par fotona energije 511keV, koji će se razleteti pod uglom od 180° zbog zakona održanja impulsa. Ovi fotoni će dalje interagovati sa materijom Komptonovim efektom, i na kraju će doći do fotoelektrične apsorpcije, tj. celokupna kinetička energija pozitrona biće apsorbovana u materiji. Elektron će vršiti ionizaciju materije, i tako gubiti energiju. Približno se može reći da je presek za stvaranje para $\sigma \approx Z^2$. [2]

- *Atenuacija fotona*

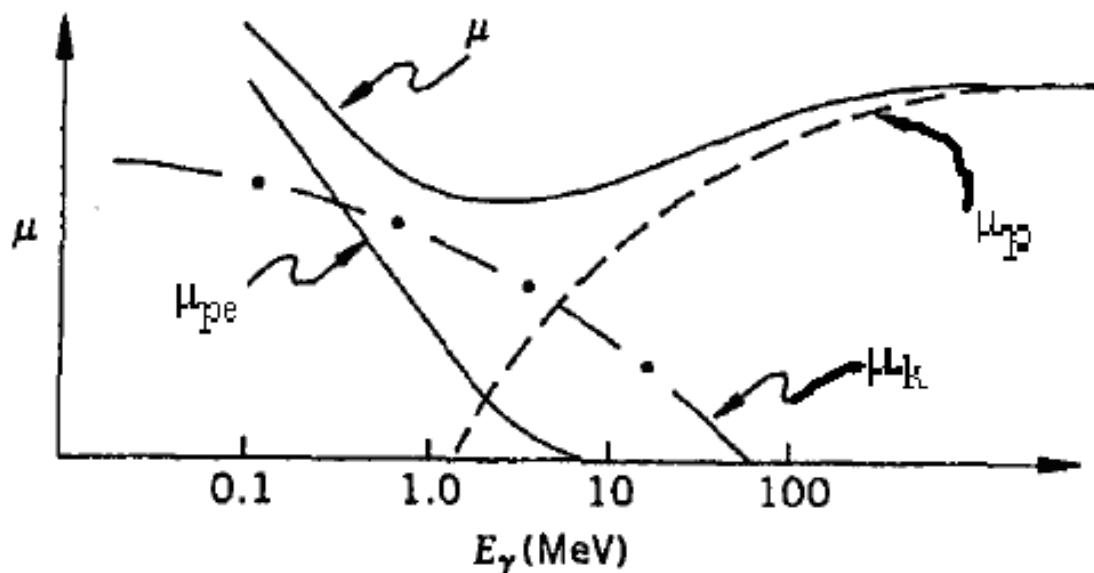
Atenuacija fotona u materiji može se opisati pomoću linearog atenuacionog koeficijenta μ , koji predstavlja karakteristiku same materije. Ako posmatramo snop fotona intenziteta I_0 koji pada na neki materijal debljine d , nakon prolaska fotona kroz sloj materije dx intenzitet snopa fotona smanjiće se za dI , što možemo predstaviti kao

$$I = I_0 e^{-\mu d} \quad (20)$$

gde je I_0 upadni intenzitet, d debljina materijala, I intenzitet fotona nakon prolaska kroz materijal debljine d , a μ linearni atenuacioni koeficijent materijala. [1]

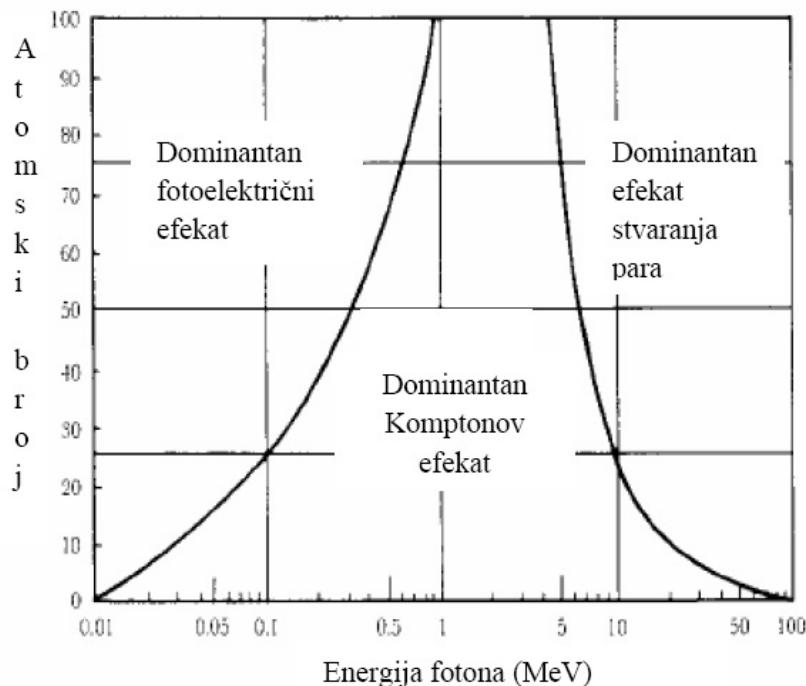
Svi ranije navedeni efekti utiču na smanjenje intenziteta, i njihov kompletan uticaj na intenzitet upadnih fotona prikazan je ovim zakonom. Ukupni linearni atenuacioni koeficijent može se prikazati kao zbir linearnih atenuacionih koeficijenata za fotoefekat, Komptonov efekat i stvaranje para

$$\mu = \mu_{pe} + \mu_k + \mu_p \quad (21)$$



Slika 7. : Zavisnost atenuacionih koeficijenata od energije, gde je μ_{pe} koeficijent fotoefekta, μ_k koeficijent koji se odnosi na Komptonov efekat a μ_p koeficijent koji karakteriše stvaranje para

Slika 8 pokazuje koji od tri glavna procesa kod interakcije fotona sa materijom dominira u kojoj oblasti. Leva kriva pokazuje oblast gde su atomski koeficijent za fotoefekat i Komptonovo rasejanje jednaki, a desna oblast u kojoj su atomski Komptonov koeficijent i atomski koeficijent stvaranje para jednaki (ovi atomski koeficijenti se odnose na atomske koeficijente atenuacije za svaki efekat posebno).



Slika 8. Regije dominantnosti jednog od tri glavna procesa interakcije materije i sredine

4.2. Specifičnosti γ spektrometrije prirodnih uzoraka

Radionuklidi u prirodi se raspadaju α ili β raspadom, koje najčešće prati i emisija γ zračenata. Identifikacija radionuklida je principijalno moguća merenjem spektra α ili γ zračenja, koja imaju diskretne energije i karakterističan spektralni sastav za svaki radionuklid. Domet α zračenja u materiji je veoma mali, što omogućuje vrlo efikasnu zaštitu detektora od zračenja okoline (te postizanje niskih pragova detekcije), ali sa druge strane onemogućuje pouzdano merenje energije inteziteta α zračenja bez složenih (i zato malo pouzdanih) fizičko-hemijskih postupaka u izradi vrlo tankih izvora u kojima će degradacija energije inteziteta α zračenja biti zanemarljiva ili pouzdano poznata. Budući da sem nekoliko retkih čistih β emitera svi radionuklidi emituju γ zračenje, važnost γ spektrometrije u multiizotopnoj analizi prirodnih radionuklida, je velika.

Merenje energije i inteziteta γ zračenja se bazira na principima interakcije ovog zračenja sa materijom, a priroda ove interakcije je opisana u predhodnom odeljku. Kada se fotoefekat desi u osjetljivoj zapremini detektora, kompletna energija γ zračenja se predaje elektronima detektora u kojem se stvara električni signal, čija je visina proporcionalna energiji γ kvanta.

Komptonovskim rasejanjem u detektoru se takođe stvara kontinualna raspodela visine električnih signala.

U energetskom intervalu 30-2700keV, koji je od interesa za merenje prirodne radioaktivnosti moguće je i stvaranje para od strane γ kvanta. Pri ovom procesu se energija γ zračenja transformiše u energiju elektron-pozitronskog para koji svoju kinetičku energiju gubi u detektoru. Anihilacijom pozitrona u detektoru nastaju dva γ kvanta od 511keV, koji se emituju pod uglom od 180° .

Maksimalan signal se dobija kada u fotoelektričnoj interakciji foton preda kompletну svoju energiju jednom od elektrona. Veći broj ovakvih događaja bi trebao da se u energetskom smislu pokaže kao oštra linija, no zbog statističke prirode nastanka fotona čija se detekcija vrši, kao i stvaranja nanelektrisanih čestica, konačno se dobija karakterističan oblik Gausove krive. To se u spektrometriji naziva linija foto-vrha ili linija (pik) totalne apsorpcije. Pod intezitetom spektralne linije se podrazumeva broj kvanata date energije koji se registruje u jedinici vremena, a meri se površinom ispod pika totalne apsorpcije. Na osnovu izloženog se može zaključiti da informaciju o energiji γ zračenja nosi položaj vrha totalne apsorpcije, dok intezitetu zračenja odnosno jačini izvora iz kojeg se emituje zračenje odgovara površina vrha totalne apsorpcije.

γ spektri teških prirodnih elemenata-radioaktivnih nizova su veoma složeni. Tome doprinosi veliki broj mogućih γ prelaza u jezgrima velikog broja članova 3 radioaktivna niza. Ova osobenost nameće da je jedan od osnovnih zahteva u γ spektrometriji uzorka postojanje detektora visoke rezolucije. Pored toga, neophodno je da je u pitanju detektor velike efikasnosti, a to znači i velike osetljivosti zapremine.

Budući da su radioaktivnosti prirodnih uzoraka niske, njihove vrednosti ne bi mogle da se registruju ukoliko se ne obezbedi uslovi niskošumskog merenja. Pod fonom ili pozadinskim zračenjem se podrazumeva svako zračenje koje ne potiče od merenog uzorka. Njega uglavnom sačinjava kosmičko zračenje i zračenje prirodnih radionuklida koji se u izvesnoj meri nalaze u okolnim telima, uračunavajući materijale koji okružuju detektor, pa i sam detektor.

Radi postizanja što nižeg praga detekcije slabe prirodne radioaktivnosti, potrebno je optimizirati sve parametre merenja. Stoga se merenje vrši vremenski maksimalno dugo (u nekom racionalnom smislu) i koriste se uzorci velikih dimenzija. Uzorci se stavljuju u nosače određenog oblika (najčešće cilindričnog) i postavljaju neposredno uz površinu detektora.

γ spektrometrija je vrlo pouzdana i pogodna metoda određivanja koncentracije radionuklida, jer je nedestruktivna, brza i jednostavna. Uz to omogućeno je određivanje koncentracije svih γ emitera samo jednim merenjem, a takođe možemo da radimo sa kilogramskim uzorcima.

Signal koji se dobije u detektoru se preko predpojačavača vode u pojačavač. Najčešći detektor koji se koristi u γ spektrometriji niskih aktivnosti je Ge spektrometar. Njegova bitna

prednost je korišćenje uzoraka reda 1 kg, za koje najčešće nije potrebna velika priprema, zahvaljujući velikoj prodornoj moći fotona. Njihova visoka rezolucija efektivno smanjuje fon, daje sigurnu identifikaciju γ zraka i tako omogućava istovremeno određivanje koncentracije aktivnosti pojedinačnih radionuklida u njihovoј smeši. Nedostatak u odnosu na druge tipove detektora je mala ukupna efikasnost, svega nekoliko procenata. Spektri se registruju u višekanalnom analizatoru, koji je povezan sa računarcem gde se vrši obrada podataka. Koncentracija aktivnosti radionuklida je određena aposlutnim merenjem na poluprovodničkom γ spektrometru. U registrovanom spektru, položaj vrha totalne apsorpcije odgovara energiji zračenja, a njegova površina broju registrovanih γ kvanata, odnosno intezitetu zračenja.

Metodološke nesavršenosti γ spektrometrije vezane su uz problem kvantifikacije efekta samoapsorpcije i efikasnosti u vezi sa njom, za teškoće u vezi pribavljanja kvalitetnih standarda, za optimizaciju geometrije uzorak-detektor, način integracije spektralne linije i generalno za redukciju svih vrsta sistemskih i slučajnih grešaka. [12]

4.2. Izvor zračenja

Pod izvorom zračenja podrazumevamo materijal koji emituje nuklearno i x zračenje. Svaki foton γ zraka ima određenu energiju koja je karakteristična za izvor iz koga potiče zračenje. Ovo je osnova γ -spektrometrije pošto mereći energije tih fotona, možemo odrediti iz kog izvora su potečli. Možemo da ih podelimo na izvore koji sadrže radioaktivni materijal i kontinuirano emituju zračenje, i na one koji emituju fotone kada se ozrače spolja česticama ili fotonima.

U pogledu dimenzija možemo ih podeliti na tačkaste, površinske ili prostorne. Strogo govoreći, svi izvori su prostorni, ali u odnosu na dimenzije detektora i na rastojanje detektor-izvor, možemo ih smatrati tačkastim ili površinskim.

4.3. Geometrija izvor- detektor

Da bismo dobili najbolje rezultate, neophodno je da vodimo računa o samoj geometriji izvora kao i o uzajamnom položaju izvora i detektora. Za geometriju eksperimenta, u cilju postavljanja najoptimalnijih uslova, bitno je voditi računa o sledećem:

- Rastojanje izvor-detektor
- Montaža izvora
- Specijalne geometrije izvor- detektor
- Apsorberi
- Kolimatori

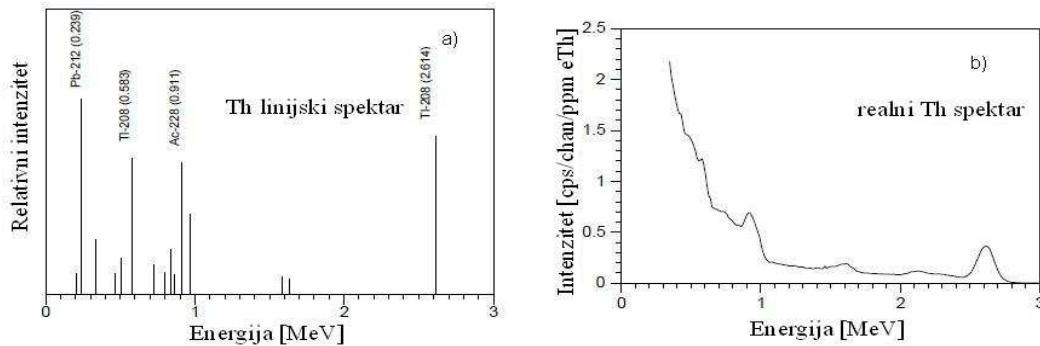
Veliki uticaj na posmatrani spektar ima debljina izvora. Sa većom debljinom, ima više Komptonovog rasejanja što smanjuje intenzitet registrovanih foto-vrhova. Pošto se fotoni sa manjom energijom više atenuiraju od fotona sa većom energijom, ovaj efekat je više izražen na nižim energijama. Zračenje može biti atenuirano i u materijalu između izvora i detektora. Od oblika izvora i detektora kao i od njihovog međusobnog položaja zavisi količina materijala kroz koju će zračenje prolaziti. Dobijeni spektar, dakle, zavisi od koncentracije i geometrije izvora i detektora, kao i od visine na kojoj je postavljen detektor.

4.4. Oblik γ spektra i njihove osobine

Spektar fotona nekog izvora najčešće se sastoji od diskretnih linija vrlo male širine, dok spektar visina signala iz elektronike detektora ima kontinualnu distribuciju usled efekata pomenutih ranije. Istaknuta komponenta spektra je tzv. vrh totalne apsorpcije, koji nastaje kada upadni foton pređe celokupnu energiju detektoru.

Svaki od izvora zračenja ima svoj karakteristični linijski spektar. Ovi spektri su uglavnom teorijske apstrakcije koje predstavljaju raspodelu zračenja kod izvora, što je prikazano na Slici 9. Kako zračenje prolazi kroz sam izvor, detektor, i materiju između izvora i detektora dolazi do već opisanih procesa zbog kojih ćemo konačno registrovati spektar drugačiji od teoretskog. Dakle, konačni spektar će zavisiti od :

- karakteristika detektora
- geometrije između detektora i izvora
- količine materijala između njih.



Slika 9. a)Teoretski Torijumov emisioni linijski spektar blizu izvora b) Spektar snimljen NaI(Tl) detektorom

4.5. Komponente fona

Fon predstavlja ometajuće zračenje iz okruženja detektora, tj. ono zračenje koje otežava ili onemogućava detekciju nama značajnih događaja. Da bismo što više eliminisali nepoželjni fon, detektor se smešta duboko pod Zemlju, ili se konstruiše odgovarajuća zaštita . Komponente fona su:

- ***Gama zračenje iz okruženja u kome se nalazi detektor***

Prirodno prisutna radioaktivnost uglavnom potiče iz tri poznata radioaktivna niza čiji su rodonačelnici ^{232}Th , ^{238}U i ^{235}U . Pored ovih nizova, izvori prirodne radioaktivnosti su I ^{40}K , ^{50}V , ^{87}Rb ... Od svih ovih najbitniji je ^{40}K koji pored elemenata iz tri niza najviše doprinosi prirodnoj radioaktivnosti. Radioizotopi ^{232}Th , ^{238}U i ^{235}U , imaju ekstremno duge periode poluraspada (10^9), čak nekoliko redova veličine veće periode poluraspada od njihovih potomaka sa najdužim periodima poluraspada.

U okolini detektora imamo još i fon koji potiče od veštački stvorenih radioizotopa. Ovi radioizotopi su uglavnom produkti fisije i aktivacije, veliki deo potiče od testova nuklearnog oružja u atmosferi, a dodatno iznad Evrope od posledica Černobilske katastrofe. Na fon utiče sadržaj radionuklida u zemljištu i građevinskom materijalu koji se ugrađuje u podlogu, zidove i plafon laboratorije.

- ***Radioaktivnost u konstrukcionim materijalima detektora***

Pažljiv izbor kostrukcionih materijala za izgradnju detektora i štita sa niskom radioaktivnom kontaminacijom je preduslov za nizak fonski odbroj. Da bi se odredila koncentracija najverovatnijih kontaminanata u materijalu koristi se gama spektroskopija (nedestruktivan metod), masena spektrometrija ili neutronska aktivaciona analiza. Za većinu materijala najverovatniji kontaminanti su K, Th i U.

- ***Radionečistoće u materijalu štita***

Materijali pogodni za izradu zaštite su materijali sa visokim atomskim brojem i niskom sopstvenom radioaktivnošću. Osim retkih metala kao što su volfram i tantal, ima malo elemenata sa ovim karakteristikama:

- Živa (Hg); karakteriše je visoka radiočistoća koja može biti poboljšana ponovljenim destilacijama. Živa se na sobnoj temperaturi nalazi u tečnom stanju što zahteva specijalan kontejner. Relativno je skupa.
- Gvožđe (Fe); relativno jeftino, veliki presek za zahvat neutrona i proizvodnju radioaktivnih jezgara pod dejstvom kosmičkih zraka.

- Bakar (Cu); najmanje kontaminiran, ali ima veliki presek za zahvat termalnih neutrona i proizvodnju radioaktivnih jezgara pod dejstvom kosmičkih zraka. Interaguje sa mionima i utiče na povećanje fona.
- Olovo (Pb); najčešće upotrebljavan materijal, jeftino, dobre mehaničke karakteristike, veliki redni broj, mali presek za zahvat neutrona, velika sopstvena radioaktivnost.

- ***Kosmičko zračenje***

Elementi kosmičkog zračenja koji najviše utiču na fon su mioni i neutroni. Što se elektrona, protona i fotona tiče, njihov uticaj na fon je gotovo zanemarljiv. Elektroni i fotoni se u velikoj meri apsorbuju u materijalu štita. Intenzitet protona je gotovo zanemarljiv, ali u interakciji sa materijalom oni prouzrokuju stvaranje neutrona. Interakcija kosmičkog zračenja sa materijom uzrokuje pojavu elektronsko-fotonskih pljuskova, proizvodnju novih neutrona, itd.

- ***Radon i njegovi potomci***

Radon ima svoje izotope u sva tri prirodna radioaktivna niza, usled čega moramo posebnu pažnju posvetiti njemu. Prenosi se vazdušnim i vodenim putem (pre svega ^{222}Rn , jer jedini živi dovoljno dugo). Spada u grupu plemenitih gasova.

Koncentracija Rn u prostoriji zavisi od:

- vrste građevinskog materijala
- sastava tla na kome se nalazi građevina
- koncentracije Rn u vodovodnoj vodi
- meteoroloških uslova
- ventilacije prostorije

4.6. Analiza spektra

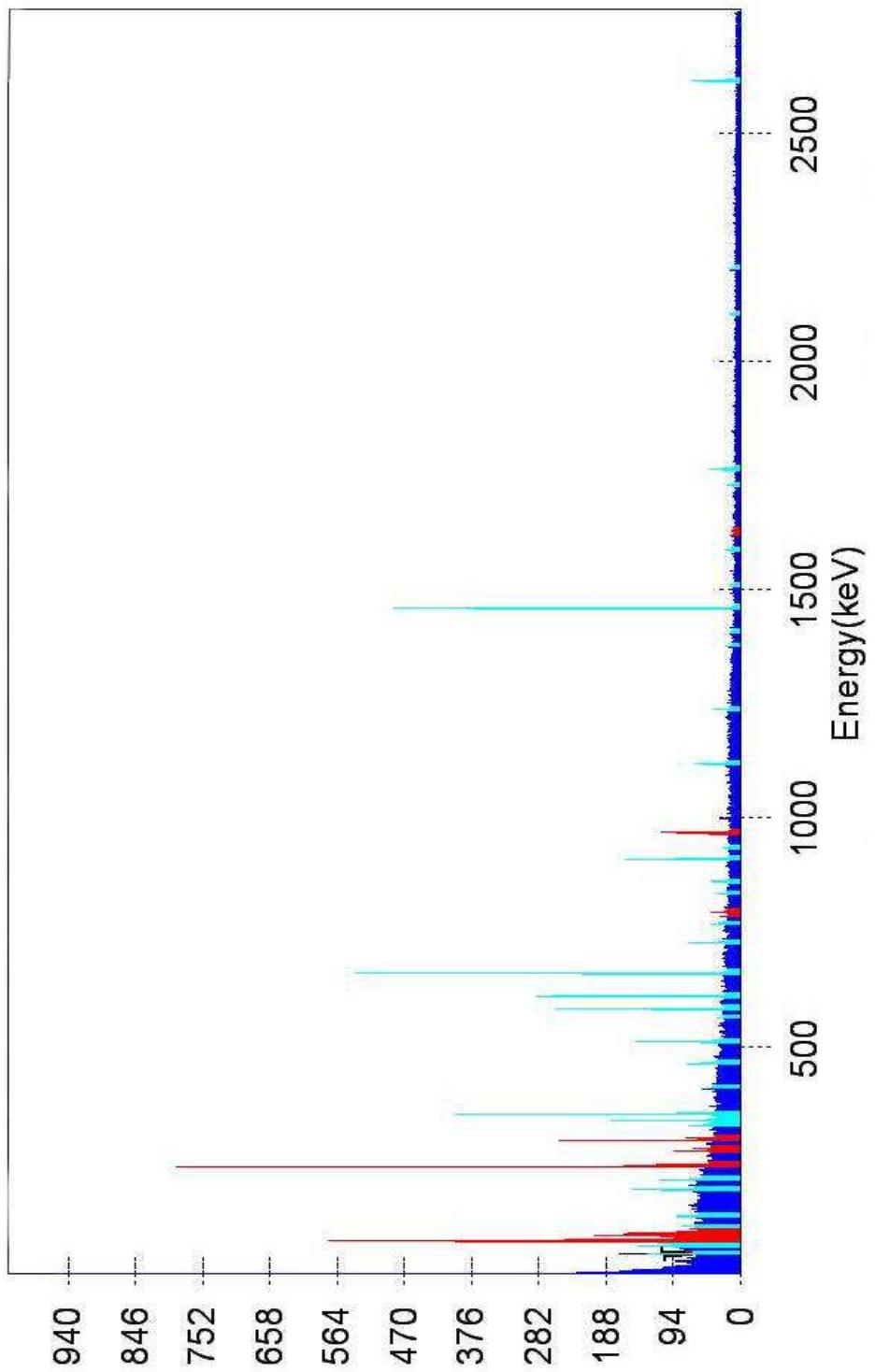
Razvijeno je nekoliko metoda za automatsko lociranje vrhova u spektru. Vizuelan način lociranja se i dalje smatra kao najbolji metod, međutim automatske rutine su od velikog značaja kada u spektrima imamo veliki broj vrhova ili kada je neophodno analizirati veliki broj spektara. Osetljivost svake metode za traženje vrhova može se podešavati tako da ona pronađe manji ili veći broj vrhova u datom spektru. Moguće je i pronalaženje više malih lažnih vrhova, koji su posledica statističke fluktuacije ili druge strukture u kontinumu. Zato svaki plan analize spektara mora definisati optimum osetljivosti automatske rutine za lociranje vrhova.[2]

Cilj analize za većinu γ spektrometara je određivanje brzine emisija fotona iz izvora. Za to je potrebno prvo odrediti iz spektra odbroj pod vrhom pune energije. Metode koje se koriste kreću se od jednostavnog sabiranja odbroja u nekoliko kanala, pa do kompleksnih prilagođavanja nelinearnom metodom najmanjih kvadrata. Za pojedinačne ili potpuno razdvojene vrhove u spektru, površine se mogu precizno odrediti bilo kojom metodom, ali to ne znači da ćemo bilo kojom metodom dobiti iste vrednosti, jer je moguće da površina vrha nije dobro definisana. [2]

Da bismo odredili energiju lociranih vrhova u spektru, potrebo je izvršiti energijsku kalibraciju, čiji je cilj da se dobije veza između pozicija vrhova u spektru i odgovarajućih energija γ zraka. Ona se obično vrši pre pravog merenja, makar na preliminarni način, a uobičajeno je da programi za analizu spektara uključuju promišljanje opcija za kalibraciju tokom daljeg postupka obrade podataka. Energijska kalibracija se izvodi merenjem spektra izvora koji emituje γ zrake sa precizno poznatim energijama i povezivanje izmerene pozicije vrhova sa odgovarajućim energijama. Kalibracioni izvori mogu sadržati jedan ili više radionuklida, sa jednom ili više energija γ zraka. Koji god tip izvora da se koristi, treba osigurati da kalibracione energije pokrivaju ceo interval u kome se koristi spektrometar.

Kada se meri jačina slabih radioaktivnih izvora tj. takvih kod kojih je prisutna nezanemarljiva brzina brojanja fona, a koji imaju poluživot duži od bilo kog razumno dugog vremena merenja, preciznost brzine brojanja može, bar u principu, da se poveća proizvoljno, produžavajući vreme merenja. Sa druge strane, u mnogim primenama, kada poluživot izvora može biti istog reda veličine kao što je vreme merenja koje imamo na raspolaganju, postoji mogućnost da se definiše neko optimalno vreme merenja. U praksi ovo optimalno vreme se često procenjuje intuitivno, ali u nekim slučajevima kvantitativniji pristup može značajno da poboljša rezultate i iskorišćenje vremena. U našem eksperimentu, prosečno vreme merenja je bilo oko 60000s. Na slici 10. je prikazan dobijeni spektar za uzorak zemljista sa lokacije broj 39 (Bavanište.)

Bitno je istaći da se u ovom eksperimentu nije vršila ručna obrada i analiza spektara. Odbroj pod spektralnim linijama karakterističnim za pojedine radionuklide, kao i njihova koncentracija aktivnosti se određuje obradom podataka u registrovanim spektrima na računaru, pomoću programa Genie. Ovom automasktom metodom, dobijame listinge za svaki uzorak, sa kojih se vrši očitavanje koncentracija aktivnosti radionuklida. Na ovaj način su dobijeni podaci za svih 50 uzoraka i na osnovu njih je vršena dalja analiza. [2] Na slici 11 je prikazan jedan ovakav listing koji odgovara spektru sa slike broj 10.



Slika 10. Dobijeni spektar za uzorak zemljišta sa lokacije broj 39

2011-08-04 14:04:58 C:\GENIE2K\REPPFILES\SkratiGenije.exe (ver. 2008-09-01 11:46:04) by J. Slivka:

 GAMMA SPECTRUM ANALYSIS *****
 File: C:\GENIE2K\CRMFILES\Detektor B 100 procenata\BVZ1039.CMF
 Report Generated On : 2011-08-04 14:04:45
 Sample Title : POLJPORIVREDNA ZEMLJA 2010
 Spectrum Description :
 Sample Identification : BVZ1039
 Sample Type : BAVANISTE
 Sample Geometry : 2 KUTIJE
 Peak Locate Threshold : 4.00
 Peak Locate Range (in channels) : 200 - 16384
 Peak Area Range (in channels) : 200 - 16384
 Identification Energy Tolerance : 2.000 keV
 Sample Size : 2.329E-001 kg
 Sample Taken On :
 Acquisition Started : 2010-11-17 06:56:04
 Live Time : 26476.5 seconds
 Real Time : 26516.8 seconds
 Dead Time : 0.15 %
 Energy Calibration Used Done On : 2010-07-15
 Efficiency Calibration Used Done On : 2011-08-04
 Efficiency ID :
 Background File : C:\GENIE2K\CRMFILES\Detektor B 100 procenata\201

No	Nuclide	NIDConf	MDA	activity(1s)	activity+-1.6s OR MDA
			[Bq/kg]	[Bq/kg]	[Bq/kg]
1	Be-7	0.000	9	0(9)	<9
2	K-40	0.998	9	623(11)	623+-20
3	CO-60	0.000	0.9	0.0(9)	<0.9
4	CS-137	1.000	1.2	42.6(8)	42.6+-1.2
5	TL-208	0.993	0.9	16.8(4)	16.8+-0.6
6	PB-210	1.000	23	62(5)	62+-8
7	BI-212	0.977	26	41(8)	41+-14
8	PB-212	1.000	0.9	43.9(9)	43.9+-1.5
9	BI-214	0.995	2.1	37.5(7)	37.5+-1.1
10	PB-214	1.000	2.0	36.8(6)	36.8+-1.1
11	TH-227	0.000	11	0(10)	<11
12	AC-228	0.998	3.1	47.4(10)	47.4+-1.6
13	TH-234	0.995	5.7	36.8(20)	37+-3
14	U-235	0.848	1.1	4.71(26)	4.7+-0.4
15	AM-241	0.000	2.6	0.0(26)	<2.6
	Formula		activity(1sC)	cspdf	activity+-1.6sC
			[Bq/kg]		[Bq/kg]
Ra 226S=WMeanC(RA-226,PB-214,BI-214,PB-210)= 37.3(16) 12.34 37.3+-2.7					
Th 232S=WMeanC(AC-228,RA-224,PB-212,BI-212)= 45.5(13) 3.54 45.5+-2.1					
U 235S=WMeanC(U-235,TH-227,BI-211)= 4.71(26) 0.20 4.7+-0.4					
U 238 8S=WMeanC(TH-234,PA-234M,RA-226,PB-214,BI-214,PB-210)= 37.3(13) 8.25 37.3+-2.2					
U 238(234)=WMeanC(TH-234,PA-234M)= 36.8(20) -1.00 37+-3					
natural=Be7+K40+U235+Th232+U238= 710(14) 710+-24					
artificial= 42.6(29) 43+-5					
total=natural+artificial= 753(15) 753+-25					
buildint=K40/3000+Ra226/200+Th232/300+artificial/4000= 0.557(10) 0.557+-0.017					
buildext=K40/5000+Ra226/400+Th232/400+artificial/4000= 0.342(6) 0.342+-0.009					
buildfund=K40/8000+Ra226/700+Th232/500+artificial/2000= 0.244(4) 0.244+-0.007					
buildnodep=K40/50000+Ra226/4000+Th232/3000+artificial/10000= 41.2(7)E-03 (41.2+-1.1)E-03					
UNIDENTIFIED PEAKS (1s<10%):					
Energy (keV)	cps	cps1s%			
74.87	8.1018E-002	2.67			
77.16	1.5350E-001	2.04			
84.11	1.5952E-002	0.72			
87.31	6.1582E-002	3.82			
90.03	1.9709E-002	5.68			
270.27	1.5324E-002	7.83			
300.15	1.0125E-002	9.82			
328.00	1.2532E-002	8.84			
338.36	4.7078E-002	3.34			
463.03	1.4363E-002	7.73			
510.76	2.1374E-002	7.98			
727.31	2.0331E-002	5.28			
965.00	1.0181E-002	7.87			

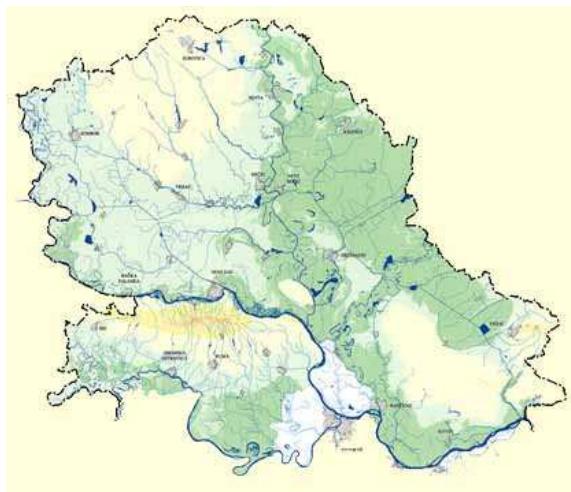
Slika 11. Listing sa svim relevantnim podacima za uzorkovano zemljište sa lokacije br.39

5. EKSPERIMENTALNI DEO

5.1. Određivanje koncentracije aktivnosti radionuklida poljoprivrednog zemljišta

5.1.1. Analizirano poljoprivredno zemljište Vojvodine

Autonomna Pokrajina Vojvodina čini severni deo Republike Srbije i smeštena je na južnom delu Panonskog basena. Budući da je njen veći deo dno nekadašnjeg Panonskog mora, reljef Vojvodine je izuzetno ravničarski i na niskoj nadmorskoj visini. Karakterišu ga lesne zaravni, peščare, lesne terase i aluvijalne ravni. Postoje i niske planine, Fruška gora u severnom delu Srema i Vršačke planine u jugoistočnom Banatu. Vojvodina je podeljena na tri celine: Banat, Bačku i Srem. Sva tri regiona raspolažu visokorodnim obradivim zemljištem i poljoprivreda se javlja kao osnovna privredna delatnost.



Budući da je Vojvodina pokrivena lesom, najrasprostranjeniji tipovi zemljišta su černozemni i livadske crnice, a u vlažnim predelima ritske crnice i slatine. Černozemni, koji zahvataju 60% obradivog zemljišta, odlikuju se velikom plodnošću, a na njima, kao i na livadskim crnicama, najveće površine koriste se za uzgajanje pšenice, kukuruza, šećerne repe, suncokreta, soje i drugog industrijskog i krmnog bilja.

Slika 12. Reljef Vojvodine

Ekonomija Vojvodine se najvećim delom zasniva na prehrabenoj industriji i oko 85% njene teritorije čini poljoprivredno zemljište. Glavni poljoprivredni proizvodi su kukuruz (70%), industrijsko bilje (20%) i ostale poljoprivredne kulture (10%).

U svim uzorcima zemljišta, bez obzira na njihovo poreklo i način korišćenja, moguće je detektovati različite nivo koncentracije aktivnosti koje potiču od prisustva prirodnih i veštačkih radionuklida. Region Vojvodine može biti radioaktivno kontaminiran, pod uticajem više izvora, koji su navedeni u daljem tekstu.

1. Primoradijalni radionuklidi sadržani u zemljištu, daju najveći doprinos prirodoj radioaktivnosti, a njih čine članovi radioaktivnih nizova urana (^{238}U) i torijuma (^{232}Th).

Pored njih, dosta je rasprostranjen i izotop kalijuma (^{40}K) koga ima 0,0017% u prirodnom kalijumu i koji takođe ulazi u sastav zemlje. [11]

Obradiva zemljišta su nastala mešanjem produkata mehaničkog raspada stena sa organskom komponentom, a vrednosti koncentracija aktivnosti prirodnih radioaktivnih elemenata u stenama su poznate. Ove vrednosti za bazalt, granit, sienit i krečnjak su date u Tabeli 3.

Stena	^{238}U [Bq/kg]	^{232}Th [Bq/kg]	^{40}K [Bq/kg]
<i>bazalt</i>	5.3	6.5	210
<i>sieniti</i>	102.0	69.2	1400
<i>granit</i>	59.7	87.5	1290
<i>krečnjak</i>	28	7	89

Tabela 3. Koncentracije aktivnosti prirodnih radionuklida u nekim stenama

Na teritoriji Vojvodine, obradiva zemljišta svojim najvećim delom sadrže silikate u svojoj neorganskoj komponenti, pošto su nastala raspadom granitnih stena. Budući da je ispitano relativno veliko područje, može se očekivati da će se radionuklidi detektovati u širokom opsegu veličina, jer se sastav zemljišta od lokaliteta do lokaliteta razlikuje.[1]

Koncentracije uranijuma i torijuma u zemljinoj kori su u opsegu od 13.5-123 [Bq/kg] za ^{238}U i 39,4[Bq/kg] za ^{232}Th . [2]

2. Još od početka nuklearne ere, čovek svojim delovanjem utiče na oslobađanje izvesne količine radionuklida u biosferu, od koje se deo zadržava i u zemljištu. Ovi veštački radionuklidi se dobijaju kao fisioni produkti prilikom nadzemnih nuklearnih proba ili ukoliko dođe do havarije na nuklearnim elektranama. Sa ekološke tačke gledišta, najznačajniji je ^{137}Cs , kako zbog dugog perioda poluraspada (30,17 godina) tako i zbog potencijalne biološke opasnosti. Naime, joni Cs se u organizmu ponašaju analogno kalijumu i prate njegov metabolizam. Njihova apsorpcija u krvi je potpuna, a biokinetička izlučivanja iz ljudskog organizma zavise od niza parametara, kao što su godine starosti, pol, mišićna masa, sadržaj K itd. [3]

U ekosistemu Vojvodine, u svim tipovima zemljišta je prisutan radioizotop ^{137}Cs . On je deponovan u ovaj region prvenstveno usled padavina nakon havarije nuklearne elektrane „Lenin“ u Černobilu 26.aprila 1986. godine. S obzirom na dug period poluraspada, može se očekivati da će biti prisutan dosta dugo u zemljištu. Usvajanje i migracija ^{137}Cs u velikoj meri zavisi od fizičkohemijskih karakteristika samog zemljišta, kao i od tipa vegetacije. [7]

3. Zemljišta predstavljaju neophodnu i značajnu kariku u lancu ishrane da bi se omogućila razmena energije i materije. Ovo utiče na izloženost kontaminaciji, pogotovo ako su u pitanju regioni koji se intezivno koriste u poljoprivredne svrhe. Tehnološki procesi koji se primenjuju u proizvodnji fosfatnih đubriva iz fosfatnih ruda, apatita i fosforita, ne omogućavaju izdvajanje i izolaciju radionuklida, prvenstveno urana. U mineralnim đubrivima, koja čine finalni produkt obrade fosfatnih ruda, ostaje čak do 90% urana. Ovo ukazuje da postoji izvestan uticaj dugogodišnjeg đubrenja poljoprivrednog zemljišta na povećanje koncentracije aktivnosti radionuklida. Zbog toga ovo predstavlja razlog više da se sprovede redovna kontrola nad poljoprivrednim zemljištem.

U svetu se godišnje preradi oko 135 miliona tona fosfatnih ruda i procenjuje se da se godišnje može uneti i do 21.000 tona urana putem mineralnih đubriva. Na osnovu podataka da se u Srbiji godišnje na njive unese oko 1500 t veštačkih đubriva na bazi fosfora, možemo da procenimo da se u životnu sredinu unese oko 210t urana, odnosno 30g urana po hektaru. [4]

4. Tokom bombardovanja 1999.godine i teritorija Vojvodine je bila izložena čestim napadima. Stoga je generalni stav javnosti da je zemljište dodatno zagađeno osiromašenim uranom i zbog toga je ispitivanje aktivnosti koncentracije radionuklida posebno aktuelno.

Za radioekologiju poseban interes predstavlja poznavanje fizičko-hemijskih parametara zemljišta (kapacitet adsorbcije, sadržaj razmenjivih katjona, mineraloški i mehanički sastav, pH vrednost, sadržaj organske materije) koji utiču na migraciju radionuklida. [4] Poznavanje koncentracije radionuklida u zemljištu je izuzetno važno, budući da biljke neke radioaktivne elemente ugrađuju u svoja tkiva, pa se ovi izotopi putem lanca ishrane mogu uneti u ljudski organizam.

Tokom 2000.godine izvršeno je merenje radioaktivnosti zemljišta Vojvodine. [5] Zaključeno je da nema povećane radioaktivnosti koja bi mogla da ugrozi proizvodnju hrane, kao i da nisu pronađeni ostaci obogaćenog urana. Tokom 2010.godine javlja se potreba radiološke kontrole istog regiona u cilju daljeg monitoringa, ali i poređenja sa predhodno dobijenim rezultatima. Tu se rađa i ideja za izradu ovog diplomskog rada, čiji program obuhvata sledeće:

- Određivanje koncentracije aktivnosti radionuklida: ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{40}K i ^{137}Cs , iz snimljenih spektara uzoraka poljoprivrednog zemljišta, sa 50 lokacija na teritoriji Vojvodine.
- Procena maksimalne koncentracije aktivnosti radionuklida u biljnim kulturama (na osnovu međunarodnih podataka za transfer faktore radionuklida iz zemljišta u biljke) koje bi se uzgajale na datom poljoprivrednom zemljištu.

- Poređenje dobijenih rezultata sa merenjima izvršenim pre deset godina na istim lokacijama.

Uzorkovano je isključivo poljoprivredno zemljište sa teritorije čitave Vojvodine. Istraživanje je sprovedeno u toku novembra 2010.godine. Na slici 2. su prikazane lokacije sa kojih su uzeti uzorci.



Slika 13. Geografski prikaz lokacija na kojima je uzorkovano zemljište

Ispitano je zemljište sa 50 lokacija (poklapaju se sa lokacijama koje su korišćene tokom merenja 2000-te godine), koje su birane proporcionalno broju stanovnika i površini pojedinih regiona. Tako da je uzeto po 20 uzoraka iz Banata i Bačke, i 10 uzoraka iz Srema. Prilikom uzorkovanja je korišćena pedološka karta Vojvodine, da bi se obezbedila zastupljenost svih tipova zemljišta, koja se koriste za uzgajanje poljoprivrednih kultura. Budući da je černozem rasprostranjen u većem delu Vojvodine, ovaj tip zemljišta se javlja kao najdominantniji. U Tabeli 4 su prikazani svi lokaliteti, sa karakterističnim naznakama.

Red. Br.	Lokalitet	Geomorfološka celina	Tip zemljišta	Način korišćenja
1.	HORGOS	Sub.horgoška peščara	Arenosol	vinograd
2.	PALIĆ	Sub.horgoška peščara	Solonček	pašnjak
3.	ŽEDNIK	Bačka lesna zaravan	Černozem	oranica
4.	ALEKSA ŠANTIĆ	Bačka lesna zaravan	Černozem	oranica
5.	TORNJOŠ	Bačka lesna zaravan	Černozem	oranica
6.	GAKOVO	Bačka lesna terasa	Černozem	oranica
7.	KULA- LIPAR	Bačka lesna zaravan	Černozem	oranica
8.	BEČEJ	Aluvijalna ravan	Humoglej	oranica
9.	SRBOBRAN	Bačka lesna zaravan	Černozem	oranica
10.	SRPSKI MILETIĆ	Bačka lesna terasa	Černozem	oranica
11.	BOGOJEVO	Bačka lesna terasa	Humoglej	oranica
12.	NADALJ	Bačka lesna terasa	Černozem	oranica
13.	RUSKI KRSTUR	Bačka lesna terasa	Černozem	oranica
14.	PARAGE	Bačka lesna terasa	Černozem	oranica
15.	RIMSKI ŠANČEVI	Bačka lesna terasa	Černozem	oranica
16.	ŽABALJ	Bačka lesna terasa	Černozem	oranica
17.	MAGLIĆ	Bačka lesna terasa	Černozem	oranica
18.	KAĆ	Aluvijalna ravan	Fluvisol	pašnjak
19.	BAČKO NOVO SELO	Aluvijalna ravan	Fluvisol	oranica
20.	BAN. ARANĐELOVO	Aluvijalna ravan	Humoglej	oranica
21.	SANAD	Aluvijalna ravan	Fluvisol	pašnjak

22.	CRNA BARA- ČOKA	Banatska lesna terasa	Černozem	oranica
23.	KIKINDA	Banatska lesna terasa	Černozem	oranica
24.	RUSKO SELO	Banatska lesna terasa	Humoglej	oranica
25.	TORDA	Banatska lesna terasa	Humoglej	oranica
26.	KUMANE	Banatska lesna terasa	Solonjec	pašnjak
27.	BEGEJCI	Banatska lesna terasa	Černozem	oranica
28.	ZRENJANIN	Banatska lesna terasa	Černozem	oranica
29.	BOKA (SOKOLAC)	Banatska lesna terasa	Solonjec	pašnjak
30.	ORLOVAT	Tamiška lesna zaravan	Černozem	oranica
31.	VRŠAČKI RITOVI	Aluvijalna ravan	Humoglej	oranica
32.	KOZJAK	Deliblatska lesna zaravan	Černozem	oranica
33.	ILANDŽA	Banatska lesna terasa	Humoglej	oranica
34.	IDVOR	Banatska lesna terasa	Černozem	oranica
35.	PADINA	Deliblatska lesna zaravan	Černozem	oranica
36.	VRŠAC	Vršačke planine	Kambisol	vinograd
37.	CREPAJA	Banatska lesna terasa	Černozem	oranica
38.	DELIBLATO- ČARDAK	Deliblatska peščara	Černozem	oranica
39.	BAVANIŠTE	Banatska lesna terasa	Černozem	oranica
40.	PETROV.-TRANŽAMENT	Fruška gora	Kambisol	oranica
41.	ŠID	Fruškog. lesna zaravan	Černozem	oranica
42.	RIVICA	Fruškog. lesna zaravan	Černozem	oranica
43.	RUMA- IRIG	Fruškog. lesna zaravan	Černozem	oranica

44.	INĐIJA	Fruškog. lesna zaravan	Černozem	oranica
45.	MOROVIĆ	Aluvijalna ravan	Pseudoglej	šuma
46.	VIŠNJIĆEVO	Aluvijalna ravan	Pseudoglej	šuma
47.	SREMSKA MITROVICA	Sremska lesna terasa	Černozem	oranica
48.	PEĆİNCI- POPINCI	Sremska lesna terasa	Černozem	oranica
49.	DONJI TOVARNIK	Sremska lesna terasa	Humoglej	oranica
50.	OBEDSKA BARA	Aluvijalna ravan	Fluvisol	šuma

Tabela 4. Geomorfološke celine, tip zemljišta i način korišćenja lokaliteta.

5.1.2 Uzorkovanje i metodologija merenja

a) Uzorkovanje i priprema uzorka

Kao što je gore istaknuto, vršeno je uzorkovanje sa 50 lokacija na teritoriji Vojvodine, po metodi IAEA Technical Report Series No.295- Measurements of Radionuclides in Food and the Environment- Section 5. Collection and Preparation of Samples-page 27 (5.2.3 Soil). [6] Sa svake lokacije je napravljen jedan kompozitni uzorak, mešanjem zemljišta sa 10 mikrolokacija na površini od 10m^2 . Zemljište je uzeto iz površinskog sloja do 5 cm dubine.

Uzorci su potom sušeni na $105\text{ }^\circ\text{C}$ do konstantne mase, nakon čega su uklonjene sve mehaničke nečistoće, poput kamenčića i delova biljnog materijala. Osušeni uzorci zemljišta su mehanički usitnjeni, homogenizovani i u finalnom obliku su bili u formi finog praha. Tako pripremljeni materijali su hermetički pakovani u posude oblika cilindra visine 62 mm, i prečnika 67 mm i tada se moglo pristupiti merenju. Koncentracija aktivnosti radionuklida u zemljištu je određena metodom niskofonske gama-spektrometrije na germanijumskim detektorima visoke radiočistoće.

U Tabeli 5. su prikazani svi uzorci, šifra pod kojim su mereni, datum uzorkovanja kao i njihova masa. Vidimo da je tipična masa uzorka iznosila između 200 i 300 g. Takođe treba istaći da se prvo slovo u šifri odnosi na detektor koji je upotrebljen za merenje datog uzorka.

Redni Br.	NAZIV LOKACIJE			
	Šifra	Lokacija	Masa(g)	Datum uzorkovanja
1.	M.VZ1001	HORGOS	315.3	17.11.2010.
2.	B.VZ1002	PALIC	265.4	17.11.2010.
3.	K.VZ1003	ZEDNIK	234.0	17.11.2010.
4.	K.VZ1004	ALEKSA ŠANTIĆ	226.7	17.11.2010.
5.	M.VZ1005	TORNJOŠ	224.1	17.11.2010.
6.	L.VZ1006	GAKOVO	245.2	17.11.2010.
7.	B.VZ1007	KULA- LIPAR	223.7	17.11.2010.
8.	B.VZ1008	BEČEJ	209.9	17.11.2010.
9.	L.VZ1009	SRBOBRAN	241.4	17.11.2010.
10.	K.VZ1010	SRPSKI MILETIĆ	259.2	25.11.2010.
11.	B.VZ1011	BOGOJEVO	286.0	25.11.2010.
12.	B.VZ1012	NADALJ	238.7	25.11.2010.
13.	B.VZ1013	RUSKI KRSTUR	261.9	25.11.2010.
14.	L.VZ1014	PARAGE	238.1	25.11.2010.
15.	M.VZ1015	RIMSKI ŠANČEVI	256.8	25.11.2010.
16.	B.VZ1016	ŽABALJ	219.2	25.11.2010.
17.	K.VZ1017	MAGLIĆ	261.2	25.11.2010.
18.	L.VZ1018	KAĆ	213.9	25.11.2010.
19.	B.VZ1019	BAČKO NOVO SELO	287.5	25.11.2010.
20.	M.VZ1020	BAN. ARANĐELOVO	216.3	15.11.2010.
21.	L.VZ1021	SANAD	216.5	15.11.2010.
22.	B.VZ1022	CRNA BARA- ČOKA	238.6	15.11.2010.
23.	K.VZ1023	KIKINDA	227.0	15.11.2010.
24.	B.VZ1024	RUSKO SELO	235.1	15.11.2010.
25.	K.VZ1025	TORDA	227.1	15.11.2010.
26.	M.VZ1026	KUMANE	241.0	15.11.2010.
27.	L.VZ1027	BEGEJCI	226.4	15.11.2010.
28.	B.VZ1028	ZRENJANIN	227.4	15.11.2010.
29.	B.VZ1029	BOKA (SOKOLAC)	223.8	12.11.2010.
30.	B.VZ1030	ORLOVAT	217.3	12.11.2010.
31.	L.VZ1031	VRŠACKI RITOVI	233.3	12.11.2010.
32.	M.VZ1032	KOZJAK	260.2	12.11.2010.
33.	K.VZ1033	ILANDŽA	231.9	12.11.2010.
34.	B.VZ1034	IDVOR	233.4	12.11.2010.
35.	K.VZ1035	PADINA	245.7	12.11.2010.
36.	L.VZ1036	VRŠAC	231.0	12.11.2010.
37.	M.VZ1037	CREPAJA	229.7	12.11.2010.
38.	B.VZ1038	DELIBLATO- ČARDAK	286.1	12.11.2010.
39.	B.VZ1039	BAVANIŠTE	232.9	12.11.2010.
40.	L.VZ1040	PETROV.- TRANŽAMENT	258.2	24.11.2010.
41.	K.VZ1041	ŠID	241.1	22.11.2010.

42.	M.VZ1042	RIVICA	265.3	24.11.2010.
43.	L.VZ1043	RUMA- IRIG	255.7	22.11.2010.
44.	K.VZ1044	INDIJA	255.9	24.11.2010.
45.	M.VZ1045	MOROVIĆ	237.3	22.11.2010.
46.	K.VZ1046	VIŠNJIĆEVO	203.1	22.11.2010.
47.	M.VZ1047	SREMSKA MITROVICA	284.8	22.11.2010.
48.	B.VZ1048	PEĆINCI- POPINCI	254.5	24.11.2010.
49.	M.VZ1049	DONJI TOVARNIK	248.9	24.11.2010.
50.	L.VZ1050	OBEDSKA BARA	232.0	24.11.2010.

Tabela 5. Šifra uzorka, masa i datum uzorkovanja

b) Metodologija merenja

Gama spektrometrijska merenja su izvršena prema standardnoj metodi ASTM C 1402-04 Standard Guide for High Resolution Gamma Raz Spectrometry of Soil Samples. [6] Za merenje svih 50 uzorka, korišćena su četiri različita poluprovodnička germanijumska detektora, označena slovima K,L,M i B. U šifri merenih uzorka se pojavljuju ista obeležja, tako da se tačno može videti koji je detektor korišćen za merenje konkretnog uzorka.

- **Spektrometar sa oznakom K**



Spektrometar sa oznakom K je poluprovodnički HPGe detektor proizvođača Canberra model GC3518. Ovaj detektor je standardnog tipa: spoljašnji kontakt je n^+ - sloj debljine od 0.9 mm, dok je unutrašnji + kontakt tanak sloj Au. Specifikacija proizvođača ovog detektora sadrži sve relevantne dimenzije detektora neophodne za eksperimentalni rad. Kućište detektora je od Al debljine 1.5 mm, a ista je debljina ulaznog prozora prema frontu detektora. Za hlađenje ovog detektora se koristi manji kontejner za tečni azot, koja omogućava prenosivost detektora. Osa detektora može biti orijentisana ili horizontalno ili vertikalno. Osnovne karakteristike detektora K, prikazane su u Tabeli 6.

Slika 14. Spektrometar oznake K

Proizvođač, godina proizvodnje	Canberra, 2005
Model, serijski broj	GC3518, 05110
Prepojačavač, kriostat	2002CSL, 7935SL-7
Geometrija	Koaksijalna sa zatvorenim krajem
Orijentacija ose detektora	proizvoljna, u Pb zaštiti vertikalna
Radna temperatura [K]	77
Radni napon [kV]	4.5
Spoljašnji kontakt	0.9 mm Ge(Li)
Unutrašnji kontakt	0.3 μ m Au
Ulazni prozor	1.5 mm Al
Prečnik kristala [mm]	61
Visina kristala [mm]	52
Aktivna zapremina kristala detektora [cm^3]	138.5
Poluprečnik jezgra [mm]	9.0
Visina jezgra [mm]	34
Debljina kućišta	1.5 mm Al
Relativna efikasnost norminalna, sertifikovana	35%, 35.6%
Rezolucija na 1332 keV HWHM, HWTM [keV]	1.77, 3.29
Odnos P/T	63.2

Tabela 6. Osnovne karakteristike detektora K

Detektor je povezan na modul za digitalnu obradu signala (DSP) InSpector 2000 Model 1300 proizvođača Canberra, koji obezbeđuje i visoki napon potreban za rad detektora. DSP modul se napaja sa jednosmernim naponom iz ispravljača, a u toku rada održava u napunjenom stanju litijum jonsku bateriju, koja omogućava rad detektora i modula na terenu, ili u slučaju nestanka napajanja iz mreže. Preko USB porta DSP modul je povezan na Notebook PC Dell Latitude 610, sa operativnim sistemom XP. Upravljanje funkcijama DSP modula omogućeno je pomoću programa Canberra Genie 2000 v. 3.0 instaliranog na ovom kompjuteru, uključujući upravljanje visokim naponom, sakupljanje, on-line praćenje i analizu spektara u formatu Canberra *.CNF. Na Slici 3. je prikazan korišćeni detektorski sistem.

Kada je ovaj detektor u stacionarnoj primeni u laboratoriji, od zračenja okoline zaštićen je olovnom komorom oblika šupljeg cilindra unutrašnjeg prečnika 22 cm i debljine zida 14 cm koja se vidi na Slici 14. Osa detektora je tada vertikalna. Integralna brzina brojanja zračenja okoline u intervalu 30 keV do 3000 keV za detektor je 2.0 s^{-1} .

- **Spektrometar sa oznakom L**

Spektrometar sa oznakom L je poluprovodnički HPGe detektor proizvođača ORTEC, model LLB-GMX-HJ. Oznaka LLB predstavlja detektor sa komponentama koje okružuju poluprovodnički kristal Ge, a koje su odabrane tako da im je sadržaj radionuklida znatno manji nego kod običnih materijala. Ovo je vrlo značajna karakteristika u cilju smanjenja nivoa zračenja iz okoline.

GMX označava da je detektor sa spoljašnjim kontaktom n-tipa. Ovaj detektor sadrži jonski imlatiran B i ima debljinu $0.3 \mu\text{m}$, pa je kao pasivni apsorber γ zraka sasvim zanemarljiv. Zahvaljujući tome, detektori poput ovog imaju veću efikasnost na niskim energijama gde su atenuacioni koeficijenti veliki, pa se mogu koristiti i za spektrometriju X-zraka i niskoenergetskih γ zraka.

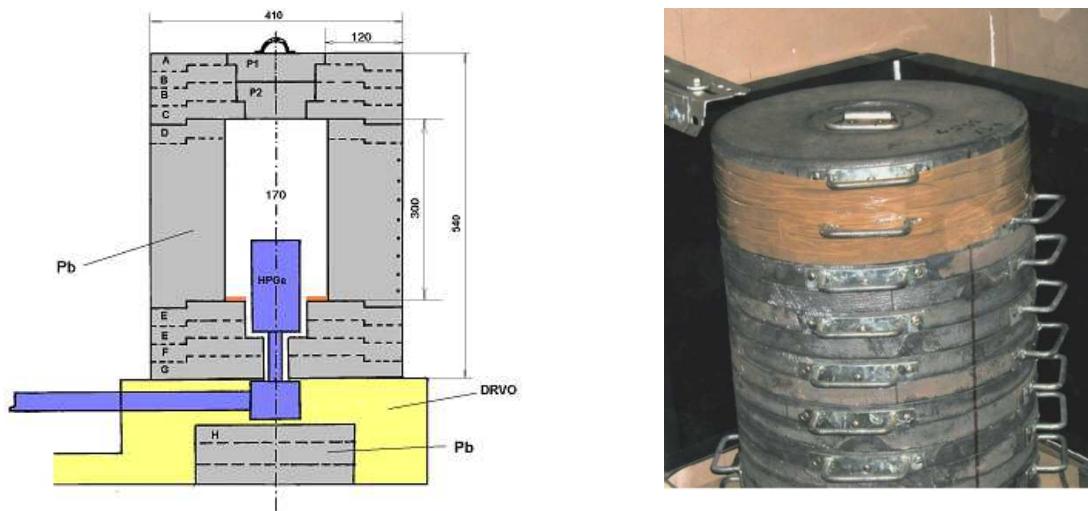
Da bi se ova osobina mogla iskoristiti, ulazni prozor na kućištu napravljen je od Be debljine 0.5mm, koeficijenta transparencije $\approx 95\%$ na energiji od 5.9 keV. Mogućnost merenja na sasvim niskim energijama u rutinskim eksperimentima se koristi vrlo retko, pa je kućište detektora sa frontalne strane, preko prozora stalno pokriveno plastičnim poklopcom koji štiti veoma osetljiv Be prozor. Ipak, ovaj detektor je mnogo osetljiviji na γ zrake ispod 100keV od standardnih HPGe detektora sa spoljašnjim kontaktom p-tipa.

Proizvođač, godina proizvodnje	ORTEC, 1999
Model	LLB-GMX-HJ
Prepojačavač, kriostat	2002CSL, 7935SL-7
Geometrija	Koaksijalna sa zatvorenim krajem
Orijentacija ose detektora	vertikalna
Radna temperatura [K]	77
Radni napon [kV]	-2.5
Spoljašnji kontakt	$0.3 \mu\text{m}$ Ge(B)
Unutrašnji kontakt	0.9 mm Ge(Li)
Ulagani prozor	0.5 mm Be
Prečnik kristala [mm]	56
Visina kristala [mm]	65,2
Aktivna zapremina kristala detektora [cm^3]	155
Poluprečnik jezgra [mm]	4.6
Visina jezgra [mm]	57.1
Debljina kućišta	1.3 mm Al
Relativna efikasnost	32%
Rezolucija na 1332 keV HWHM, HWTM [keV]	1.8, 3.4
Odnos P/T	57

Tabela 7. Osnovne karakteristike detektora L

Unutrašnji kontakt ovog detektora je sloj u koji je difundovan Li, debljine 0.9 mm, pa se u ovom slučaju prilikom proračuna efikasnosti mora voditi računa o atenuaciji u jezgru detektora. Specifikacija proizvođača ovog detektora sadrži sve relevantne dimenzije detektora i kućišta. Najvažniji parametri detektora su prikazani u Tabeli 7.

Visoki napon za ovaj detektor se dobija iz izvora ORTEC model 650. Signali iz predpojačavača vode se na spektroskopski pojačavač ORTEC model 672, a zatim na višekanalni analizator Canberra Multiport II. On je preko USB porta priključen na PC računar, sa operativnim sistemom Windows XP. Upravljanje sakupljanjem podataka i „on-line“ praćene spektra u formatu Canberra*. CNF vrši se u programu Canberra2000, verzija 2.1.



Slika 15. : a) Poprečni presek detektora označe L, sa odgovarajućom olovnom zaštitom

b) Spoljašnji izgled olovne zaštite detektora

Zaštita od zračenja okoline kod ovog detektora sastoji se od šupljeg cilindra od niskoaktivnog olova, unutrašnjeg prečnika od 22cm, a spoljašnjeg 50 cm, izrađenog u okviru laboratorije. Sa unutrašnje strane postavljena je obloga od Cu debljine 1mm i od Sn debljine 2 mm, radi apsorpcije fluorescentnih X-zraka od olova. Oznaka HJ predstavlja kriostat sa produženim vratom detektora, koji omogućava da se sam detektor smesti u olovnu zaštitu tako da su zaštitna komora i kontejner za tečni azot u istom nivou. Osa detektora je vertikalna. Komora se redovno ispuni gasovitim azotom koji nastaje isparavanjem tečnog azota u kontejneru tako da je nivo radona u komori vrlo nizak. Zaštitna olovna komora je opkoljena sa bočnih strana sa ukupno 5 plastičnih scintilacionih zaštitnih „veto“ detektora koji su povezani u koincidentno kolo sa Ge detektorem, čime se postiže dodatno smanjenje uticaja zračenja iz okoline. Integralna brzina brojanja zračenja iz okoline u intervalu energija 30 keV do 3000 keV za detektor L je 0.7 s^{-1} . Na Slici 15 je prikazan opisani detektor.

- **Spektrometar sa oznakom M**

Spektrometar sa oznakom M je poluprovodnički HPGe detektor proizvođača Canberra model GC2520-7600. Ovaj detektor je standardnog tipa: spoljašnji kontakt je napravljen difuzijom Li tako da čini n^+ - sloj debljine od oko 0.6mm. Pomenuti sloj je neaktivan i osnovna uloga mu je apsorpcija γ zraka. Unutrašnji p^+ kontakt se dobija nanošenjem vrlo tankog sloja Au na zidove šupljine dobijene uklanjanjem jezgra kristala Ge. Zato se može smatrati da atenuacije γ zraka pri prolazu kroz detektor nema.

Specifikacija proizvođača ovog detektora ne sadrže dimenzije šupljeg jezgra detektora, zato se za proučavanje efikasnosti koriste dimenzije šupljine koje se mogu naći u literaturi, a odnose se na druge detektore približno iste veličine kristala. Kućište detektora je od Al debljine 1.5mm, dok je ulazni prozor prema frontu detektora debljine 0.5mm. Vrat detektora je pod uglom od 90° , pa je osa detektora horizontalna. Najvažnije karakteristike detektora M su date u Tabeli 8.

Proizvođač, godina proizvodnje	Canberra, 1988, opravljen 2002
Model	GC2520-7600
Geometrija	Koaksijalna sa zatvorenim krajem
Orijentacija ose detektora	horizontalna
Radna temperatura [K]	77
Radni napon [kV]	4.0
Spoljašnji kontakt	0.6 mm Ge(Li)
Unutrašnji kontakt	1 μ m GeAl
Ulagani prozor	0.5 mm Al
Prečnik kristala [mm]	51
Visina kristala [mm]	58,5
Aktivna zapremina kristala detektora [cm^3]	110
Poluprečnik jezgra [mm]	4.6
Visina jezgra [mm]	38
Debljina kućišta	1.5 mm Al
Relativna efikasnost	25%
Rezolucija na 1332 keV HWHM, HWTM [keV]	1.8, 3.3
Odnos P/T	56

Tabela 8. Osnovne karakteristike detektora M

Visoki napon na ovaj detektor dobija se iz izvora Canberra model 3105. Signali iz predpojačavača Canberra model 2002CSL vode se na spektroskopski pojačavač Canberra model 2021, a zatim na #1 ulaz od 16384 kanala višekanalskog analitatora Canberra Multiport I sa

ADC-om. On je preko USB porta priključen na standardni Pc, sa operativnim sistemom Windows XP. Upravljanje sakupljanjem podataka i „on-line“ praćenje spektra u formatu Canberra *.CNF vrši se pomoću programa Canberra Genie2000, verzija 2.1.

Zaštitu od zračenja iz okoline kod ovog detektora predstavlja komora od čeličnih ploča livenih pre II Svetskog rata, tako da u njima nema veštački proizvedenih radionuklida i na ovaj način, zaštita snižava nivo okolnog zračenja za oko 1000 puta. Unutrašnja korisna zapremina komore je $1\text{ m} \times 1\text{ m} \times 1\text{ m}$, dok je debljina zidova i pokretnih vrata 25cm. Prednost ove komore u odnosu na olovnu je u nepostojanju fluroscentnih X zraka iz olova. Nedostatak je velika zapremina iz koje se teško ispira radon. Kontejner za tečni azot je u komori zajedno sa detektorom, tako da i aktivnost radionuklida u njemu doprinosi zračenju koje iz okoline ulazi u detektor. Integralna brzina brojanja zračenja iz okoline u intervalu energija od 30keV do 3000keV za detektor M je 1.7 s^{-1} .

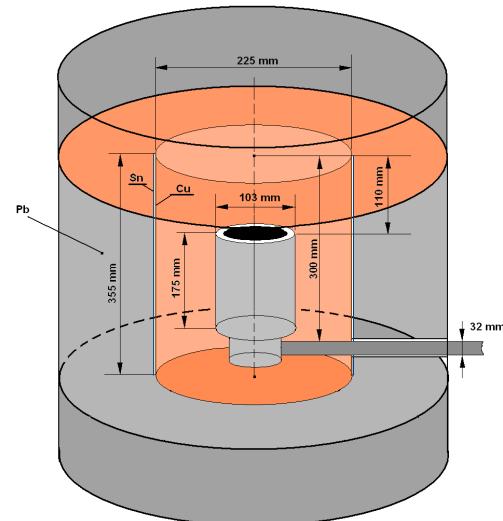
- ***Spektrometar sa oznakom B***

Spektrometar sa oznakom B je ultra niskofonski germanijumski poluprovodnički detektor velike zapreme, proizvođača Canberra, godine proizvodnje 2007, tip GX10021, serijski broj b08093. Ovaj spektrometar ima prošireni merni opseg od 6keV do 3 Mev i nalazi se u originalnoj zaštiti od olova debljine 15cm. Relativna efikasnost ovog detektora je 100% (ekvivalentnoj absolutnoj efikasnosti $3'' \times 3''$ NaI (Tl) na energiji 1332keV), a to odgovara aktivnoj zapremini od 389 cm^3 . Prednji prozor na kapi detektora je debljine samo 0,89mm i napravljen je od kompozitnih uljanih vlakana visoke tvrdoće, ali dobre transparentnosti, a to obezbeđuje više od 85% transmisije za fotone energije iznad 15keV i približno 100% transmisija za fotone energije iznad 20 keV. Model kriostata je 7915-30-ULB, model prepojačavača 2002C. Spektrometar je zatvorenog koaksijalnog tipa sa U kriostat konfiguracijom. Rezolucija na energiji 1332 keV iznosi FWHM = 1.96 keV, odnos Peak to Compton P/C je 84,5.

Zaštita detektora je napravljena od slojevitog olova. Spoljašnjih 125mm je obično niskofonsko oovo, dok je unutrašnji sloj od oko 25mm sadržaja ^{210}Pb od oko 20 Bq/kg. Pasivna zaštita ima unutrašnji sloj koji zaustavlja X zrake iz K nivoa energije u intervalu od 75keV do 85keV. Presvučeni materijali su niskofonski kalaj debljine 1mm i bakar visoke čistoće debljine 1,5mm. X zraci koji potiču iz sloja kalaja (od 25 -28 keV) takođe su redukovani bakrom.

Zaštita je opremljena sa gasnim priključkom koji služi za uvođenje tečnog azota iz Dewer-a u unutrašnjost zaštite, kako bi se snizio fon koji potiče od radona i radonovih potomaka. Ukupna masa zaštite iznosi 1633kg. Redukcioni faktor fona za kompletni spektar (od 40keV do 2768keV) iznosi 238. Visoki napon za ovaj detektor dobija se iz izvora Canberra model 3125 Dual. Signali se sa spektroskopskog pojačavača Canberra model A 2026 vide na Canberra Multiport I sa ADC-om. On je preko USB porta priključen na PC računar, sa operativnim sistemom Windows XP. Upravljanje sakupljanjem podataka i „on-line“ praćenje spektara u

formatu Canberra *.CNF vrši se u programu Canberra Genie2000, verzija 2.1. Na slici 16. je prikazan spektrometar oznake B.



Slika 16. : a) Izgled detektora oznake B , b) poprečni presek detektora u olovnoj zaštiti

Tipično vreme merenja uzorka je 60000s. Koncentracije aktivnosti svih detektovanih radionuklida su izračunate na osnovu inteziteta gama linija zabeleženih u izmerenim spektrima. Za radioizotope kojima nije primećena nijedna karakteristična gama linija u spektrima, procenjena je gornja granica koncentracije aktivnosti u uzorcima zemljišta. Greške rezultata merenja su iskazane sa nivoom poverenja od 95%, što znači da je verovatnoća da se pri ponovljenom merenju istog uzorka dobije rezultat izvan granica iskazane greške manje od 5%.

5.1.3. Rezultati merenja i diskusija

Izvršena su gama-spektrometrijska merenja svih 50 uzoraka zemljišta u cilindričnoj geometriji. Rezultati su predstavljeni u Tabeli 9, gde su prikazane koncentracije aktivnosti samo dugoživećih prirodnih radionuklida ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra i ^{40}K . Što se veštačkih radionuklida tiče, primećeno je prisustvo samo ^{137}Cs .

R.br.	KONCENTRACIJA AKTIVNOSTI RADIONUKLIDA [Bq/kg]						
	Šifra	Lokacija	^{40}K	^{137}Cs	^{226}Ra	^{232}Th	^{238}U
1.	M.VZ1001	HORGOS	249±21	5.6±0.4	12.4±0.8	14.6±1.2	24±5
2.	B.VZ1002	PALIC	238±10	6.3±0.4	9.7±1.3	11.7±0.5	9.4±1.7
3.	K.VZ1003	ŽEDNIK	392±21	5.5±0.4	36.6±1.9	35.9±2.3	< 20
4.	K.VZ1004	ALEKSA ŠANTIĆ	380±21	4.4±0.4	39±4	37±3	< 21
5.	M.VZ1005	TORNJOŠ	560±50	3.8±0.5	41.9±2.3	45±5	78±11
6.	L.VZ1006	GAKOVO	497±18	15.7±0.7	38.6±1.1	44.2±1.1	47±3
7.	B.VZ1007	KULA-LIPAR	552±15	6.9±0.3	38.5±2.4	45.8±2.9	28.3±2.6
8.	B.VZ1008	BEČEJ	794±26	9.2±0.6	26.7±1.7	47.4±2.5	40±4
9.	L.VZ1009	SRBOBRAN	697±23	6.2±0.5	46.8±2.2	56.0±2.2	66±4
10.	K.VZ1010	SRPSKI MILETIĆ	452±24	3.6±0.3	40.5±2.1	39.2±2.7	38±4
11.	B.VZ1011	BOGOJEVO	428±12	4.49±0.2 ₃	23.5±1.8	24.1±2.7	17.2±1.6
12.	B.VZ1012	NADALJ	556±19	7.7±0.5	33.8±2.5	41.5±2.6	36±4
13.	B.VZ1013	RUSKI KRSTUR	581±16	5.60±0.2 ₇	35.6±1.4	41.5±2.8	26.0±2.3
14.	L.VZ1014	PARAGE	588±21	5.6±0.5	39.3±1.3	45.1±1.2	38.5±2.9
15.	M.VZ1015	RIMSKI ŠANČEVI	560±50	5.1±0.5	39.9±2.5	43±4	73.1±10.0
16.	B.VZ1016	ŽABALJ	658±22	9.0±0.6	36.7±2.5	47.7±2.0	52.5±5
17.	K.VZ1017	MAGLIĆ	465±25	3.04±0.2 ₉	36.4±2.0	38±5	< 19
18.	L.VZ1018	KAĆ	530±20	8.0±0.6	28.7±2.6	32±4	35±3
19.	B.VZ1019	BAČKO NOVO SELO	554±15	4.45±0.2 ₃	29.4±1.3	30.9±2.9	25.3±2.0
20.	M.VZ1020	BAN. ARANDELO VO	590±50	6.5±0.6	30.0±1.8	41±5	70±10

21.	L.VZ1021	SANAD	1000±30	4.4±0.5	35±4	61.1±1.4	54±4
22.	B.VZ1022	CRNA BARA- ČOKA	684±18	9.1±0.4	29.4±1.6	41±3	22.0±2.1
23.	K.VZ1023	KIKINDA	542±28	5.1±0.4	30.0±1.7	35±5	32.9±2.9
24.	B.VZ1024	RUSKO SELO	621±20	11.9±0.7	25.1±2.3	35.4±1.8	30±3
25.	K.VZ1025	TORDA	590±30	10.1±0.6	37±3	46±3	< 22
26.	M.VZ1026	KUMANE	640±50	7.8±0.6	31.1±1.7	45±4	59±9
27.	L.VZ1027	BEGEJCI	786±26	6.7±0.6	45.1±2.6	57.9±1.4	61±4
28.	B.VZ1028	ZRENJANIN	677±18	5.6±0.3	37.0±1.6	48±3	25.3±2.5
29.	B.VZ1029	BOKA (SOKOLAC)	633±21	10.3±0.6	34.1±1.7	43.4±2.7	44±4
30.	B.VZ1030	ORLOVAT	594±16	6.7±0.3	37.3±2.3	43.7±1.6	36±3
31.	L.VZ1031	VRŠAČKI RITOVI	745±25	25.8±1.0	33.1±2.9	56.7±2.6	53±4
32.	M.VZ1032	KOZJAK	480±40	11.0±0.6	41±3	38.7±2.0	43±7
33.	K.VZ1033	ILANDŽA	521±28	12.4±0.7	42.3±2.3	44±3	< 22
34.	B.VZ1034	IDVOR	703±22	10.2±0.6	34.0±2.8	47.2±2.3	25±3
35.	K.VZ1035	PADINA	492±26	6.7±0.5	41±3	41±5	< 21
36.	L.VZ1036	VRŠAC	701±24	5.0±0.6	49.1±2.6	70.5±2.3	74±3
37.	M.VZ1037	CREPAJA	500±40	9.9±0.7	43.1±2.2	42±5	67±10
38.	B.VZ1038	DELIBLATO - ČARDAK	399±11	20.4±05	20.7±1.2	24.3±2.7	16.9±1.6
39.	B.VZ1039	BAVANIŠT E	623±20	42.6±1.2	37.3±2.7	45.5±2.1	37±3
40.	L.VZ1040	PETROV.- TRANŽAME NT	705±23	6.7±0.5	47.9±2.5	64.4±2.5	66±4
41.	K.VZ1041	ŠID	521±27	3.3±0.3	40.2±2.1	44±5	< 21
42.	M.VZ1042	RIVICA	520±40	5.5±0.5	43.4±2.8	48±5	80±10

43.	L.VZ1043	RUMA- IRIG	758±24	7.9±0.6	47.0±2.1	64.8±2.0	68±4
44.	K.VZ1044	INĐIJA	488±26	4.5±0.4	38.6±2.0	35±22	< 20
45.	M.VZ1045	MOROVIĆ	520±40	12.1±0.8	36.2±2.8	48±6	72±10
46.	K.VZ1046	VIŠNJIĆEV O	507±27	12.2±0.7	34.3±1.9	35±19	< 22
47.	M.VZ1047	SREMSKA MITROVIC A	530±40	5.0±0.5	35.3±2.1	42.3±2.9	73±9
48.	B.VZ1048	PEĆİNCI- POPİNCI	569±19	9.9±0.6	34.1±1.6	47±3	38±4
49.	M.VZ1049	DONJI TOVARNIK	610±50	7.4±0.6	41.7±2.1	50±10	7610
50.	L.VZ1050	OBEDSKA BARA	479±19	18.4±0.9	24.9±2.7	34.8±1.0	31.1±2.8

Tabela 9. Izmerene koncentracije aktivnosti radionuklida u uzorcima zemljišta

Iz Tabele 7. se može videti da su koncentracije aktivnosti u merenim uzorcima zemljišta varirale u opsegu od 5 do 80 Bq/kg za ^{238}U , od 11,7 do 70,5 Bq/kg za ^{232}Th , od 9,7 do 49,1 Bq/kg za ^{226}Ra i od 238 do 1000 Bq/kg za ^{40}K . U svim ispitanim uzorcima detektovan je Cs, a njegov raspon vrednosti je od 3,04 do 42,6 Bq/kg. Dosta široki opsezi specifičnih aktivnosti su posledica raznovrsnosti geološke podloge i tipova zemljišta.

Da bismo mogli doći do konkretnih zaključaka na osnovu dobijenih rezultata, potrebno ih je uporediti sa koncentracijom aktivnosti zemljišta karakterističnom za region Vojvodine. Budući da su do sada sprovedene brojne studije i istraživanja, ovi podaci su poznati i postoji bogata sistematika sličnih rezultata. U Tabeli 10. prikazane su srednje vrednosti za radionuklide čije je prisustvo detektovano u uzorcima zemljišta, njihove standardne devijacije kao i opseg u kome se nalaze izmerene vrednosti koncentracije aktivnosti za pojedine radioizotope. U Tabeli 11. su predstavljene prosečne vrednosti ovih veličina, karakteristične za Vojvođansko poljoprivredno zemljište. [6]

Radionuklid	A _{sr} [Bq/kg]	σ _{sr} [Bq/kg]	Opseg[Bq/kg]
^{40}K	569	134	238-1000
^{232}Th	43	11	11,7-70,5
^{238}U	42	20	5-80
^{137}Cs	8,8	6,7	3,04-42,6
^{226}Ra	35,4	8,1	9,7-49,1

Tabela 10. Srednje vrednosti, standardne devijacije, minimalne i maksimalne koncentracije aktivnosti radionuklida u merenim uzorcima zemljišta

Radionuklid	$A_{sr}[\text{Bq/kg}]$	$\sigma_{sr}[\text{Bq/kg}]$	Opseg[Bq/kg]
^{40}K	554	92	238-730
^{232}Th	53,2	8,3	22-64
^{238}U	51,4	9,3	24-69
^{137}Cs	11,8	9,2	1,1-55

Tabela 11. Srednje vrednosti, standardne devijacije, minimalne i maksimalne koncentracije aktivnosti radionuklida merene u uzorcima obradivog zemljišta na teritoriji Vojvodine

Poređenjem rezultata, možemo doći do generalnog zaključka da uzorci zemljišta sa svih lokacija ne ukazuju na povećanje radioaktivnosti, koja bi ugrozila proizvodnju hrane ili vršila negativan uticaj na ljudsko zdravlje. Nema ni značajnijih odstupanja od uobičajenih vrednosti za poljoprivredno zemljište u Vojvodini.

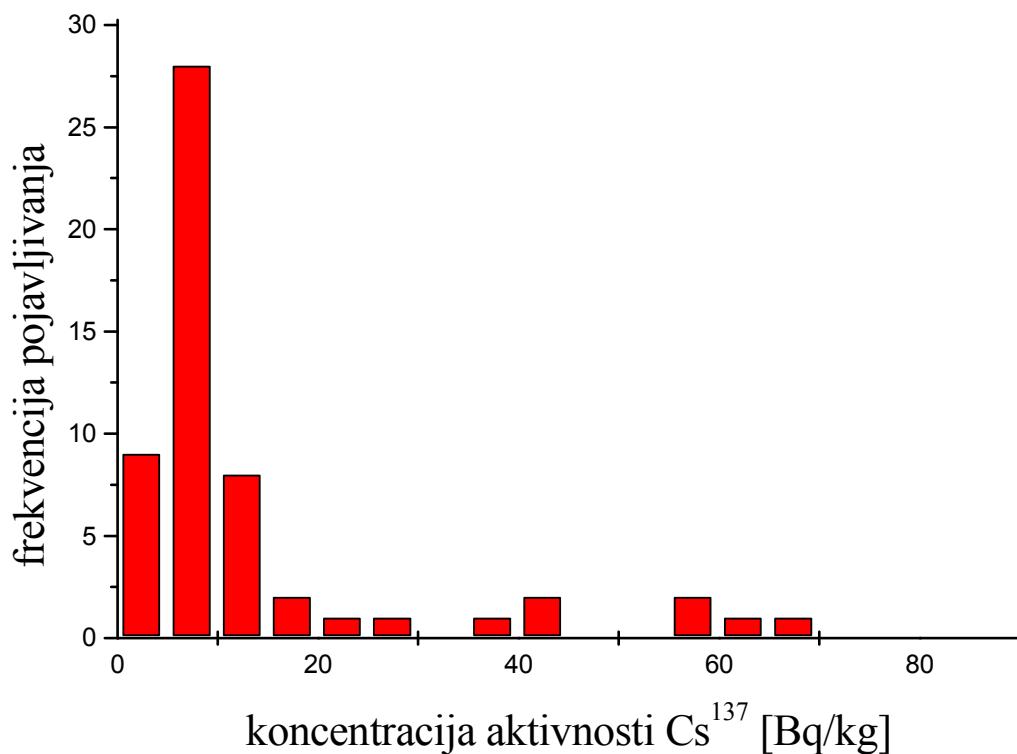
Koncentracija aktivnosti za ^{40}K je u granicama vrednosti karakterističnim za ovaj region. Njegova visoka koncentracija se može tumačiti korišćenjem đubriva koja u velikoj meri sadrže kalijum, koji se dosta zadržava u zemljištu.

U svim uzorcima zemljišta je detektovan radionuklid ^{137}Cs , uglavnom u tragovima. Ovaj veštački radionuklid dominantno potiče od havarije nuklearne elektrane u Černobilu i s obzirom da mu je period poluraspada 30,17 godina, očekivano je njegovo dugo prisustvo u Vojvodini. U Tabeli 9. vidimo da je standardna devijacija velika, kao i razlika između maksimalne i minimalne koncentracije aktivnosti ovog radionuklida. Međutim, ovo su tipične osobine zagadživača veštačkog porekla, kao što je i sam cezijum. Ukoliko posmatramo jedan region, mogu se uočiti neravnомерne distribucije ovog radionuklida, što je posledica procesa ispiranja i relokacije cezijuma. Njegovo usvajanje i migracija u zemljištu u velikoj meri zavisi od fizičkohemijskih karakteristika samog zemljišta, ali i od tipa vegetacije koja se javlja u tom predelu. [7] Od ispitanih 50 uzoraka, koncentracija aktivnosti za Cs izmerena u zemljištu uzorkovanim sa lokacije br. 39 (Bavanište) predstavlja znatno odstupanje od ostalih uzoraka. Ova najviša aktivnost od 42,6 Bq/kg se može objasniti dejstvom vetra koji je uticao na pojačan nanos ovog radionuklida, budući da se radi o lokaciji koja se nalazi na ulazu u Deliblatsku peščaru.

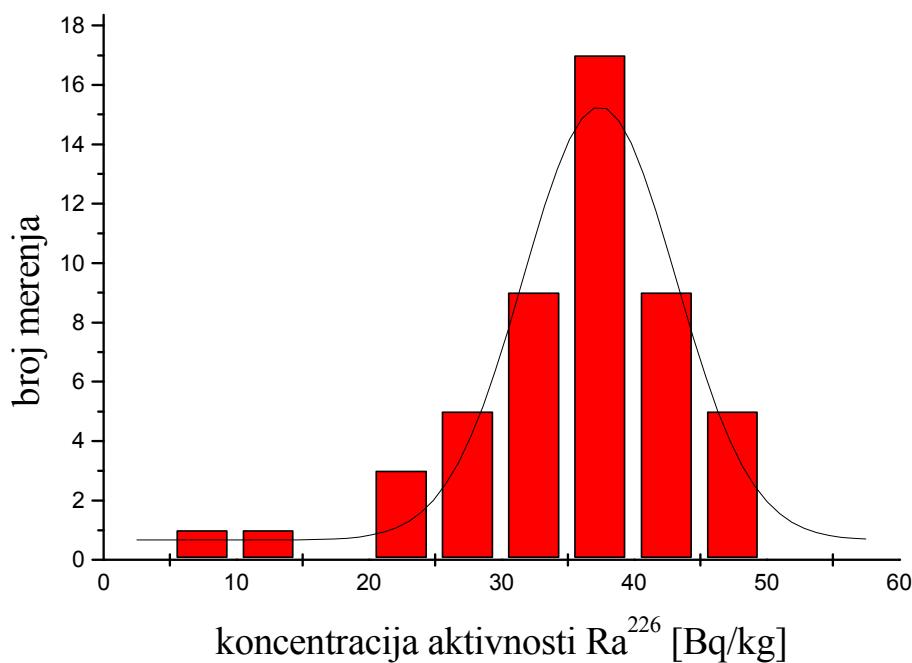
Što se koncentracije prirodnog ^{238}U tiče, sve dobijene vrednosti su u granicama karakterističnim za Vojvođansko zemljište. Blaga odstupanja i povećane koncentracije su primećena kod uzoraka sa lokacija 5,15,20,42,45,47,49. Međutim, uzrok ovome je najverovatnije korišćenje fosfatnih đubriva jer su uzorci uzeti sa oranica. Istraživanjima su utvrđene izvesne razlike u koncentraciji aktivnosti radionuklida uranovog niza između neđubrenog zemljišta i đubrenog u dužem vremenskom periodu. [4] Ove koncentracije urana se ne smatraju zabrinjavajućem, jer su povišenja blaga i nedovoljno visoka da bi ugrozila proizvodnju zdravstveno bezbedne hrane.

Detekcija osiromašenog urana gama spektrometrijskim merenjima, se uglavnom zasniva na odnosu prirodnih radionuklida i ^{238}U . [8] Odnos ^{238}U i ^{232}Th u većini zemljišta je uglavnom 1, što potvrđuje odsustvo kontaminacije ovim radionuklidom. Ukoliko za izvesne uzorke, ovaj odnos premašuje jedinicu, razlog je opet činjenica da su u pitanju oranice sveže nadubrene fosfatnim đubrивима, koja sadrže veće količine ^{238}U . Koncentracija ^{226}Ra se kreće u normalnim granicama i nema bitnijih odstupanja. Odnos ovog radionuklida i ^{238}U se ne menja bitno u uzorcima, tako da možemo da zaključimo da nema indikacije za prisustvo osiromašenog urana.

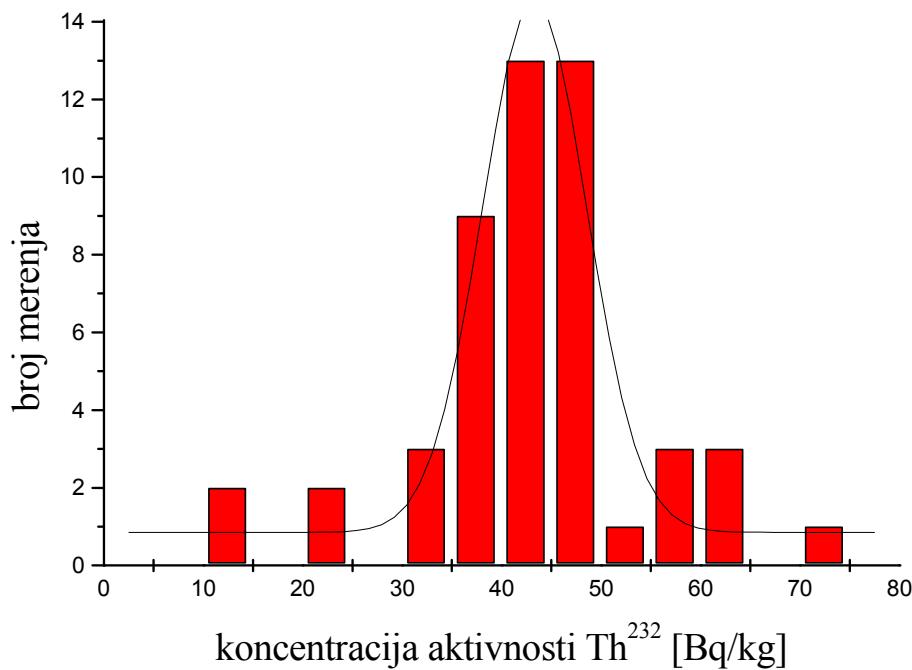
Na slikama 17,18,19,20 i 21 prikazane su raspodele izmerenih koncentracija aktivnosti radionuklida u uzorcima poljoprivrednog zemljišta. Jasno se vidi, da prirodni radionuklidi (članovi prirodnih radioaktivnih nizova i ^{40}K) pokazuju normalnu raspodelu u ispitanim uzorcima, u skladu sa predviđanjima. Nasuprot tome, kod veštačkih radionuklida izraženo je odstupanje u pravilnoj raspodeli, što je karakteristično za njih, pa samim tim i očekivano.



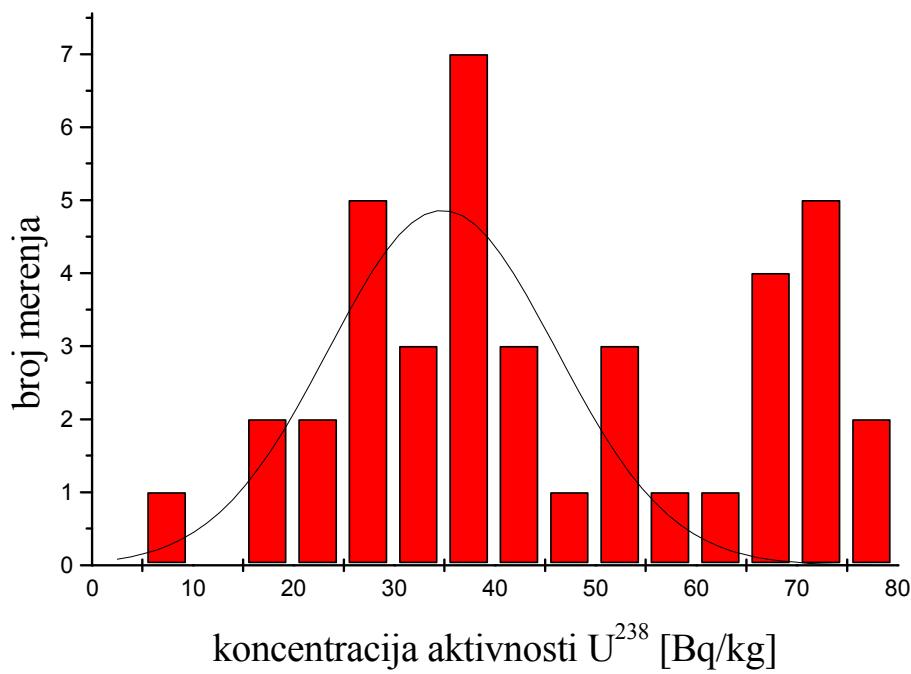
Slika 17. Raspodela koncentracija aktivnosti Cs u uzorcima poljoprivrednog zemljišta



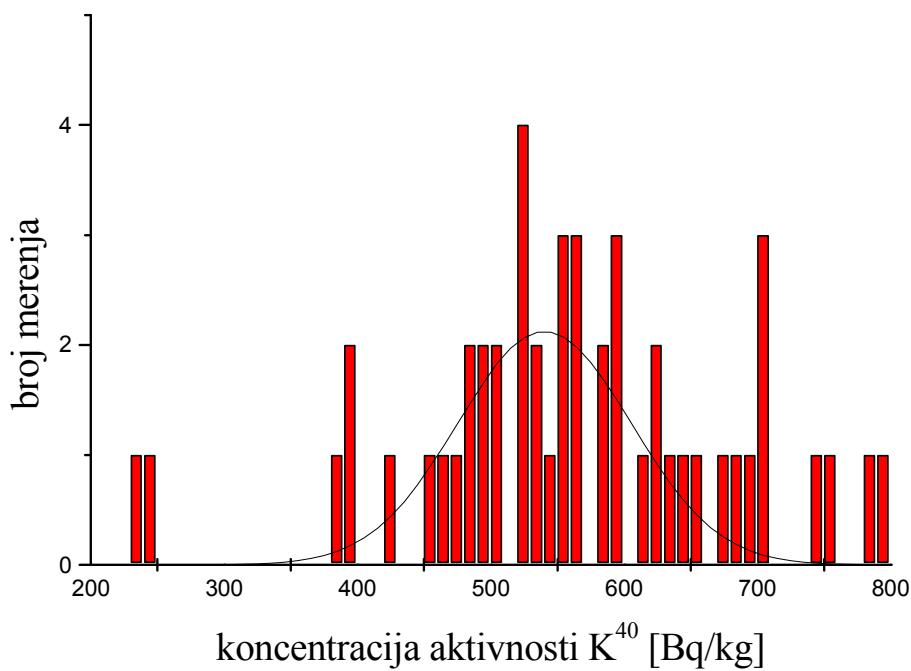
Slika 18. Normalna raspodela koncentracija aktivnosti Ra u uzorcima poljoprivrednog zemljišta



Slika 19. Normalna raspodela koncentracija aktivnosti Th u poljoprivrednom zemljištu

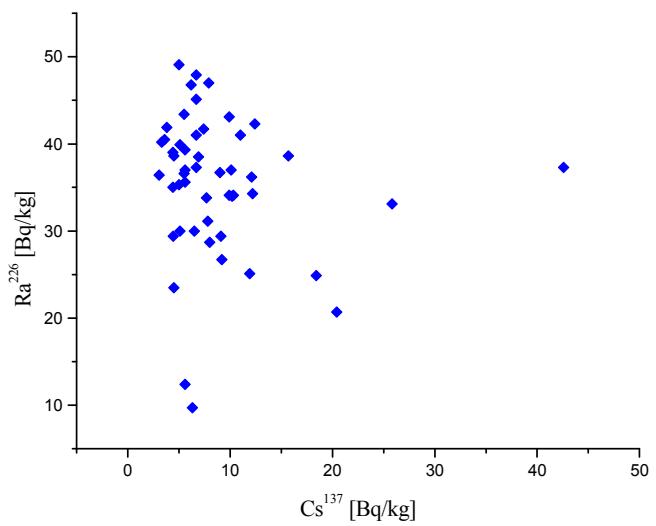
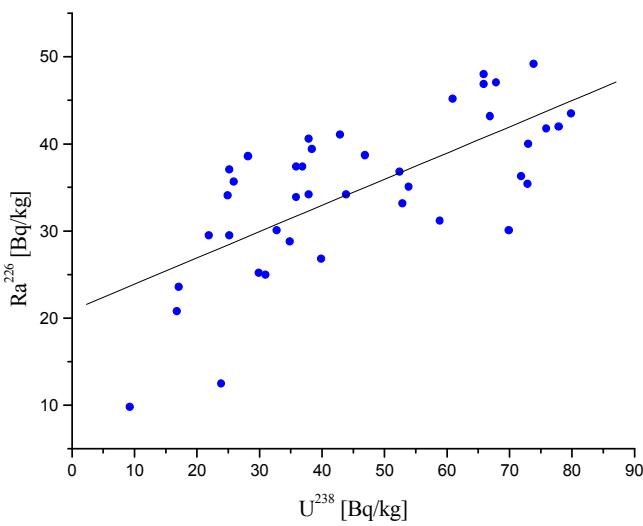
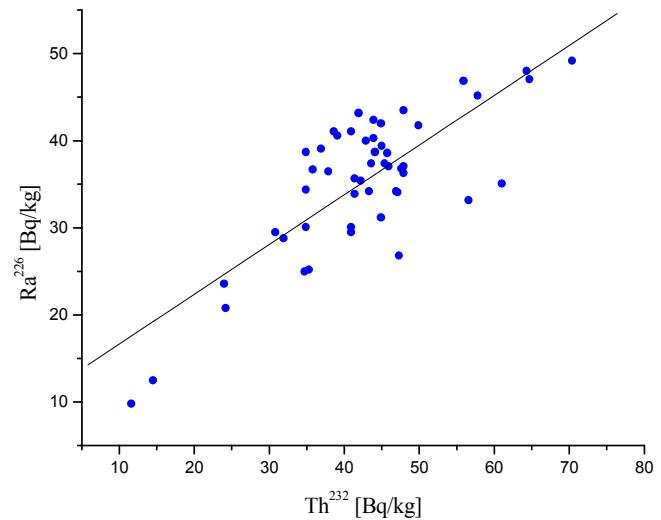
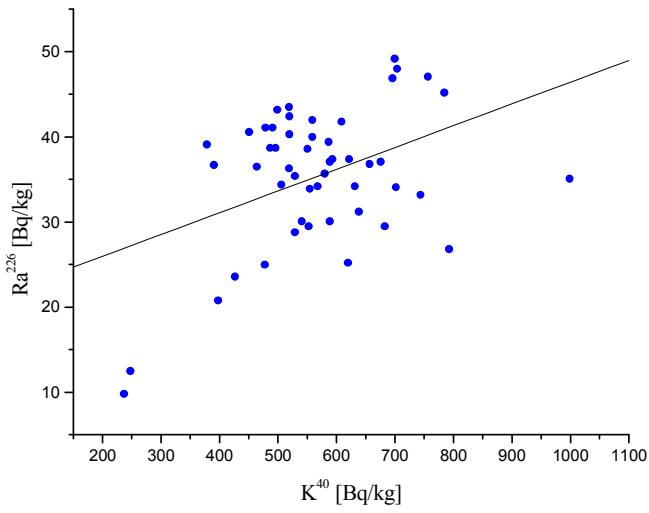


Slika 20. Normalna raspodela koncentracija aktivnosti U u uzorcima poljoprivrednog zemljišta

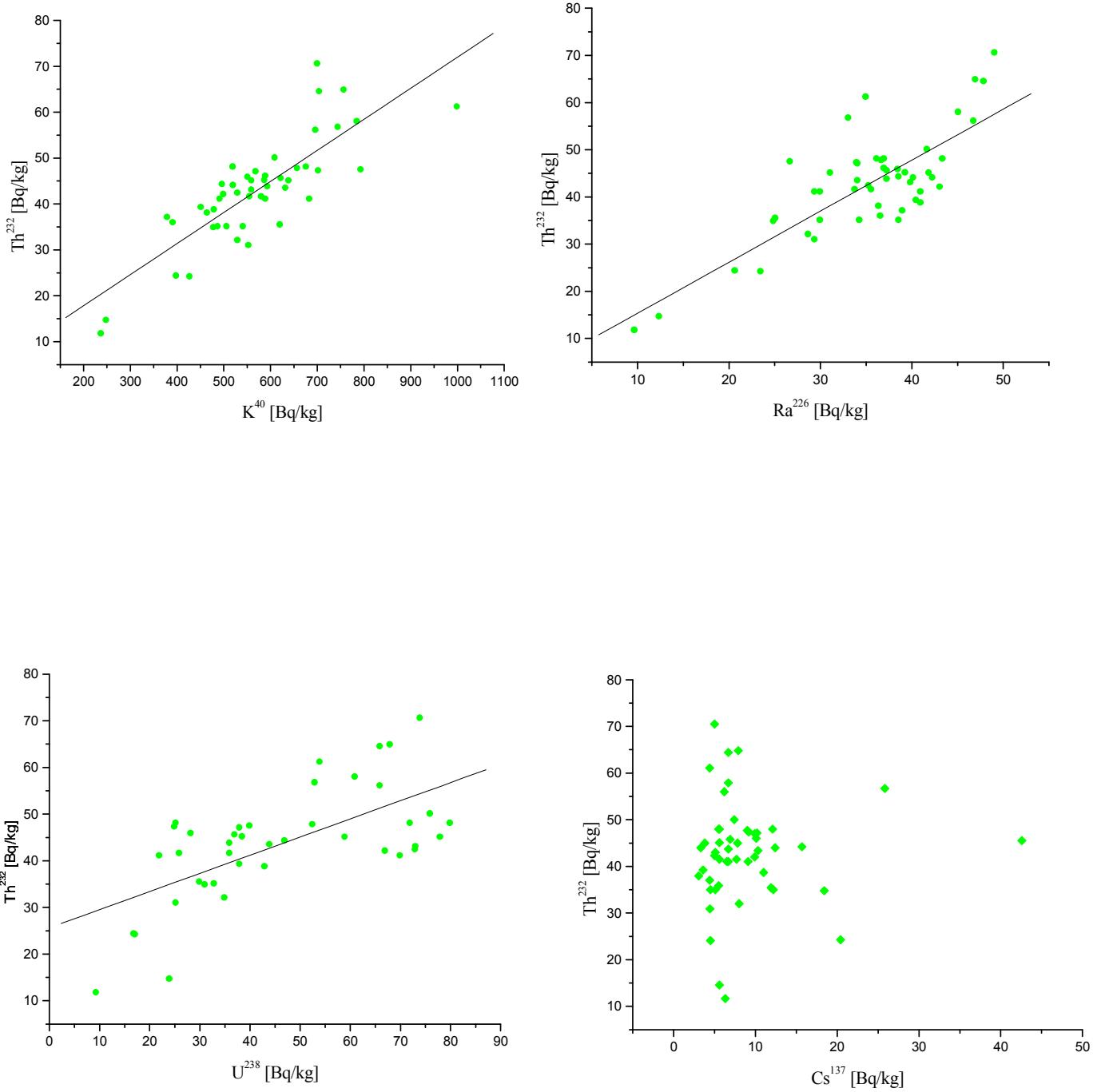


Slika 21. Normalna raspodela koncentracija aktivnosti K⁴⁰ u uzorcima poljoprivrednog zemljišta

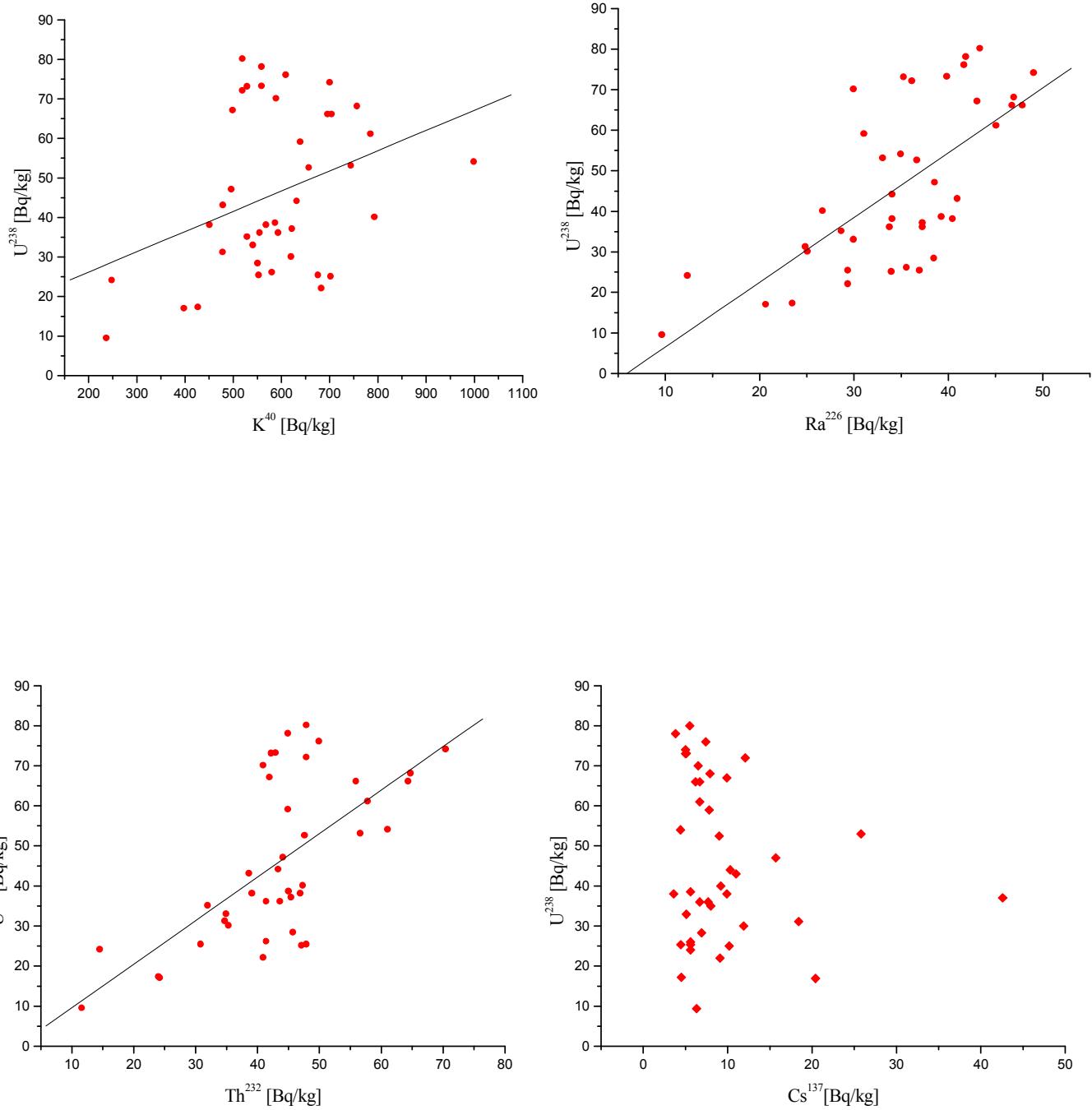
Istraživana je takođe i međusobna zavisnost radionuklida detektovanih u uzorkovanom poljoprivrednom zemljištu. Na slikama 22,23,24, 25 i 26 su prikazani odnosi svih radionuklida.



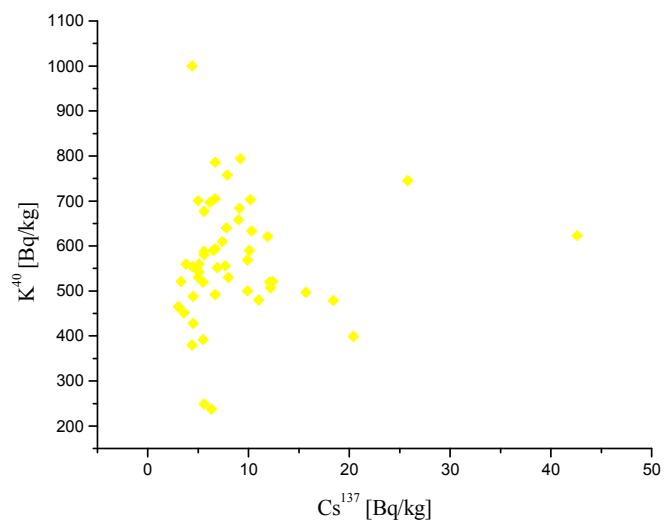
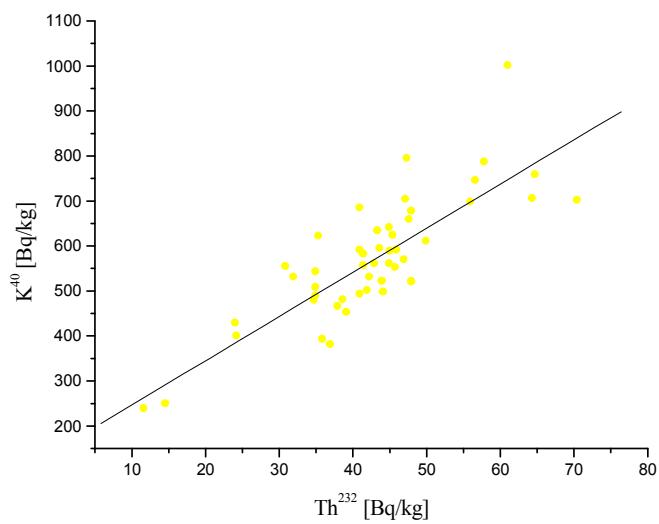
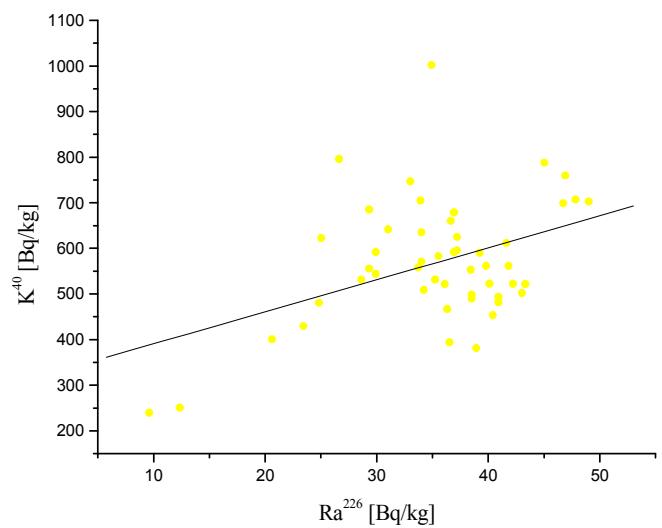
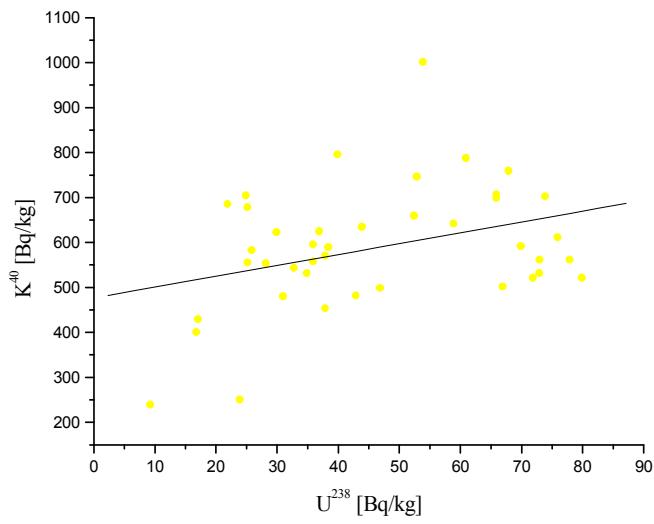
Slika 22. Zavisnost prirodnog radionuklida ^{238}Ra od ^{40}K , ^{232}Th , ^{238}U i ^{137}Cs



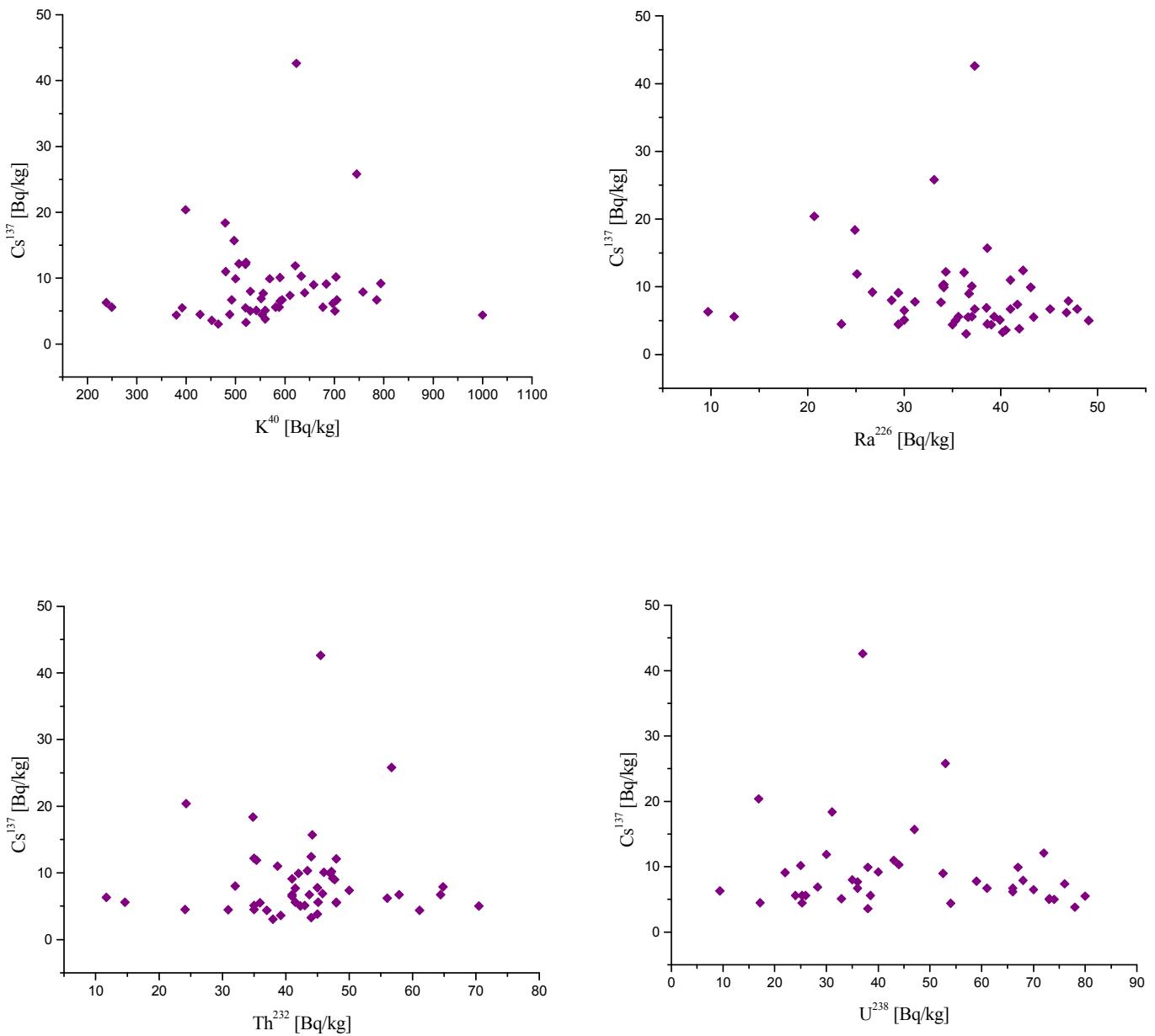
Slika 23. Zavisnost prirodnog radionuklida ^{232}Th od ^{40}K , ^{226}Ra , ^{238}U i ^{137}Cs



Slika 24. Zavisnost prirodnog radionuklida ^{238}U od ^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th i ^{137}Cs



Slika 25. Zavisnost prirodnog radionuklida ^{40}K od ^{238}U , ^{226}Ra , ^{232}Th i ^{137}Cs



Slika 26. Zavisnost veštačkog radionuklida ^{137}Cs od ^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th i ^{238}U

Sa prikazanih grafika moguće je uočiti da u izvesnoj meri postoji linearna zavisnost između koncentracija aktivnosti svih detektovanih prirodnih radionuklida. Nasuprot tome, korelacija koncentracije aktivnosti između veštačkog radionuklida ^{137}Cs i ostalih radionuklida ne postoji. Dobra korelacija između prirodnih radioaktivnih elemenata se može objasniti kako geološkom prošlošću zemljišta, tako i činjenicom da ljudskim aktivnostima nije došlo do povećanja koncentracije jednog od njih na bilo kojoj od lokacija na kojima je zemljište uzorkovano.

Kao dodatak standarnim istraživanjima, u ovom radu izvršeno je i poređenje koncentracije aktivnosti uzoraka u zavisnosti od tipa zemljišta koje se pojavljuje. Rezultati su prikazani u Tabeli 12.

Tip zemljišta		<i>černozem</i>	<i>humogley</i>	<i>fluvisol</i>	<i>pseudoglej</i>	<i>kambisol</i>	<i>solonjec</i>	<i>arenosol</i>	<i>solonček</i>
Broj uzoraka		30	8	4	2	2	2	1	1
^{40}K	$\text{A}_{\text{sr}}[\text{Bq/kg}]$	560	612	641	513,5	703	636,5	249	238
^{137}Cs	$\text{A}_{\text{sr}}[\text{Bq/kg}]$	8,4	11	8,8	12,15	5,85	9,05	5,6	6,3
^{226}Ra	$\text{A}_{\text{sr}}[\text{Bq/kg}]$	38	32	29,5	35,3	48,5	32,6	12,4	9,7
^{232}Th	$\text{A}_{\text{sr}}[\text{Bq/kg}]$	43,5	43	39,7	41,5	67,5	44,15	14,6	11,7
^{238}U	$\text{A}_{\text{sr}}[\text{Bq/kg}]$	46	47,7	36,35	47	70	51,5	24	9,4

Tabela 12. Koncentracija aktivnosti uzoraka kategorizovana prema tipu zemljišta

Jedan od zadataka ovog rada je bilo i upoređivanje rezultata sa merenjima izvršenim pre deset godina, kada su uzorci uzeti sa istih 50 lokacija. Redovne radiološke kontrole su neophodne da bismo preciznije ocenili radioaktivnost zemljišta Vojvodine. Takođe, na ovaj način se prati eliminacija veštačkog radionuklida ^{137}Cs iz ekosistema Vojvodine. Ukoliko

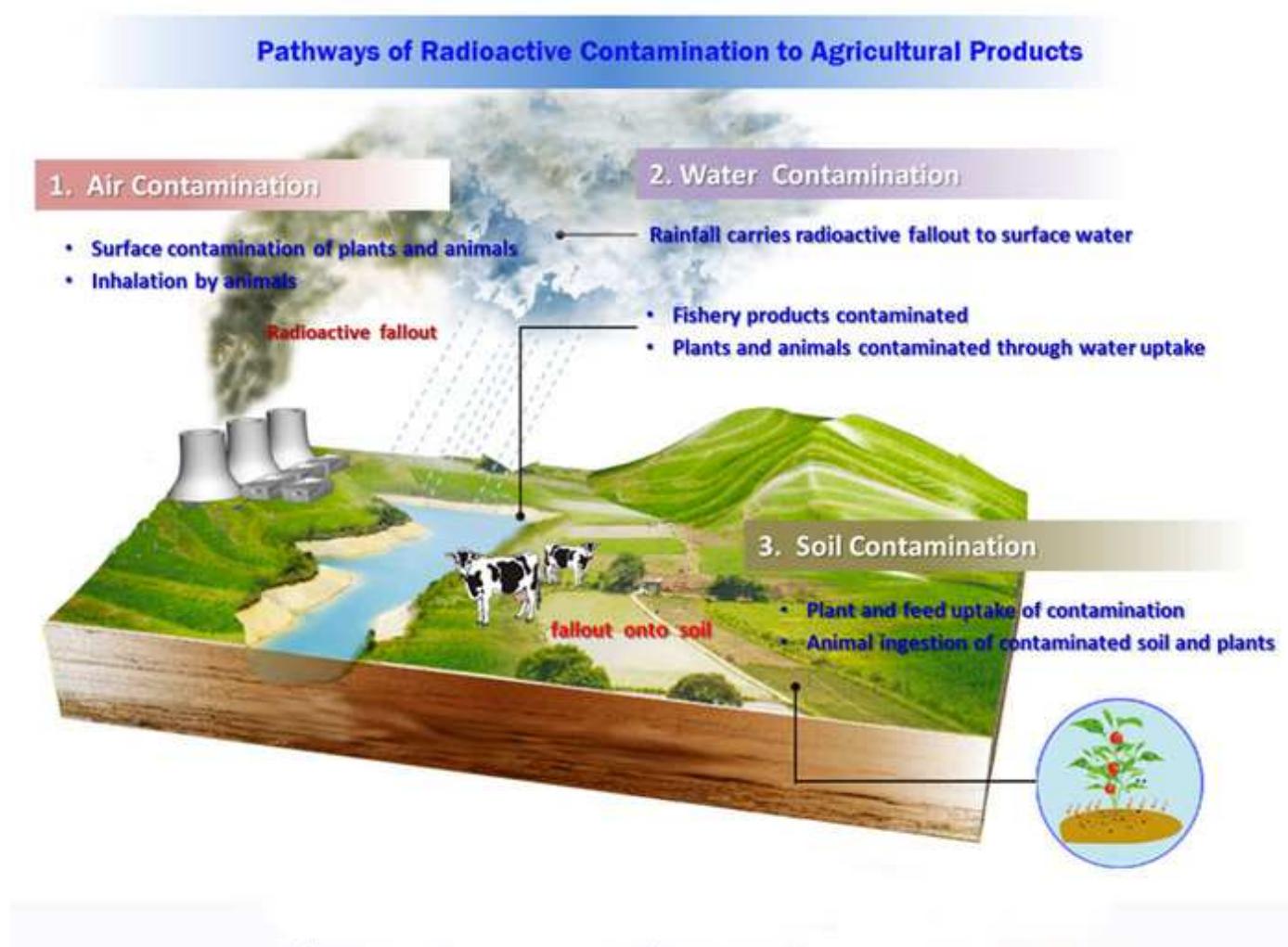
izvršimo poređenje koncentracije aktivnosti radionuklida merenih 2001. godine, sa rezultatima dobijenih ovim eksperimentom. na osnovu podataka iz [13] možemo da zaključimo da:

- Koncentracije aktivnosti ^{137}Cs kod skoro svih uzoraka su manje, što je i bilo za očekivati, budući da je period poluraspada ovog radionuklida 30.17 godina. Kod nekih uzoraka možemo uočiti blaga povišenja, što je verovatno posledica neravnomerne distribucije ovog radionukila.
- Kod ispitanih prirodnih radionuklida ^{238}U , ^{226}Ra , ^{232}Th i ^{40}K se ne primećuju bitnija odstupanja u rezultatima.

5.2. Procena maksimalne koncentracije aktivnosti radionuklida u biljnim kulturama

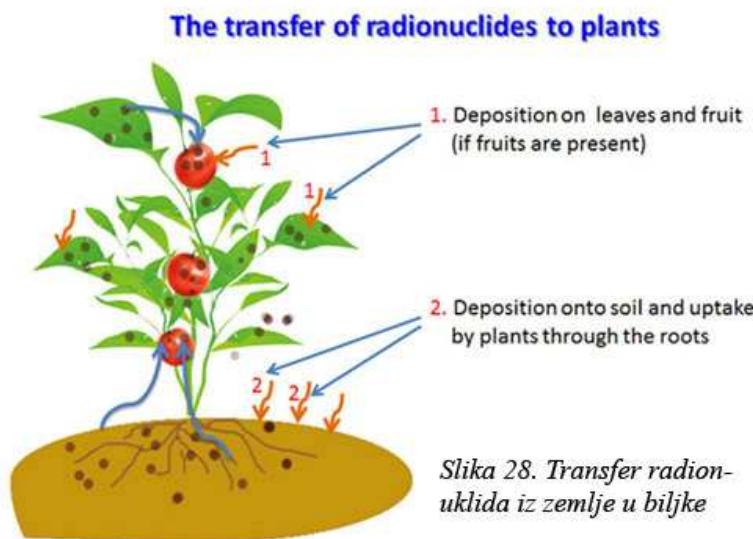
5.2.1. Transfer faktor radionuklida iz zemljišta u biljke

Radionuklidi ispušteni u prirodu doprinose ozračivanju čoveka preko različitih mehanizama. Oni imaju biološke, radiotoksične i radiopatogene efekte na ljudski organizam i zbog toga je neophodno da se utvrdi sadržaj radionuklida u okolini, kao i da se na osnovu dobijenih podataka proračunaju doze koje čovek može da primi. Proračunate doze nam daju osnovu da procenimo potencijalni radijacioni rizik za čoveka.



Slika 27. Mogući načini radioaktivne kontaminacije u prirodi

Svaka promena prirodne radioaktivnosti utiče na narušavanje ravnoteže u lancu ishrane, *zemlja-biljka-životinja-čovek*. Zemljište kao osnovna komponenta ovog ekološkog lanca igra značajnu ulogu u preraspodeli i transferu radionuklida, pa je izuzetno važno da što preciznije izvršimo merenja određivanja koncentracije aktivnosti radionuklida u zemljištu.



Slika 28. Transfer radionuklida iz zemlje u biljke

svega od puteva kontaminacije, s obzirom na to da radionuklidi mogu da se deponuju na lišću i drugim delovima biljke iz vazduha (tzv. folijalna depozicija) ili biljka može da ih usvaja kroz korenov sistem. [10] Na slici 28. je dat šematski prikaz migracije radionuklida iz zemljišta u biljke.

Intezitet akumulacije radioaktivnih materija u biljkama zavisi od više faktora, među kojima kao osnovne moćemo izvojiti:

- *Fizičko-hemijske osobine zemljišta*
- *Biološke osobine biljaka*
- *Fizičko-hemijske osobine radionuklida*

Osnovni fizičko-hemijski pokazatelji zemljišta koji utiču na pokretljivost radionuklida i njihovo usvajanje od biljaka su: kapacitet absorpcije, mehanički sastav, mineraloški sastav, kiselost zemljišta (pH), sadržaj organskih materija i radionuklida u zemljištu.[12]

Sve gajene biljke usvajaju radionuklide preko nadzemnih organa i korenovog sistema. Jačina usvajanja zavisi od: biljne vrste (osobina korenovog sistema, njegove građe, životne aktivnosti i dr.), procesa adsorpcije, desorpcije, i zamene na površini zemljишnjih čestica, vrste radionuklida i drugih ekoloških i unutrašnjih činilaca koji utiču na usvajanje jona od biljaka. [4]

Fizičko-hemijske osobine radionuklida, kao najvažniji faktor, određuje njihovu biološku pokretljivost zemljište-biljka. Akumulacija radionuklida i karakter njihove distribucije po organima biljaka odredjeni su u prvom redu potrebama biljnih organa. U najvećoj meri se u

Za radioekologiju poseban interes predstavlja proučavanje migracije radionuklida u zemljištu kao osnovnom resursu u poljoprivrednoj proizvodnji. Međutim pored toga što su radionuklidi u zemljištu čvrsto vezani, korenov sistem biljaka može da ih usvaja. Usvajanje i akumulacija ovih elemenata od strane biljke je složen proces i zavisi od brojnih parametara, pre

biljkama koncentrišu oni radionuklidi koji predstavljaju elemente potrebne za normalno odvijanje životnih funkcija biljaka.

Da bismo odredili kvantitativnu meru prelaska radionuklida iz jedne karike lanca ishrane u drugu, koriste se transfer faktori. U poslednjih 50 godina, usled testiranja nuklearnog oružja i povećanog ispuštanja nuklearnog otpada u okolinu, zbog čega se povećala količina radionuklida u prirodi, transfer radionuklida se intenzivnije proučava. Međunarodna agencija za atomsku energiju IAEA je napravila široku bazu podataka za vrednosti transfer faktora.

Transfer faktor F_v za unos bilo kog radionuklida iz zemljišta u biljne kulture koje se na tom zemljištu uzgajaju, se definiše kao odnos koncentracije aktivnosti datog radionuklida u biljci [Bq/kg] i koncentracije aktivnosti u zemljištu [Bq/kg], pri čemu se podrazumevaju vrednosti dobijene za sušene uzorke zemlje i biljaka:

$$F_v = \frac{\text{aktivnost radionuklida u suvoj biljci}}{\text{aktivnost radionuklida u suvom zemljištu}} \quad (22)$$

Transfer faktori koji su dati u tabelama priručnika IAEA su vrednosti koje se odnose na rastvorljiva jedinjena koja imaju veću pokretljivost u sistemima zemljište-biljka. Oni zavise od više faktora : fizičkohemijskih karakteristika radionuklida, oblika nataložene padavine ili otpada, vremena koje je proteklo od zagađenja, karakteristika zemljišta, tipa biljne kulture i načina obrade zemljišta. Akumulacija radionuklida u biljnim kulturama koje se najčešće uzgajaju zavisi i od tipa zemljišta. Razlike u transfer faktorima za različite vrste zemljišta može da varira i do dva reda veličine. Uzroci velikih razlika mogu biti i razlika u biološkim karakteristikama pojedinih biljnih vrsta, plodnost zemljišta, trajanje vegetativnog perioda i karakter distribucije korenog sistema u zemljištu. Razlika u akumulaciji preko korenog sistema među različitim biljnim vrstama može biti i za faktor 100. Radionuklidi se najčešće akumuliraju u lišću i stablu, dok se mnogo manje koncentrišu u plodu. [9]

Da bi se uticalo na proizvodnju zdravstveno bezbedne hrane sa niskim sadržajem radioaktivnosti, potrebno je izvršiti procenu maksimalne koncentracije aktivnosti u biljnim kulturama koje bi se uzgajale na datom zemljištu. Ovo se vrši merenjem koncentracije aktivnosti zemljišta i korišćenjem transfer faktora radionuklida iz zemljišta u biljke.

5.2.2. Rezultati merenja i diskusija

Korišćeni su podaci koji su rezultat merenja koncentracije aktivnosti radionuklida u zemljišu sa svih 50 lokacija. Uzimana je njihova srednja vrednost po lokaciji, a iz međunarodnih tablica su preuzete vrednosti transfer faktora radionuklida iz zemljišta u biljku, i to za žitarice, kukuruz, lisnato povrće, mahunarke i ispašu. Pretpostavljeno je da su ovo najzastupljenije kulture koje se gaje u Vojvodini, a takođe su odvojeno posmatrana zrna, stablo i izdanci u slučaju kukuruza i žitarica. Takve procene su izvršene za svaki detektovani radionuklid ponaosob i bitno je istaći da na ovaj način procenjene vrednosti u stvari predstavljaju sadržaj radionuklida u sušenom biljnog materijalu. Zbog prisustva vode, može da se zaključi da je realna vrednost koncentracije aktivnosti radionuklida u svežim biljkama u proseku 5 do 10 puta manja. U tabelama 13,14, 15, 16 i 17 su predstavljeni rezultati za ^{40}K , Cs^{137} , Ra^{226} , Th^{232} i U^{238} .

Lokacija	Koncentracija aktivnosti u zemljištu [Bq/kg]		Biljna kultura			
			žitarice		lisnato povrće	ispaša
			Deo biljke	zrna	stablo i izdanci	lišće
			Transfer faktor F_v	$7,4 \times 10^{-1}$	1,1	1,3
HORGOS	249			184,26	273.9	323,7
PALIĆ	238			176,12	261,8	309,4
ŽEDNIK	392			290,08	431,2	509,6
ALEKSA ŠANTIĆ	380			281,2	418	494
TORNJOŠ	560			414,4	616	728
GAKOVO	497			367,78	546,7	646,1
KULA- LIPAR	552			408,48	607,2	717,6
BEČEJ	794			587,56	873,4	1032,2
SRBOBRAN	697			515,78	766,7	906,1
SRPSKI MILETIĆ	452			334,48	497,2	587,6
BOGOJEVO	428			316,71	470,8	556,4
NADALJ	556			411,44	611,6	722,8
RUSKI KRSTUR	581			429,94	639,1	755,3
PARAGE	588			435,12	646,8	764,4
RIMSKI ŠANČEVI	560			414,4	616	728
ŽABALJ	658			486,92	723,8	855,4
						480,34

MAGLIĆ	465		344,1	511.5	604.5	339.45
KAĆ	530		392,2	583	689	386.9
BAČKO NOVO SELO	554		409,96	609.4	720.2	404.42
BAN. ARANĐELOVO	590		436,6	649	767	430.7
SANAD	1000		740	1100	1300	730
CRNA BARA- ČOKA	684		506,16	752.4	889.2	499.32
KIKINDA	542		401,08	596.2	704.6	395.66
RUSKO SELO	621		459,54	683.1	807.3	453.33
TORDA	590		436,6	649	767	430.7
KUMANE	640		473,6	704	832	467.2
BEGEJCI	786		581,4	864.6	1021.8	573.78
ZRENJANIN	677		500,98	744.7	880.1	494.21
BOKA (SOKOLAC)	633		468,42	696.3	822.9	462.09
ORLOVAT	594		439,56	653.4	772.2	433.62
VRŠAČKI RITOVI	745		551,3	819.5	968.5	543.85
KOZJAK	480		355,2	528	624	350.4
ILANDŽA	521		385,54	573.1	677.3	380.33
IDVOR	703		520,22	773.3	913.9	513.19
PADINA	492		364,08	541.2	639.6	359.16
VRŠAC	701		518,74	771.1	911.3	511.73
CREPAJA	500		370	550	650	365
DELIBLATO- ČARDAK	399		295,26	438.9	518.7	291.27
BAVANIŠTE	623		461,02	685.3	809.9	454.79
PETROV.- TRANŽAMENT	705		521,7	775.5	916.5	514.65
ŠID	521		385,54	573.1	677.3	380.33
RIVICA	520		384,8	572	676	379.6
RUMA- IRIG	758		560,92	833.8	985.4	553.34
INĐIJA	488		361,12	536.8	634.4	356.24
MOROVIĆ	520		384,8	572	676	379.6
VIŠNJIĆEVO	507		375,18	557.7	659.1	370.11
SREMSKA MITROVICA	530		392,2	583	689	386.9
PECİNCI- POPINCI	569		421,06	625.9	739.7	415.37
DONJI TOVARNIK	610		451,4	671	793	445.3
OBEDSKA BARA	479		354,46	526.9	622.7	349.67
Srednja vrednost	569,18		421,19	626,01	739,93	415,50

Tabela 13. Transfer faktor radionuklida K^{40} iz zemljišta u biljke

Lokacija	Koncentracija aktivnosti u zemljištu [Bq/kg]		Biljna kultura							
			žitarice		kukuruz		lisnato povrće	mahunarke		
			Deo biljke	zrna	stablo i izdanci	zrna	stablo i izdanci	lišće		
			Transfer faktor F_v	$2,9 \cdot 10^{-2}$	$1,5 \times 10^{-1}$	$3,3 \times 10^{-2}$	$7,3 \times 10^{-2}$	$6,0 \times 10^{-1}$		
Koncentracija aktivnosti ^{137}Cs u biljci [Bq/kg]										
HORGOS	5.60			0.16	0.84	1.85	0.41	3.36	0.22	
PALIĆ	6.30			0.18	0.95	2.08	0.46	3.78	0.25	
ŽEDNIK	5.50			0.16	0.83	1.82	0.40	3.30	0.22	
ALEKSA ŠANTIĆ	4.40			0.13		0.66	1.45	0.32	2.64	0.18
TORNJOŠ	3.80			0.11	0.57	1.25	0.28	2.28	0.15	
GAKOVO	15.70			0.46	2.36	5.18	1.15	9.42	0.63	
KULA- LIPAR	6.90			0.20	1.04	2.28	0.50	4.14	0.28	
BEČEJ	9.20			0.27	1.38	3.04	0.67	5.52	0.37	
SRBOBRAN	6.20			0.18	0.93	2.05	0.45	3.72	0.25	
SRPSKI MILETIĆ	3.60			0.10		0.54	1.19	0.26	2.16	0.14
BOGOJEVO	4.49			0.13	0.67	1.48	0.33	2.69	0.18	
NADALJ	7.70			0.22	1.16	2.54	0.56	4.62	0.31	
RUSKI KRSTUR	5.60			0.16		0.84	1.85	0.41	3.36	0.22
PARAGE	5.60			0.16	0.84	1.85	0.41	3.36	0.22	
RIMSKI ŠANČEVI	5.10			0.15		0.77	1.68	0.37	3.06	0.20
ŽABALJ	9.00			0.26	1.35	2.97	0.66	5.40	0.36	
MAGLIĆ	3.04			0.09	0.46	1.00	0.22	1.82	0.12	
KAĆ	8.00			0.23	1.20	2.64	0.58	4.80	0.32	
BAČKO NOVO SELO	4.45			0.13		0.67	1.47	0.32	2.67	0.18
BAN. ARANDELOVO	6.50			0.19		0.98	2.15	0.47	3.90	0.26
SANAD	4.40			0.13	0.66	1.45	0.32	2.64	0.18	
CRNA BARA- ČOKA	9.10			0.26		1.37	3.00	0.66	5.46	0.36
KIKINDA	5.10			0.15	0.77	1.68	0.37	3.06	0.20	
RUSKO SELO	11.90			0.35	1.79	3.93	0.87	7.14	0.48	
TORDA	10.10			0.29	1.52	3.33	0.74	6.06	0.40	
KUMANE	7.80			0.23	1.17	2.57	0.57	4.68	0.31	

BEGEJCI	6.70		0.19	1.01	2.21	0.49	4.02	0.27
ZRENJANIN	5.60		0.16	0.84	1.85	0.41	3.36	0.22
BOKA (SOKOLAC)	10.30		0.30	1.55	3.40	0.75	6.18	0.41
ORLOVAT	6.70		0.19	1.01	2.21	0.49	4.02	0.27
VRŠAČKI RITOVI	25.80		0.75		3.87	8.51	1.88	15.48
KOZJAK	11.00		0.32	1.65	3.63	0.80	6.60	0.44
ILANDŽA	12.40		0.36	1.86	4.09	0.91	7.44	0.50
IDVOR	10.20		0.30	1.53	3.37	0.74	6.12	0.41
PADINA	6.70		0.19	1.01	2.21	0.49	4.02	0.27
VRŠAC	5.00		0.15	0.75	1.65	0.37	3.00	0.20
CREPAJA	9.90		0.29	1.49	3.27	0.72	5.94	0.40
DELIBLATO- ČARDAK	20.40		0.59	3.06	6.73	1.49	12.24	0.82
BAVANIŠTE	42.60		1.24	6.39	14.06	3.11	25.56	1.70
PETROV.- TRANŽAMENT	6.70		0.19		1.01	2.21	0.49	4.02
ŠID	3.30		0.10	0.50	1.09	0.24	1.98	0.13
RIVICA	5.50		0.16	0.83	1.82	0.40	3.30	0.22
RUMA- IRIG	7.90		0.23	1.19	2.61	0.58	4.74	0.32
INĐIJA	4.50		0.13	0.68	1.49	0.33	2.70	0.18
MOROVIĆ	12.10		0.35	1.82	3.99	0.88	7.26	0.48
VIŠNJIĆEVO	12.20		0.35	1.83	4.03	0.89	7.32	0.49
SREMSKA MITROVICA	5.00		0.15		0.75	1.65	0.37	3.00
PEĆinci- POPinci	9.90		0.29		1.49	3.27	0.72	5.94
DONJI TOVARNIK	7.40		0.21		1.11	2.44	0.54	4.44
OBEDSKA BARA	18.40		0.53	2.76	6.07	1.34	11.04	0.74
Srednja vrednost	8,83		0,26	1,32	2,91	0,64	5,30	0,35

Tabela 14. Transfer faktor radionuklida ^{137}Cs iz zemljišta u biljke

Lokacija	Koncentracija aktivnosti u zemljištu [Bq/kg]	Deo biljke	Biljna kultura					
			žitarice		kukuruz		lisnato povrće	mahunarke
			zrna	stablo i izdanci	zrna	stablo i izdanci	lišće	zrna i mahune
		Transfer faktor F_v	$1,7 \times 10^{-2}$	$3,6 \times 10^{-2}$	$2,4 \times 10^{-3}$	$1,8 \times 10^{-2}$	$9,1 \times 10^{-2}$	$1,4 \times 10^{-2}$
HORGOS	12.4		0.21	0.45	0.03	0.22	1.13	0.17
PALIC	9.7		0.16	0.35	0.02	0.17	0.88	0.14
ZEDNIK	36.6		0.62	1.32	0.09	0.66	3.33	0.51
ALEKSA ŠANTIĆ	39		0.66	1.40	0.09	0.70	3.55	0.55
TORNJOŠ	41.9		0.71	1.51	0.10	0.75	3.81	0.59
GAKOVO	38.6		0.66	1.39	0.09	0.69	3.51	0.54
KULA- LIPAR	38.5		0.65	1.39	0.09	0.69	3.50	0.54
BEČEJ	26.7		0.45	0.96	0.06	0.48	2.43	0.37
SRBOBRAN	46.8		0.80	1.68	0.11	0.84	4.26	0.66
SRPSKI MILETIĆ	40.5		0.69	1.46	0.10	0.73	3.69	0.57
BOGOJEVO	23.5		0.40	0.85	0.06	0.42	2.14	0.33
NADALJ	33.8		0.57	1.22	0.08	0.61	3.08	0.47
RUSKI KRSTUR	35.6		0.61	1.28	0.09	0.64	3.24	0.50
PARAGE	39.3		0.67	1.41	0.09	0.71	3.58	0.55
RIMSKI ŠANČEVI	39.9		0.68	1.44	0.10	0.72	3.63	0.56
ŽABALJ	36.7		0.62	1.32	0.09	0.66	3.34	0.51
MAGLIĆ	36.4		0.62	1.31	0.09	0.66	3.31	0.51
KAĆ	28.7		0.49	1.03	0.07	0.52	2.61	0.40
BAČKO NOVO SELO	29.4		0.50	1.06	0.07	0.53	2.68	0.41
BAN. ARANDELOVO	30.0		0.51	1.08	0.07	0.54	2.73	0.42
SANAD	35		0.60	1.26	0.08	0.63	3.19	0.49
CRNA BARA- ČOKA	29.4		0.50	1.06	0.07	0.53	2.68	0.41
KIKINDA	30.0		0.51	1.08	0.07	0.54	2.73	0.42
RUSKO SELO	25.1		0.43	0.90	0.06	0.45	2.28	0.35
TORDA	37		0.63	1.33	0.09	0.67	3.37	0.52
KUMANE	31.1		0.53	1.12	0.07	0.56	2.83	0.44
BEGEJCI	45.1		0.77	1.62	0.11	0.81	4.10	0.63
ZRENJANIN	37.0		0.63	1.33	0.09	0.67	3.37	0.52

BOKA (SOKOLAC)	34.1		0.58	1.23	0.08	0.61	3.10	0.48
ORLOVAT	37.3		0.63	1.34	0.09	0.67	3.39	0.52
VRŠAČKI RITOVI	33.1		0.56	1.19	0.08	0.60	3.01	0.46
KOZJAK	41		0.70	1.48	0.10	0.74	3.73	0.57
ILANDŽA	42.3		0.72	1.52	0.10	0.76	3.85	0.59
IDVOR	34.0		0.58	1.22	0.08	0.61	3.09	0.48
PADINA	41		0.70	1.48	0.10	0.74	3.73	0.57
VRŠAC	49.1		0.83	1.77	0.12	0.88	4.47	0.69
CREPAJA	43.1		0.73	1.55	0.10	0.78	3.92	0.60
DELIBLATO- ČARDAK	20.7		0.35	0.75	0.05	0.37	1.88	0.29
BAVANIŠTE	37.3		0.63	1.34	0.09	0.67	3.39	0.52
PETROV.- TRANŽAMENT	47.9		0.81	1.72	0.11	0.86	4.36	0.67
ŠID	40.2		0.68	1.45	0.10	0.72	3.66	0.56
RIVICA	43.4		0.74	1.56	0.10	0.78	3.95	0.61
RUMA- IRIG	47.0		0.80	1.69	0.11	0.85	4.28	0.66
INĐIJA	38.6		0.66	1.39	0.09	0.69	3.51	0.54
MOROVIĆ	36.2		0.62	1.30	0.09	0.65	3.29	0.51
VIŠNJIĆEVO	34.3		0.58	1.23	0.08	0.62	3.12	0.48
SREMSKA MITROVICA	35.3		0.60	1.27	0.08	0.64	3.21	0.49
PEĆinci- POPINCI	34.1		0.58	1.23	0.08	0.61	3.10	0.48
DONJI TOVARNIK	41.7		0.71	1.50	0.10	0.75	3.79	0.58
OBEDSKA BARA	24.9		0.42	0.90	0.06	0.45	2.27	0.35
Srednja vrednost	35.41		0.60	1.27	0.08	0.64	3.22	0.50

Tabela 15. Transfer faktor radionuklida ^{226}Ra iz zemljišta u biljke

Lokacija	Koncentracija aktivnosti u zemljištu [Bq/kg]		Biljna kultura					
			žitarice		kukuruz		lisnato povrće	mahunare
			Deo biljke	zrna	stablo i izdanci	zrna	stablo i izdanci	lišće
			Transfer faktor F_v	$2,1 \times 10^{-3}$	$6,1 \times 10^{-3}$	$6,4 \times 10^{-5}$	$1,8 \times 10^{-3}$	$1,2 \times 10^{-3}$
Lokacija		Koncentracija aktivnosti ^{232}Th u biljci [Bq/kg]						
HORGOS	14.60			0.03	0.09	0.0009	0.03	0.18
PALIĆ	11.70			0.02	0.07	0.0007	0.02	0.14
ŽEDNIK	35.90			0.08	0.22	0.0023	0.06	0.43
ALEKSA ŠANTIĆ	37.00			0.08	0.23	0.0024	0.07	0.44
TORNJOŠ	45.00			0.09	0.27	0.0029	0.08	0.54
GAKOVO	44.20			0.09	0.27	0.0028	0.08	0.53
KULA- LIPAR	45.80			0.10	0.28	0.0029	0.08	0.55
BEČEJ	47.40			0.10	0.29	0.0030	0.09	0.57
SRBOBRAN	56.00			0.12	0.34	0.0036	0.10	0.67
SRPSKI MILETIĆ	39.20			0.08	0.24	0.0025	0.07	0.47
BOGOJEVO	24.10			0.05	0.15	0.0015	0.04	0.29
NADALJ	41.50			0.09	0.25	0.0027	0.07	0.50
RUSKI KRSTUR	41.50			0.09	0.25	0.0027	0.07	0.50
PARAGE	45.10			0.09	0.28	0.0029	0.08	0.54
RIMSKI ŠANČEVI	43.00			0.09	0.26	0.0028	0.08	0.52
ŽABALJ	47.70			0.10	0.29	0.0031	0.09	0.57
MAGLIĆ	38.00			0.08	0.23	0.0024	0.07	0.46
KAĆ	32.00			0.07	0.20	0.0020	0.06	0.38
BAČKO NOVO SELO	30.90			0.06	0.19	0.0020	0.06	0.37
BAN. ARANĐELOV O	41.00			0.09	0.25	0.0026	0.07	0.49
SANAD	61.10			0.13	0.37	0.0039	0.11	0.73
CRNA BARA- ČOKA	41.00			0.09	0.25	0.0026	0.07	0.49
KIKINDA	35.00			0.07	0.21	0.0022	0.06	0.42
RUSKO SELO	35.40			0.07	0.22	0.0023	0.06	0.42
TORDA	46.00			0.10	0.28	0.0029	0.08	0.55
KUMANE	45.00			0.09	0.27	0.0029	0.08	0.54
BEGEJCI	57.90			0.12	0.35	0.0037	0.10	0.69
								0.031

ZRENJANIN	48.00		0.10	0.29	0.0031	0.09	0.58	0.025
BOKA (SOKOLAC)	43.40		0.09	0.26	0.0028	0.08	0.52	0.023
ORLOVAT	43.70		0.09	0.27	0.0028	0.08	0.52	0.023
VRŠAČKI RITOVI	56.70		0.12	0.35	0.0036	0.10	0.68	0.030
KOZJAK	38.70		0.08	0.24	0.0025	0.07	0.46	0.021
ILANDŽA	44.00		0.09	0.27	0.0028	0.08	0.53	0.023
IDVOR	47.20		0.10	0.29	0.0030	0.08	0.57	0.025
PADINA	41.00		0.09	0.25	0.0026	0.07	0.49	0.022
VRŠAC	70.50		0.15	0.43	0.0045	0.13	0.85	0.037
CREPAJA	42.00		0.09	0.26	0.0027	0.08	0.50	0.022
DELIBLATO- ČARDAK	24.30		0.05	0.15	0.0016	0.04	0.29	0.013
BAVANIŠTE	45.50		0.10	0.28	0.0029	0.08	0.55	0.024
PETROV.- TRANŽAMEN T	64.40		0.14	0.39	0.0041	0.12	0.77	0.034
ŠID	44.00		0.09	0.27	0.0028	0.08	0.53	0.023
RIVICA	48.00		0.10	0.29	0.0031	0.09	0.58	0.025
RUMA- IRIG	64.80		0.14	0.40	0.0041	0.12	0.78	0.034
INĐIJA	35.00		0.07	0.21	0.0022	0.06	0.42	0.019
MOROVIĆ	48.00		0.10	0.29	0.0031	0.09	0.58	0.025
VIŠNJIĆEVO	35.00		0.07	0.21	0.0022	0.06	0.42	0.019
SREMSKA MITROVICA	42.30		0.09	0.26	0.0027	0.08	0.51	0.022
PEĆinci- POPinci	47.00		0.10	0.29	0.0030	0.08	0.56	0.025
DONJI TOVARNIK	50.00		0.11	0.31	0.0032	0.09	0.60	0.027
OBEDSKA BARA	34.80		0.07	0.21	0.0022	0.06	0.42	0.018
Srednja vrednost	42.83		0.09	0.26	0.0027	0.08	0.51	0.0023

Tabela 16. Transfer faktor radionuklida ^{232}Th iz zemljišta u biljke

Lokacija	Koncentracija aktivnosti u zemljištu [Bq/kg]		Biljna kultura						
			žitarice		kukuruz		lisnato povrće	mahunarke	
			Deo biljke	zrna	stablo i izdanci	zrna	stablo i izdanci	lišće	
	Transfer faktor F_v		$6,2 \times 10^{-3}$	$2,7 \times 10^{-2}$	$1,5 \times 10^{-2}$	$7,8 \times 10^{-3}$	$2,0 \times 10^{-2}$	$2,2 \times 10^{-3}$	
Koncentracija aktivnosti ^{238}Uu biljci [Bq/kg]									
HORGOS	24			0.15	0.65	0.36	1.87	0.48	0.053
PALIĆ	9.4			0.06	0.25	0.14	0.73	0.19	0.021
ŽEDNIK	< 20								
ALEKSA ŠANTIĆ	< 21								
TORNJOŠ	78		0.48	2.11	1.17	6.08	1.56	0.172	
GAKOVO	47		0.29	1.27	0.71	3.67	0.94	0.103	
KULA-LIPAR	28.3		0.18	0.76	0.42	2.21	0.57	0.062	
BEČEJ	40		0.25	1.08	0.60	3.12	0.80	0.088	
SRBOBRAN	66		0.41	1.78	0.99	5.15	1.32	0.145	
SRPSKI MILETIĆ	38		0.24	1.03	0.57	2.96	0.76	0.084	
BOGOJEVO	17.2		0.11	0.46	0.26	1.34	0.34	0.038	
NADALJ	36		0.22	0.97	0.54	2.81	0.72	0.079	
RUSKI KRSTUR	26.0		0.16	0.70	0.39	2.03	0.52	0.057	
PARAGE	38.5		0.24	1.04	0.58	3.00	0.77	0.085	
RIMSKI ŠANČEVI	73.1		0.45	1.97	1.10	5.70	1.46	0.161	
ŽABALJ	52.5		0.33	1.42	0.79	4.10	1.05	0.116	
MAGLIĆ	< 19								
KAĆ	35		0.22	0.95	0.53	2.73	0.70	0.077	
BAČKO NOVO SELO	25.3		0.16	0.68	0.38	1.97	0.51	0.056	
BAN. ARANĐELOV O	70		0.43	1.89	1.05	5.46	1.40	0.154	
SANAD	54		0.33	1.46	0.81	4.21	1.08	0.119	
CRNA BARA-ČOKA	22.0		0.14	0.59	0.33	1.72	0.44	0.048	
KIKINDA	32.9		0.20	0.89	0.49	2.57	0.66	0.072	
RUSKO SELO	30		0.19	0.81	0.45	2.34	0.60	0.066	
TORDA	< 22								
KUMANE	59		0.37	1.59	0.89	4.60	1.18	0.130	

BEGEJCI	61		0.38	1.65	0.92	4.76	1.22	0.134
ZRENJANIN	25.3		0.16	0.68	0.38	1.97	0.51	0.056
BOKA (SOKOLAC)	44		0.27	1.19	0.66	3.43	0.88	0.097
ORLOVAT	36		0.22	0.97	0.54	2.81	0.72	0.079
VRŠAČKI RITOVI	53		0.33	1.43	0.80	4.13	1.06	0.117
KOZJAK	43		0.27	1.16	0.65	3.35	0.86	0.095
ILANDŽA	< 22							
IDVOR	25		0.16	0.68	0.38	1.95	0.50	0.055
PADINA	< 21							
VRŠAC	74		0.46	2.00	1.11	5.77	1.48	0.163
CREPAJA	67		0.42	1.81	1.01	5.23	1.34	0.147
DELIBLATO- ČARDAK	16.9		0.10	0.46	0.25	1.32	0.34	0.037
BAVANIŠTE	37		0.23	1.00	0.56	2.89	0.74	0.081
PETROV.- TRANŽAME NT	66		0.41	1.78	0.99	5.15	1.32	0.145
ŠID	< 21							
RIVICA	80		0.50	2.16	1.20	6.24	1.60	0.176
RUMA- IRIG	68		0.42	1.84	1.02	5.30	1.36	0.150
INDIJA	< 20							
MOROVIĆ	72		0.45	1.94	1.08	5.62	1.44	0.158
VIŠNJIĆEVO	< 22							
SREMSKA MITROVIC	73		0.45	1.97	1.10	5.69	1.46	0.161
PEĆinci- POPINCI	38		0.24	1.03	0.57	2.96	0.76	0.084
DONJI TOVARNIK	76		0.47	2.05	1.14	5.93	1.52	0.167
OBEDSKA BARA	31.1		0.19	0.84	0.47	2.43	0.62	0.068
Srednja vrednost	54.53		0.34	1.24	0.69	3.59	0.92	0.101

Tabela 17. Transfer faktor radionuklida ^{238}U iz zemljišta u biljke

Procena transfer faktora iz zemljišta u biljne kulture koje bi se na njemu uzgajale izvršene su na osnovu izmerenih koncentracija datih radionuklida i predstavljaju maksimalne vrednosti koje bi se mogle naći u sušenim biljnim delovima kultura uzgajanih na uzorkovanom poljoprivrednom zemljištu. Vrednosti koncentracija aktivnosti prirodnih radioizotopa u zemljištu prevashodno zavise od količine tih radioizotopa prisutnih u stenama od kojih je zemljište nastalo. Koncentracije radionuklida preračunate za sveže biljke (5-10 puta manje vrednosti) su niže od izvedenih koncentracija u važećoj zakonskoj regulativi za vodu koja se konzumira u većim količinama od hrane biljnog porekla i potvrđuju pretpostavku o zdravstvenoj bezbednosti uzgajanja hrane na našem području.[6]

Radionuklidi se u većoj meri akumuliraju u listovima i korenju biljnih kultura i stoga je neophodno pratiti radioaktivnost poljoprivrednog zemljišta, pogotovo ako se uzgajaju povrtarske kulture (lisnato i korenasto povrće). Akumuliranje radionuklida u krmnom bilju i ispaši predstavlja potencijalnu opasnost za povećanje radionuklida u mesu životinja. Za procenu doze koju bi stanovništvo primilo ingestijom proizvedene hrane, neophodno je poznavanje prosečnog godišnjeg unosa za svaku vrstu namirnica. Budući da statistički zavod ne poseduje ove informacije za region Vojvodine, nismo u mogućnosti da izvršimo adekvatne proračune.

6. ZAKLJUČAK

Gama spektrometrija je metoda koja je primenjena u ispitivanju radioaktivnosti poljoprivrednog zemljišta na području AP Vojvodine u 2010. godini. Sva merenja su rađena u niskofonskim uslovima. γ spektrometrija se pokazuje kao veoma pogodna fizička metoda za određivanje sadržaja prirodnih radionuklida, jer je nedestruktivna, jednostavna i brza, moguće je analizirati velike uzorke i iz jednog čina merenja moguće je odrediti koncentracije svih γ emitera.

Na osnovu priloženih rezultata možemo uočiti prisustvo različitih radionuklida u svih 50 uzoraka zemljišta, bez obzira na njihovo poreklo i način korišćenja. Vršeno je određivanje koncentracije aktivnosti ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{40}K i ^{137}Cs , kao i procenjivanje maksimalne koncentracije aktivnosti radionuklida u biljnim kulturama koje bi se uzgajale na datom poljoprivrednom zemljištu.

Proučavanje procesa transporta prirodnih radionuklida iz zemljišta u biljke je veoma značajno sa tri aspekta:

- *Značaj za biljke-* Nivo koncentracije aktivnosti prirodnih radionuklida u biljkama može da ima uticaj na fiziološke promene (povećan prinos, uvećani plodovi) i metabolizam biljaka.
- *Značaj za zemljište-* Zemljiše se može dekontamirati raznim agrotehničkim i drugim merama. Da bi se zemljiše prečistilo, potrebno je uzgajati biljke koje najviše absorbuju radionuklide.
- *Značaj za čoveka-* Poznavanjem koncentracije aktivnosti odnosno transfer faktora zemljište- biljka, kao i prosečne ishrane stanovništva, neophodno je proceniti ingestionе doze koje čovek putem hrane unese u organizam, odnosno odrediti koliki je radijacioni rizik usled ishrane.

Možemo izvesti generalni zaključak da ni kod jednog uzorka zemljišta nije prisutna povećana radioaktivnost, koja bi mogla da ugrozi proizvodnju zdrave hrane ili vršila negativan uticaj na ljudski organizam. Nema ni značajnijih odstupanja od uobičajenih vrednosti za poljoprivredno zemljište u Vojvodini.

Koncentracija aktivnosti za ^{40}K je u granicama vrednosti karakterističnim za ovaj region. Njegova visoka koncentracija se može tumačiti korišćenjem đubriva koja u velikoj meri sadrže kalijum, koji se dosta zadržava u zemljištu.

Što se koncentracije prirodnog ^{238}U tiče, sve dobijene vrednosti su u granicama karakterističnim za Vojvođansko zemljište. Blaga odstupanja i povećane koncentracije su primećene kod uzoraka sa lokacija 5, 15, 20, 42, 45, 47, 49. Međutim, uzrok ovome je najverovatnije korišćenje fosfatnih đubriva, jer su uzorci zemljišta uzeti sa oranica. Ove koncentracije urana se ne smatraju zabrinjavajućim, jer su povišenja blaga i nedovoljno visoka da bi ugrozila proizvodnju zdravstveno bezbedne hrane.

U svim uzorcima zemljišta je detektovan radionuklid ^{137}Cs , uglavnom u tragovima. Od ispitanih 50 uzoraka, koncentracija aktivnosti za Cs izmerena u zemljištu uzorkovanim sa lokacije br. 39 (Bavanište) predstavlja znatno odstupanje od ostalih uzoraka. Ova najviša aktivnost od 42,6 Bq/kg se može objasniti dejstvom vetra koji je uticao na pojačan nanos ovog radionuklida, budući da se radi o lokaciji koja se nalazi na ulazu u Deliblatsku peščaru.

Koncentracija ^{226}Ra se kreće u normalnim granicama i nema bitnijih odstupanja. Odnos ovog radionuklida i ^{238}U se ne menja bitno u uzorcima, tako da možemo da zaključimo da nema indikacije za prisustvo osiromašenog uranijuma.

Na osnovu vrednosti za transfer faktore najčešće uzgajanih poljoprivrednih kultura u Vojvodini, izračunate su koncentracije aktivnosti radionuklida u biljkama. Možemo da vidimo da se radionuklidi u većoj meri akumuliraju u listovima i korenju biljnih kultura i stoga je neophodno pratiti radioaktivnost poljoprivrednog zemljišta, pogotovo ako se uzgajaju povrtarske kulture (lisnato i korenasto povrće). Akumuliranje radionuklida u krmnom bilju i ispaši predstavlja potencijalnu opasnost za povećanje radionuklida u mesu životinja.

Za procenu doze koju bi stanovništvo primilo ingestijom proizvedene hrane, neophodno je poznavanje prosečnog godišnjeg unosa za svaku vrstu namirnica. Budući da statistički zavod ne poseduje ove informacije za region Vojvodine, nismo u mogućnosti da izvršimo adekvatne proračune.

U cilju dobijanja što preciznijih ocena radioaktivnosti zemljišta u Vojvodini, neophodno je nastaviti sa ovakvim merenjima i uzorkovanjem na što većem broju lokacija. Na ovaj način se vrši radiološka kontrola zemljišta, a takođe se prati i eliminacija radionuklida ^{137}Cs iz ekosistema ovog regiona. U cilju smanjenja radionuklida poreklom iz fosfatnih đubriva i radi sprečavanja njihovih akumulacija koje bi prešle u biljke, savetuje se da se poljoprivrednici konsultuju sa stučnjacima. Takođe je neophodno vršiti češću kontrolu radioaktivnosti, ukoliko je teren na kom se nalazi poljoprivredno zemljište pogodan za akumuliranje radionuklida, usled dejstva vetra, plavljenja reka i kanala, površinskih i pozemnih voda itd.

7. LITERATURA

- [1] Lazar Marinkov, *Osnovi nuklearne fizike*, Prirodno-matematički fakultet u Novom Sadu, Novi Sad, 1976.
- [2] J. Slivka, I. Bikit, M. Vesković, Lj. Čonkić, *Gama spektrometrija, specijalne metode i primene*, Univerzitetski udžbenik, Novi Sad, 2000.
- [3] Lj. Janković, M. Mišović, S. Dželajlija, *Gama spektrometrijsko određivanje nivoa aktivnosti ^{137}Cs u hrani*, XX Simpozijum Jugoslovenskog društva za zaštitu od zračenja, Zbornik radova, 1999.
- [4] M. Grubišić, D. Stevanović, M. Stojanović, V. Vuletić, G. Pantelić, *Uticaj dugogodišnjeg dubrenja na radioaktivnost zemljišta*, Institut za medicinu rada i radiološku zaštitu, Beograd
- [5] I. Bikit, J. Slivka, Lj. Čonkić, M. Krmr, M. Vesković, N. Todorović, E. Varga, S. Ćurčić, D. Mrđa, *Radioactivity of the soil in Vojvodina*, Journal of Environmental Radioactivity 78 (2005) 11-19
- [6] I. Bikit, N. Todorović, D. Mrđa, S. Forkapić, N. Jovančević, J. Nikolov, J. Hansman, *Završni izveštaj- Merenje radioaktivnosti zemljišta na teritoriji AP Vojvodine u 2010. godini*, Laboratorija za ispitivanje uzoraka i doze ionizujućeg i nejonizujućeg zračenja, PMF, Novi Sad, 2010.
- [7] M. Momčilov, S. Dragović, *Radioaktivnost zemljišta severozapadnog dela Stare Planine*, Institut za primenu nuklearne energije, Beograd
- [8] M. Janković, D. Todorović, M. Savanović, S. Nikolić, N. Vockić, *Radioactivitz of the soil in Republic of Srpska*, Radiation and Enviromental Protection Department, Vinča Institute, Beograd
- [9] Handbook of parameter values for the prediction of radionuclide transfer in terrestrial and freshwater environments INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY-TRS-DRAFT document 2009
- [10] J. Nikolić, D. Todorović, M. Janković, M. Radenković, J. Joksić, *Zemlja-biljka transfer faktor u okolini termoelektrana*, Institut Vinča
- [11] M.Krmr, J. Slivka, Ž. N.Žikić, I. Bikit, Lj. Čonkić, *Međusobni odnosi radionuklida u zemljištu*, XX Simpozijum Jugoslovenskog društva za zaštitu od zračenja, Zbornik radova, 1999.
- [12] L. Filip, *Gama-spektrometrija u određivanju transporta prirodnih radionuklida iz zemljišta u biljke*, Diplomski rad, PMF Novi Sad, 1995.
- [13] I. Bikit, S. Forkapić, J. Nikolov, N. Todorović, D. Mrđa, *Radioactivity of the Agricultural Soil in Northern Province of Serbia, Vojvodina*, World Academy of Science, Engineerign and Technology, 2011
- [14] <http://www.pgt.com/category/high-purity-germanium.html>

8. BIOGRAFIJA



Vladica Nikolić je rođena 21.juna 1986. godine u Novom Sadu. Osnovnu školu „Svetozar Marković Toza“ i Gimnaziju „Isidora Sekulić“ završila je u Novom Sadu. Prirodno-matematički fakultet, na Univerzitetu u Novom Sadu (Departman za fiziku, obrazovni profil Diplomirani fizičar) upisala je 2005.godine, a završila je 2011. godine. Bila je na jednogodišnjem studijskom boravku u Italiji u okviru programa razmene studenata „Campus Europae“. Sve ispite predviđene planom i programom studijske grupe Diplomirani fizičar, položila je sa prosečnom ocenom 9.41.

UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

Redni broj:

RBR

Identifikacioni broj:

IBR

Tip dokumentacije:

TD

Tip zapisa:

TZ

Vrsta rada:

VR

Autor:

AU

Mentor:

MN

Naslov rada:

NR

Jezik publikacije:

JP

Jezik izvoda:

JI

Zemlja publikovanja:

ZP

Uže geografsko područje:

UGP

Godina:

GO

Izdavač:

IZ

Mesto i adresa:

MA

Fizički opis rada:

FO

Naučna oblast:

NO

Naučna disciplina:

ND

Predmetna odrednica/ ključne reči:

Monografska dokumentacija

Tekstualni štampani materijal

Diplomski rad

Vladica Nikolić, br. dos. 111/05

Dr. Nataša Todorović, vandredni profesor PMF-a u Novom Sadu

Radioaktivnost zemljišta Vojvodine

srpski (latinica)

srpski/engleski

Srbija

Vojvodina

2011

Autorski reprint

Prirodno-matematički fakultet, Trg Dositeja Obradovića 4,

Novi Sad

(6 / 80/17/28)

Fizika

Nuklearna fizika

Radioaktivnost zemljišta, gama spektrometrija, transfer faktori

PO

UDK

Čuva se:

ČU

Važna napomena:

VN

Izvod:

IZ

Biblioteka departmana za fiziku, PMF-a u Novom Sadu

nema

U ovom radu predstavljeni su rezultati gama spektrometrijske analize 50 poljoprivrednih uzoraka uzetih u Vojvodini, u cilju utvrđivanja da li ima povećane radioaktivnosti u zemljištu.

Takođe, izvršena je procena potencijalne kontaminacije poljoprivrednih proizvoda usled radioaktivnosti, korišćenjem transfer faktora radionuklida iz zemljišta u biljku. Možemo da zaključimo da izmerene koncentracije aktivnosti ne bi trebalo da ugroze proizvodnju hrane i nema indikacija prisustva osiromašenog urana. Savetuje se dalji monitoring regionala.

Datum prihvatanja teme od NN

veća:

DP

Datum odbrane:

DO

10. 08 2011.

Članovi komisije:

KO

Predsednik:

dr. Maja Stojanović, docent, PMF, Novi Sad

član:

dr. Nataša Todorović, vanredni profesor, PMF, Novi Sad

član:

dr. Dušan Mrđa, docent, PMF, Novi Sad

UNIVERSITY OF NOVI SAD
FACULTY OF SCIENCE AND MATHEMATICS

KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number:

ANO

Identification number:

INO

Document type:

DT

Type of record:

TR

Content code:

CC

Author:

AU

Mentor/comentor:

MN

Title:

TI

Language of text:

LT

Language of abstract:

LA

Country of publication:

CP

Locality of publication:

LP

Publication year:

PY

Publisher:

PU

Publication place:

PP

Physical description:

PD

Scientific field:

SF

Scientific discipline:

SD

Subject/ Key words:

SKW

UC

Holding data:

HD

Monograph publication

Textual printed material

Final paper

Vladica Nikolić, 111/05

Nataša Todorović, PhD, asistent professor, FCM, Novi Sad

Radioactivity of the soil in Vojvodina

Serbian (Latin)

English

Serbia

Vojvodina

2011

Author's reprint

Faculty of Science and Mathematics, Trg Dositeja Obradovića

4, Novi Sad

(6 / 80/17/28)

Physics

Nuclear physic

Radioactivity of the soil in Vojvodina, Gamma spectrometry,

Transfer factors

Library of Department of Physics, Trg Dositeja Obradovića 4

Note: none
N

Abstract: In this paper we presented the results of gamma spectrometric analysis of 50 agricultural soil samples taken from the region of Vojvodina, in order to determine if there is increased radioactivity. Also, we have estimated a potential contamination of agricultural products due to the soil radioactivity, using values of the soil to plant radionuclide transfer factors. We can conclude that measured activity concentrations should not endanger the food production and there is no indication of traces of depleted uranium. Future monitoring of the region is advised.

AB

Accepted by the Scientific Board:

ASB

Defended on: 10. 08 2011.

DE

Thesis defend board:

DB

President:

Maja Stojanović, PhD, docent, FCM, Novi Sad

Member:

Nataša Todorović, PhD, asistent professor, FCM, Novi Sad

Member:

Dušan Mrđa, Ph.D, docent, FCM, Novi Sad