



UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNO-MATEMATIČKI
FAKULTET
DEPARTMAN ZA FIZIKU



Procena transfer faktora i sadržaja radionuklida u korenastim povrćima

- MASTER RAD -

Mentor:

Prof. dr Jovana Nikolov

Kandidat:

Žigmond Sečedi

Novi Sad, 2020.

Predgovor

Master rad je urađen pod mentorstvom dr. Jovane Nikolov, vanrednog profesora Prirodno-matematičkog fakulteta, Univerziteta u Novom Sadu. Eksperimentalni deo rada je urađen u Laboratoriji Katedre za nuklearnu fiziku, na Departmanu za fiziku, Prirodno-matematičkog Fakulteta u Novom Sadu.

Ovom prilikom se zahvaljujem prof. Jovani Nikolov za pomoć, podršku i korisne sugestije koje mi je dala u toku izrade master rada.

Zahvaljujem se Andreju Vraničara i dr. Jan Hansmanu, za podršku pri praktičnom izvođenju rada.

Zahvaljujem se kolegi Igoru Markoviću na podršci pri pisanju rada.

Zahvaljujem se Renati i Imretu Nađ, takođe i Laslo Friš-u, za obezbeđivanje uzoraka korenastih povrća, zemljišta i đubriva.

Zahvaljujem se mom bratu Balintu Sečedi-ju za fotografisanje.

Zahvaljujem se mojim roditeljima Juditi i Ferencu Sečedi-ju za podršku tokom studiranja.

U Bečeju, 14.09.2020.

Žigmond Sečedi

Sadržaj:

1.	Uvod.....	4
2.	Radionuklidi i živi organizam.....	5
2.1	Dejstvo jonizujućeg zračenja na ljudski organizam	5
2.2	Izvori jonizujućeg zračenja	7
2.3	Bioindikatori radiokontaminacije.....	9
2.4	Radionuklidi u korenastim povrćima	10
3.	Eksperimentalni deo	13
3.1	Sakupljanje uzoraka.....	13
3.2	Priprema uzoraka korenastih povrća	15
3.3	Određivanje aktivnosti	16
3.4	Eksperimentalno određivanje kalibracione krive efikasnosti detektora	22
3.5	Korekcija samoapsorpcije pomoću programa EFFTRAN-a.....	26
3.5.1	Podaci o detektoru	26
3.5.2	Podaci o izvoru.....	28
3.5.3	Podaci o efikasnosti detektora	31
3.5.4	Određivanje krive kalibracije pomoću programa CurveExpert Professional-a....	32
4.	Rezultati i diskussija	36
4.1	Koncentracija radionuklida u zemljištu	36
4.2	Koncentracije aktivnosti radionuklida u korenastim povrćima i procena transfer faktora	43
5.	Zaključak.....	52
6.	Literatura	54
7.	Biografija.....	56
Dokumentacija		

1. Uvod

„Lečiti nastalu bolest isto je kao, bušiti bunar kada je čovek žedan.“ – kineska poslovica

Današnje civilizacije su bazirane na ljudima koji su (manje-više) zdravi. Kada je čovek bolestan ne može da obavlja stvari, koje zahtevaju mentalni napor, kapacitet i/ili fizičku snagu, tj. očuvanje zdravlja je najbitnije.

Sa stanovišta nuklearne fizike, očuvanje zdravlja možemo postići minimiziranjem izloženosti ljudi jonizujućem zračenju (ALARA princip - *As low as reasonable achievable*). Primenom pravila zaštite od jonizujućeg zračenja, može se sprečiti pojava štetnih genetskih mutacija koje mogu dovesti do postepenog ili ubrzanog propadanja, a u težim slučajevima i do smrti ćelije.

Radioizotopi su prisutni u životnoj sredini u prirodnim koncentracijama aktivnosti, ali su tokom prošlosti dejstvom različitih akcidenata pojedini veštački proizvedeni radioizotopi dospeli do zemljišta. Takođe, svakodnevnim aktivnostima čovek doprinosi povećanju koncentracije aktivnosti prirodnih radioizotopa pre svega upotreboti veštačkih đubriva koja najčešće sadrže i određenu količinu radioizotopa u svom sastavu. Cilj ovog master rada je identifikacija i određivanje koncentracije aktivnosti radioizotopa u nekoliko vrsta korenastog povrća, i ispitivanje mogućeg unosa u ljudski organizam. Povrće tj. korenaste biljke radioizotope usvajaju iz zemljišta na kome se uzgajaju, pa je značajno bilo proveriti i sadržaj radionuklida u zemljištu na kome je analizirano povrće uzgajano. Pored prirodnih radionuklida koji su prisutni u zemljištu, upotreboti veštačkih đubriva može se značajno povećati sadržaj prirodnih radioizotopa u zemljištu a oni kasnije mogu dospeti i u biljne kulture koje se na njemu uzgajaju. Još jedan od ciljeva ovog rada bio je i da se eksperimentalno odrede *transfer faktori* – osobina biljaka da usvoji radioizotope prisutne u zemljištu. Kao krajnji rezultat može se proceniti i u kojoj meri je bezbedna upoteba povrća uzgajanog na ispitivanom zemljištu koje je đubreno analiziranim veštačkim đubrivom.

2. Radionuklidi i živi organizam

2.1 Dejstvo jonizujućeg zračenja na ljudski organizam

Energija koju radioaktivno zračenje preda živoj materiji je dovoljna za ionizaciju atoma i molekula. Sa ovako izazvanim cepanjem hemijskih veza, dolazi do poremećaja bio-hemijskih procesa, samim tim i do oštećenja organa i tkiva. Pokazalo se da ljudski organizam ne reaguje na fluktuacije pozadinskog zračenja, znači organizam to podnosi. Tako da u slučaju radiobiološkog oštećenja uzimamo samo te slučajeve u obzir, gde je organizam primio značajno veće doze zračenja od pozadinskog.

Radio-biološko oštećenje možemo klasifikovati po sledećim kriterijumima:

- ❖ Po delu organizma koji je primio dozu zračenja:
 - ozračenje celog организма
 - ozračenje organa, tkiva
- ❖ Po osobini организма koji je primio dozu i u kome se desilo oštećenje:
 - somatično (organizam u kome se desilo oštećenje odgovara organizmu koji je primio dozu zračenja)
 - genetičko (oštećeni organizam nije primio dozu zračenja, već nasledio oštećenje)
- ❖ Po pojavi efekata na ljudski organizam:
 - „trenutni” (oštećenje se javlja posle kratkog vremenskog intervala nakon ozračenja, od nekoliko sati do 3 meseca)
 - „spori” (oštećenje organizma se javlja nekoliko godina kasnije posle ozračenja)
- ❖ Po načinu pojave efekata na ljudski organizam:
 - deterministički (oštećenje se uvek javlja)
 - stohastički (pojava oštećenja ima svoju verovatnoću)

Moramo spomenuti da genetske posledice zračenja ne možemo utvrditi, ni nakon istraživanja na ljudima i njihovim naslednicima koji su preživeli eksploziju termonuklearnih bombi u Hiroshimi i Nagasakiju.

Za određivanje nastanka determinističkog oštećenja organizma prvo moramo definisati apsorbovanu dozu zračenja.

Apsorbovana doza zračenja (D) je energija zračenja ($\Delta E [J]$) koju materija primi po jedinici mase ($\Delta m [kg]$). Jedinica apsorbovane doze zračenja ja Gy.

$$D = \frac{\Delta E}{\Delta m} \quad , \quad 1 \text{ Gy} = \frac{1 \text{ J}}{1 \text{ kg}} \quad (1)$$

Granična vrednost pojave determinističkog oštećenja ljudskog организма je 0.25 Gy. Letalna doza je 8-10 Gy.

Manifestacija oštećenja ne zavisi samo od apsorbovane doze zračenja, već i od osobine čestice zračenja i od osobine tkiva koje primi zračenje. Određivanje mehanizma pojave oštećenja na ovaj način jako je složeno, zbog toga uvodimo drugi pojam, koji se bazira na empirijskom opisu zračenja koji će u datom tipu tkiva izazvati dato oštećenje.

Ekvivalentna doza radijacije (H) je doza koja će izazvati dato biološko oštećenje tkiva nezavisno od tipa ionizujućeg zračenja. Jedinica za ekvivalentnu dozu je Sv.[1]

$$H = D \cdot w_r \quad (2)$$

gde su:

- D – apsorbovana doza zračenja
- w_r – faktor kvaliteta zračenja, koji ima različitu vrednost za različite vrste zračenja:
 - x-zraci, γ -zraci, β -zraci: 1
 - neutroni (u zavisnosti od njihove energije): 2-10
 - teške nanelektrisane čestice (npr. α -čestice): 10-20

Kratak opis simptoma koji se mogu javiti za određene vrednosti ekvivalentne doze radioaktivnog zračenja po *Merck Manual-u*:[2]

- 0,05 – 0,2 Sv: povećanje verovatnoće genetičke abnormalnosti, kancera, ako ovo nije utvrđeno
- 0,2-0,5 Sv: pad broja limfocita
- 0,5-1 Sv: glavobolja, mučnina, zbog privremenog pada imunog sistema moguće su infekcije, privremeni sterilitet kod muškarca
- 1-2 Sv: mala doza, mučnina, povraćanje, koje traje najmanje 24h, 1-2 nedelje traje umor, moguće infekcije, kod muškarca privremena neplodnost, kod žene spontani pobačaj ili prevremeni porođaj; nakon 30 dana stopa mortaliteta je 10%
- 2-3 Sv: srednja doza, mučnina, povraćanje, koje traje 1-2 dana, opadanje kose, umor, pad broja limfocita, kod žene sterilitet, rehabilitacija traje nekoliko meseci, nakon 30 dana stopa mortaliteta je 35%
- 3-4 Sv: ozbiljna doza, krvarenje u ustima, ispod kože, unutar bubrega, stopa mortaliteta 50%
- 4-6 Sv: akutna doza, nakon 2h iste simptomi kao kod 3-4 Sv samo jače, stopa mortaliteta 60% zbog unutrašnjeg krvarenja ili infekcije, rehabilitacija je moguća ali min. traje godinu dana
- 6-10 Sv: totalno uništenje limfocita, transfuzijom postoji mogućnost spašavanja pacijenta, nakon 15 min pojavljuju se infekcije, unutrašnje krvarenje, stopa mortaliteta skoro 100% za max. 2 nedelje, ali ako i preživi pacijent ostaće u invalidnom stanju
- 10-50 Sv: umor, intenzivno povraćanje, dezorientacija, konfuzija, delirijum, koma, i smrt za max 7 dana
- Više od 50 Sv: 1964 – jedan radnik je primio 100 Sv nakon nesreće, i umro je za 49h; 1958 – nakon nesreće eksperimenta *Cecil Kelley* primila 60-180 Sv i umrla nakon 36h

Stohastičko oštećenje, npr. leukemija i razni tipovi kancera, nemaju ograničenu dozu odnosno nemaju prag doze kada se mogu ispoljiti, jer svaka, čak i najmanja doza ionizujućeg zračenja može da prouzrokuje biološke promene, tj. ovi efekti imaju svoje verovatnoće pojave. Istraživanja su pokazala da se verovatnoća pojave kancera povećava za 5% uz svaki 1 Sv ekvivalentne doze zračenja.[1,3]

Ako je već došlo do oštećenja ljudskog organizma nakon ozračivanja, najproblematičnija je reparacija, ako je uopšte moguća, pošto ne postoje lekovi za ubrzavanje regeneracije,

tretmanom samo transfuzijom krvi može se spasiti život osobe, ako je situacija takva, ali ni ovo ne ubrzava sam proces regeneracije.

Neželjeno radioaktivno zračenje može da dopre do ljudskog organizma iz okoline u vidu radiokontaminacije, i iz unutrašnjosti organizma, do ovoga dolazi pri unosu radionuklida u organizam. U drugom slučaju biogeni radionuklidi imaju poseban značaj.

Sa spoljašnje strane zbog dometa (nekoliko metara u vazduhu) i velike prodorne moći, γ – zračenje je najopasnije. Dok u unutrašnjosti organizma α - i β – zračenje, zbog velike moći ionizacije, su najproblematičniji.

2.2 Izvori jonizujućeg zračenja

U sledećem koraku moramo identifikovati, koji su ti radionuklidi koje predstavljaju opasne izvore jonizujućeg zračenja. Kako bi se definisali moramo prvo odrediti kriterijume, koji karakterišu opasne radionuklide:

- Radionuklid mora da bude dostupan u okolini.
- Radionuklid mora da ima dovoljno dugačak period poluraspada, da bi mogao doći u kontakt sa ljudskim organizmom.
- Radionuklid i njegovi potomci pri raspadu, oslobađaju čestice sa prilično visokim energijama, koje mogu da izvrše jonizaciju u organizmu.

Korišćenjem ovih kriterijuma potencijalno opasni radionulidi su prikazani u Tabeli 1, sa odgovarajućim periodom poluraspada, sa označenim poreklom, roditeljskim jezgrom –ako postoji, i izvorom prisustva – ako je poznato:

Tabela 1.: Potencijalno opasni radionuklidi prisutni u okolini

Izotop	Period poluraspada $T_{\frac{1}{2}}$	Poreklo izotopa	Roditeljsko jezgro	Izvor prisustva
^{40}K	$1.251 * 10^9 \text{ god}$	primordijalan	-	prirodno
^{60}Co	5.2713 god	veštački	^{59}Co	probe nuklearnih oružja
^{90}Sr	28.79 god	veštački	^{235}U	nuklearni reaktori
^{99}Tc	$1.251 * 10^9 \text{ god}$	veštački	^{235}U	nuklearni reaktori
^{129}I	$1.57 * 10^7 \text{ god}$	uglavnom veštački, prirodno u tragovima	^{235}U (65%) ^{239}Pu (35%)	probe nuklearnih oružja, nuklearni reaktori
^{131}I	8.02 d	veštački	^{235}U (2.878%) ^{239}Pu	probe nuklearnih oružja, nuklearni reaktori
^{137}Cs	30.17 god	veštački, prirodno u tragovima	^{235}U	probe nuklearnih oružja, nuklearni reaktori
^{210}Po	138.376 d	veštački, konstantno se nastaje u prirodi	^{222}Rn (^{238}U niz)	potomak ^{222}Rn
^{222}Rn	3.8215 d	prirodno	^{226}Ra (^{238}U niz)	potomak ^{226}Ra
^{232}Th	$1.405 * 10^{10} \text{ god}$	primordijalan	-	prirodno
^{235}U	$7.038 * 10^8 \text{ god}$	primordijalan	-	prirodno
^{238}U	$4.468 * 10^9 \text{ god}$	primordijalan	-	prirodno

Iz Tabele 1 se vidi da su radionuklidi, osim ^{40}K i prirodnih potomaka iz nizova ^{232}Th , ^{235}U , ^{238}U , direktno vezani za ljudsku aktivnost, tj. znamo i načine i mehanizme na koje oni dospevaju u okolinu, i ako je to jonizujuće zračenje prisutno u okolini poznato je i kako se može proučavati negova prisutnost, i kako se može sprečiti da dođe do nepoželjnog kontakta sa njim tj. da čovek bude nepotrebno izložen ionizujućem zračenju.

„Masovne“ nuklearne probe termonuklearnih bombi su se zvanično završile 1998. godine (ipak u Severnoj Koreji su bile izvršene i 2017. godine, vojni nuklearni akcident se desio čak i 2019. godine -Nenoska, Russija).[4] Međutim iz ugla radioekološkog opterećenja okoline

nuklearne elektrane imaju poseban značaj. U današnjoj agresivnoj ekonomskoj borbi sektor energije je kardinalno pitanje. Ekonomski jake države ne bi postojale bez nuklearne energije. Iz istorijskih primera smo videli kakve posledice imaju reaktorske nesreće, i zbog povećane upotrebe nuklearne energije verovatnoća samih akcidenata/nesreća je veća u odnosu na opasnost od nuklearnih testiranja/incidenta čija radioekološka posledica bi direktno uticala na našu okolinu, a ima daleko veću veovatnoću od nuklearnih ratova. Prevencija ovakvih događaja je ključna. Puno se radi na obezbeđenju fizičke i kibernetičke sigurnosti i bezbednost nuklearnih elektrana, ipak ni jedan sistem nije 100% siguran. Poslednja nuklearna nesreća klase 7. dogodila se 2011. godine u Fukushimi u Japanu, i pokazala je da ako se svi uslovi uzmu u obzir, čak i sama fizikička bezbednost može biti ugrožena. Akcidenti o kojima se ne govori puno, su svakodnevni kibernetički napadi na nuklearne elektrane (na bazi informacija IAEA-a). Do današnjeg dana nisu se desili ozbiljni kibernetički incidenti u elektranama, koji bi ugrožavali funkcionisanje elektrana/reaktora, ali poslednji incident u Indiji, Kudankulam, 2019., potvrdio je da je i kibernetička bezbednost isto toliko važna kao i fizička bezbednost u prevenciji nesreće.[5]

Činjenica da veštačkim putem ne možemo uticati na radioaktivni raspad, jako otežava stvari u situacijama kad je u pitanju radioaktivno zagađenje ili radioaktivni i/ili nuklearni otpad, jer radionuklidi raznim načinima mogu da dođu do kontakta sa okolinom, pa je samim tim prenos radioaktivnog zagađenja ozbiljan problem.

2.3 Bioindikatori radiokontaminacije

Radionuklidi se u lanac ishrane uključuju preko biljnih kultura kojima se čovek hrani, zato merenjem biljnih kultura možemo pratiti stanje okoline, tako je i nastala metoda biomonitoringa životne sredine.

Prvo da razjasnimo nekoliko pojmova:

- **Biomarker** je merljiv indikator biološkog stanja.
- **Bioindikator** je merljiv indikator postojanja posmatranog fenomena
- **Biomonitoring** je merenje opterećenja organizma nakon prisustva kontaminirajućeg materijala, i praćenje metabolizma date materije (biomonitoring, kao u hemiji, se danas ne vrši radionuklidima, ali istorijski su bili izvršeni eksperimenti, uglavnom na teškim bolesnicima i na licima osuđenim na smrt; danas se posmatra metabolizam datog hemijskog elemenata u organizmu)

Radiološko zagađenje najbrže se širi u formi aerosola, odavde sledi da su najbolji bioindikatori one biljke koje imaju velike listove, npr.: kupus, salata, spanać, duvan itd.

Kada govorimo o biomarkerima, oni moraju biti dugoživeći organizmi, u kojima mogu da se nagomilavaju radionuklidi, tj. može se proučavati zastupljenost radionuklida u funkciji od vremena. Dobri biomarkeri su mahovine (proučavanje se vrši preko pranja mahovina, i ispitivanja isparene prašine ili sušenjem mahovina i merenjem sadržaja radionuklida u suvoj materiji), morski sunđeri (vrši se ispitivanja soka iscedeđenog morskog sunđera) i alge.

Kad je poznatno da je određeno zemljište kontaminirano, onda biljke koje se uzgajaju na tom zemljištu postaju interesantne za ispitivanje, posebno su interesantne one biljke koje

imaju veliki koren, kao i sve one biljke koje apsorbuju veće količine minerala iz zemljišta, tu spadaju i gljive. Gljive su posebno interesantne, jer micelijum gljive funkcioniše kao jedan veliki koren, i zbog sunđeraste strukture može da apsorbuje radionuklide iz zemljišta.[6]

U ovom radu izvršena su merenja radionuklida u zemljištu i proučavanje mogućnosti unosa ovih radionuklida u ljudski organizam preko korenastog porvča. Posebna pažnja je posvećena veštačkom đubriva koje se koristi za osiguranje prinosa a koje često sadrži povećane koncentracije aktivnosti radionuklida.

2.4 Radionuklidi u korenastim povrćima

Prvo pitanje koje se nameće je kako radionuklidi u povećani koncentracijama dospevaju u zemljište?

Glavni izvor veštačkih radionuklida su nuklearne probe, i reaktorski akcidenti/nesreće (medicinski incidenti ne pripadaju ovoj temi, jer su medicinski izvori obično čisti, prethodno poznati izotopi, a potencijalni incidenti su lokalizovani). Pri ovim događajima velika količina radionuklida se širi u obliku aerosola. Ovi aerosoli mogu de predu velike udaljenosti transportom kroz vazduh. Oni se zakače za čestice prašine ili vlage i formiraju klastere, na koje je izraženo dejstvo gravitacije, i tako počinje proces depozicije. Značajni mehanizmi depozicije su "washout" i "rainout".

"Washout" je mehanizam gde kišnica ispere deo aerosolnih radionuklida iz vazduha, ali kišni oblak ne može da pokrije celokupnu raspodelu aerosola. Ovako isprani radionuklidi deponuju se na površinu zemlje, odake pomoću vode, vremenom mogu da stignu i do nekih dubljih zemljišta.

"Rainout" je mehanizam gde kišnica totalno ispere aerosole radionuklida iz vazduha, tj. kišni oblaci potpuno pokriju celokupnu raspodelu aerosola. U ovom slučaju radionuklidi potpuno se deponuju na površinu zemlje, odakle mogu da se transportuju u dublje slojeve zemlje.

Dalji mogući način unosa radionuklida u zemljište je putem upotrebe veštačkih đubriva, koja su u poljoprivredi neophodna, i organskih i neorganskih. Zbog masovne upotrebe đubriva vrši se i γ -spektroskopija za izotope ^{238}U , ^{232}Th i ^{40}K .

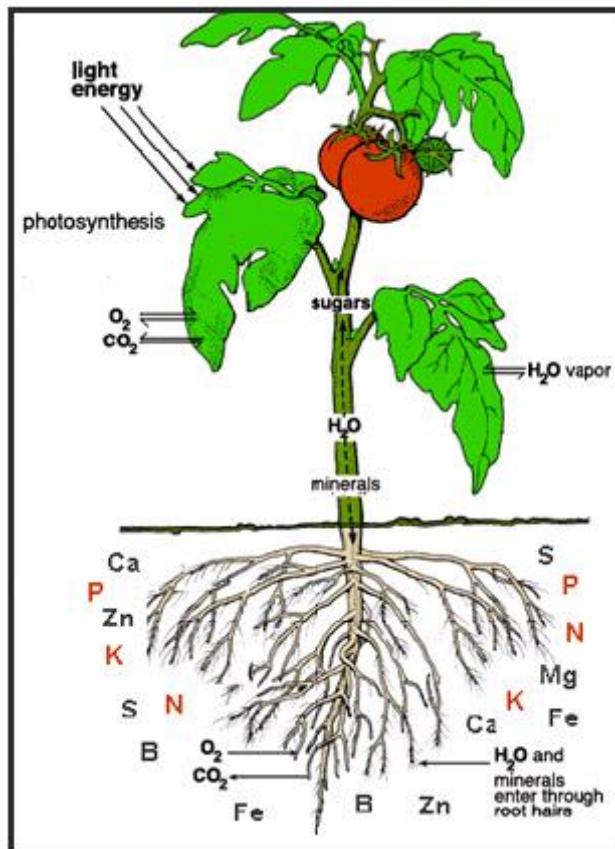
Raspodela radionuklida u zemljištu nije homogena, ali ako se vrši kultivacija gornjih 30 cm zemljišta, na godišnjem nivou može se smatrati da je homogenost očuvana. Biljne kulture iz ovih slojeva zemljišta mogu da prime biogene radionuklide.

Mera količine usvojenih radionuklida iz zemljišta za svaku biljku se opisuje transfer faktorom radionuklida iz zemlje u biljku.

Transfer radionuklida iz zemljišta u biljku zavisi od tipa zemljišta (minerološki i granulometrijski sastav, sadržaj organikih materijala, i plodnost zemljišta), načina obrade zemljišta, pH vrednosti, koeficijenta distribucije suve materije i tečnosti, razmeni K^+ i organske materije, fizičkohemijskih karakteristika radionuklida, oblika prisustva radionuklida, vremena koje je proteklo od zagađenja, i tipa biljne kulture. Model koji opisuje transfer preko date karakteristike se naziva *Absalom model*.[7,8] Ovaj model u Evropi uspešno je predvideo

raspodelu radioizotopa ^{137}Cs iz Chernobyl-a i raznih nuklearnih proba. Međutim u ostalim regionima, npr. u Južnoj Aziji, ovaj model ima svoje ograničenje. Druga opcija procene transfer faktora je da se oni eksperimentalno procene na osnovu merenja sadržaja radioizotopa u biljnim kulturama, kao i samom zemljištu na kome je biljna kultura uzgajana.

U ovom radu procenjeni su transfer faktori radionuklida iz zemljišta u biljku mereni putem transfera količine radionuklida koje iz zemljišta biljka apsorbuje preko svog korena. Šematski prikaz načina usvajanja materijala je prikazana na Slici 1.



Slika 1.: Šematski prikaz mehanizma usvajanja vode i rastvorljenih minerala

Najznačajniji su oni radionuklidi koji formiraju rastvorljiva jedinjenja, jer ako su rastvoreni onda imaju veću pokretljivost u sistemima zemljište – biljka. Iz proučavane koncentracije aktivnosti radionuklida u biljci, u datom zemljištu, transfer faktor (u formulama dalje kao TF) se dobija putem jednačine:

$$TF = \frac{\text{Aktivnost radionuklida biljke } (\frac{Bq}{kg} \text{ suvog materijala})}{\text{Aktivnost radionuklida zemljišta } (\frac{Bq}{kg} \text{ suvog materijala})} \quad (3)$$

Ovde treba napomenuti da su u priručnicima IAEA-a date tabele vrednosti transfenih faktora za razne biljke, ali ove vrednosti mogu da variraju čak i za dva reda veličine od realnih. Uzrok ovih varijacija nisu samo karakteristike zemljišta već i karakteristike ispitivane biljne kulture, a to podrazumeva: metabolitičke i biohemiske mehanizme usvajanja radionuklida, mehanizme

detoksikacije, i koncentracija radionuklida u rizosferi (zoni oko korena biljke) u zemljишtu. Trajanje vegetativnog perioda i karakter distribucije korenog sistema u zemljишtu takođe utiče na transfer faktor.[9]

Radiounklidi se najčešće akumuliraju u lišću, stablu i korenju, dok se mnogo manje koncentrišu u plodu. Ispitivani uzorci u ovom radu pripadaju grupi korenastog povrća, gde su stablo i koren zapravo isto (tj. od njih potiče najveći deo suvog materijala).

U ovom radu su korišćeni uzorci u prirodno vlažnom stanju - nisu sušeni pre merenja. Za korekciju efikasnosti detekcije na geometriju i matricu uzorka korišćen je metod transfera efikasnosti pomoću programa EFFTRAN.

3. Eksperimentalni deo

3.1 Sakupljanje uzoraka

Uzorci korenastih povrća i odgovarajuće zemljište su uzete iz gazdinstva „Nađ“ i iz gazdinstva „Fris“ u Bečeju.

Iz gazdinstva „Nađ“ su uzeti uzorci:

1. **Keleraba** (*Brassica oleraceae convar. acephala var. gongylodes*), i zemljište na kome je uzgajana keleraba (černozem) $N: 45^{\circ} 36'52.1''; E: 20^{\circ} 02'04.4''$; datum uzorkovanja 04.05.2020.
2. **Rotkvice** (*Raphanus sativus*) i zemljište na kome su uzgajane rotkvice (černozem) $N: 45^{\circ} 36'58.2''; E: 19^{\circ} 58'13.4''$; datum uzorkovanja 04.05.2020.
3. **Cvekla** (*Beta vulgaris subsp. vulgaris*) i zemljište na kome je uzgajana cvekla (černozem) $N: 45^{\circ} 36'58.2''; E: 19^{\circ} 58'13.4''$; analizirani uzorak cvekla i zemljišta cvekla je 7 meseci stariji od uzorka rotkvice, pošto pri datumu uzorkovanja nije bila sezona cvekla, tj. cvekla i zemljište cvekla su iz prethodne sezone, ali je cvekla bila uzgajana na istoj parceli; datum uzorkovanja 04.10.2019.
4. **Uzorak organskog đubriva „Fertor“** (MeMon BV, Holandija), koji je korišćen kod sve tri kulture povrća; datum uzorkovanja 04.05.2020.

Zemlja na kojoj su zasađene keleraba, rotkvice i cvekla bila je đubrena jednom pre sadnje, količinom đubriva od $\sim 200 \frac{g}{m^2}$.

Iz gazdinstva „Fris“ su uzeti uzorci:

1. **Šargarepa** (*Daucus carota subsp. sativus*) i zemljište na kome je uzgajana šargarepa (černozem) $N: 45^{\circ} 36'47.3''; E: 20^{\circ} 00'48.0''$; datum uzorkovanja 21.07.2020.
2. **Peršun** (*Petroselinum crispum subsp. tuberosum*) i zemljište na kome je uzgajan peršun (černozem) iz parcele nalaženja $N: 45^{\circ} 36'47.8''; E: 20^{\circ} 00'47.6''$; uzorkovan 21.07.2020.
3. **Uzorak veštačkih đubriva „Phosagro“** (Phosagro-Cherepovets OJSC, Ruska Federacija), korišćenog kod obe kulture povrća; datum uzorkovanja 21.07.2020.
4. **Uzorak veštačkih đubriva „Amonijev Nitrat N33,5“** (Petrokemija d.d., Hrvatska), korišćenog samo kod šargarepe; datum uzorkovanja 27.07.2020.

Zemlja gde je sađena šargarepa je đubrena jednom pre sadnje, količinom đubriva Phosagro-a od $\sim 70 \frac{g}{m^2}$, i preko zalivanja u periodu od 3 meseci ukupnom količinom Amonijev Nitrat N33,5-a od $\sim 120 \frac{g}{m^2}$.

Zemlja gde je sađen peršun je đubrena jednom pre sadnje, količinom đubriva Phosagro-a od $\sim 87 \frac{g}{m^2}$.

Kontrolni uzorci neobrađivane zemlje - referentni uzorci su:

1. **Zemlja sa Rimskih šančeva (černozem)**: zemlja, uzorkovana sa lokacije: $N: 45^{\circ} 29'43.6''; E: 20^{\circ} 01'53.2''$; datum uzorkovanja 28.04.2020.

2. **Les:** prirodna, formacija lesa se završila ~ 13000 godina pre nove ere, uzorak je uzet sa lokacije: $N: 45^{\circ} 44'07.6''$; $E: 19^{\circ} 56'49.2''$; datum uzorkovanja 28.04.2020.

Gornji slojevi zemlje odgovarajućih korenastih povrća (do $\sim 30\text{ cm}$ dubine) su kultivisani otprilike u svakom 3. mesecu, tj. po sastavu možemo ih smatrati kao homogeni. Uzorkovanje je vršeno putem bušenja ovog sloja. Uzorak zemlje je uzet vertikalno po celoj dubini i sa 3 mesta, $\sim 1,5\text{ m}$ jedan od drugoga.

Kotrolni uzorci zemljišta koji su uzeti kao referentne vrednosti nikada nisu bili obrađivani, pa je rasporedla radionuklida u njima posledica samog prirodnog procesa koji se desio. Uzorci ovih zemljišta su uzeti sa dubine od $\sim 50\text{ cm}$.

Uzorkovanje zemlje je prikazano na Slici 2.



Slika 2.: Uzorkovanje zemlje Rimskih šančeva.

Korišćeni polistirenski kontejneri za uzorke su:

1. „Manja“, dimenzije: visina: $91,1\text{ mm}$; prečnik: 66 mm , debljina zidova: 1 mm ; debljina dna kontejnera: 1 mm ; aktivna zapremina: 272 cm^3
2. „Veća“, dimenzije: visina: $95,7\text{ mm}$; prečnik: $65,8\text{ mm}$, debljina zidova: 1 mm ; debljina dna kontejnera: 1 mm ; aktivna zapremina: 275 cm^3
3. „Ravan“, dimenzije: visina: $68,7\text{ mm}$; prečnik: $87,8\text{ mm}$, debljina zidova: 1 mm ; debljina dna kontejnera: 1 mm ; aktivna zapremina: 369 cm^3

Uzorci sa odgovarajućim *geometrijama* (kontejnerima) i masama su date u Tablei 2.

Tabela 2.: Naziv uzorka sa odgovarajućem masom uzorka i sa odgovarajućom „geometrijom“ kontejnera uzorka.

Naziv uzorka	Masa uzorka [kg]	Gustina uzorka $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$	Geometrija
Cvekla	0.23200(5)	852.94 ± 0.18	„Manja“
Rotkvica	0.22900(5)	841.91 ± 0.18	„Manja“
Keleraba	0.24700(5)	898.18 ± 0.18	„Veća“
Zemljišta cvekle	0.21950(5)	819.85 ± 0.18	„Manja“
Zemljišta rotkvice	0.36900(5)	1371.32 ± 0.18	„Manja“
Zemljišta kelerabe	0.44400(5)	1632.35 ± 0.18	„Manja“
Organsko đubrivo Fertor	0.21400(5)	763.64 ± 0.18	„Veća“
Šargarepa	0.23550(5)	875.00 ± 0.18	„Manja“
Peršun	0.22290(5)	819.85 ± 0.18	„Manja“
Zemljišta šargarepe	0.40090(5)	1477.94 ± 0.18	„Manja“
Zemljišta peršun	0.39530(5)	1459.56 ± 0.18	„Manja“
Veštačko đubrivo Phosagro	0.28500(5)	1051.47 ± 0.18	„Manja“
Veštačko đubrivo Amonijev Nitrat N33,5	0.25950(5)	1066.18 ± 0.18	„Manja“
Zemlja rimskih šančeva	0.44110(5)	1165.31 ± 0.14	„Ravan“
Les	0.48000(5)	1764.71 ± 0.18	„Manja“

3.2 Priprema uzorka korenastih povrća

Za obezbeđivanje reprezentativnosti uzorka korenastih povrća za analizu, svaki uzorak je bio sačinjen kao mešavina od više komada (min. 5 ili više) povrća, koji su bili skupljeni sa različitim mesta u okviru iste parcele.

Svih pet uzoraka povrća je bilo pripremljeno na identičan način, sledećim postupkom:

1. Pranje povrća od zemlje
2. Uklanjanje listova
3. Rendanje povrća na rendalu otvora od 2 mm
4. Gusto pakovanje rendanog povrća u kontejnerima, do vrha

Tok pripreme je prikazana na Slici 3.



Slika 3.: Priprema uzorka kelerabe.

3.3 Određivanje aktivnosti

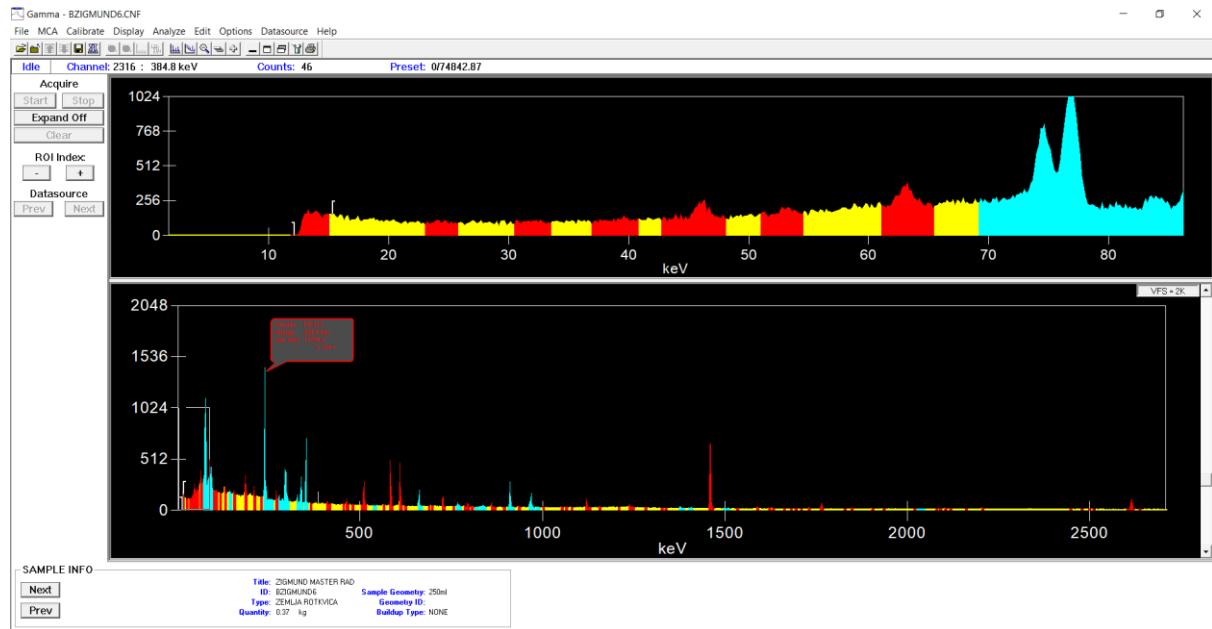
Za gama-spektroskopiju uzoraka je korišćen bulletizovan (kristal sa zaobljenim ivicama) Extended Range Coaxial HPGe detektor n-tipa proizvođača Canberra, tipa GX10021, serijskog broj b08093.[10] Detektor (dalje kao B detektor) se nalazi u Laboratoriji Katedre za nuklearnu fiziku, na Departmanu za fiziku, Prirodno-matematičkog fakulteta Univerziteta u Novom Sadu. B detektor je niskofonski HPGe detektor zapremine 380 cm^3 , i nalazi se u fabričkom zaštitu od olova, debljine 15 cm . Prozor detektora je napravljen od karbon kompozitnog vlakna, debljine $0,89 \text{ mm}$, obezbeđujući $> 85\%$ transmisije fotona energije niže od 15 keV , a $\sim 100\%$ transmisije za fotone iznad energije 20 keV , ovakav detektor ima prošireni merni opseg od 3 keV do 3 MeV , i ima relativni efikasnost 100% (ekvivalentno apsolutnoj efikasnosti $3^{**}3$ " NaI(Tl) detektora na 1332 keV). Rezolucija B detektora na 1332 keV -a iznosi FWHM = 2.1 keV , odnos peak to Compton P/C=80:1. Model kriostata je 7915-30-ULB, model predpojačavača 2002C. Spektrometar je zatvorenog koaksijalnog tipa sa U kriostat konfiguracijom. Zaštita detektora je napravljena od slojevito spoljenog olova, u spoljašnjih 5 inča (125 mm) iz niskofonskih, dok unutrašnji 1 inč (25 mm) od olova koji sadrži ^{210}Pb do $\sim 20 \frac{\text{Bq}}{\text{kg}}$. Unutrašnji sloj pasivne zaštite je sačinjen od sloja nisko-fonskog kalaja, debljine 1 mm i bakra visoke čistoće debljine 1,5 mm. Funkcija ovog sloja je zaustavljanje X zraka, izzračene iz olova pri K zahvata energije od 75-85 keV, kao i X zraka izzračene iz kalaja energije 25-28 keV. Za hlađenje detektora i smanjene fona koji može da potiče od radona i radonovih potomaka, zaštita je opremljena sa gasnim priključkom koji služi za uvođenje tečnog azota iz Dewar-a u

unutrašnjosti zaštite. Ukupna masa zaštite iznosi 1633 kg. Spoljašnji izgled detektora B je prikazan na Slici 4.



Slika 4.: Spoljašnji izgled detektora B u otvorenom stanju.

Detektor je priključen na visoki napon preko napajanja Canberra Model 3125 Dual-a. Signali se sa spektroskopskog pojačavača Canberra Model A 2026 vode na Canberra Multiport I sa ADC-om. On je preko USB porta priključen na standardni PC, sa operativnim sistemom Windows XP. Dobijeni spektar je bio snimljen preko računarskog multikanalnog analizatora sa 16k kanala, upravljanje sakupljanjem podataka i online praćenje spektra u formatu Canberra *.CNF vrši se pomoću programa Canberra Genie2000. Interfejs programa Genie2000, sa snimljenim spektrom zemljista rotkvice, sa osnovnim podacima uzorka u levom donjem pravougašniku je prikazan na Slici 5.[11,12]

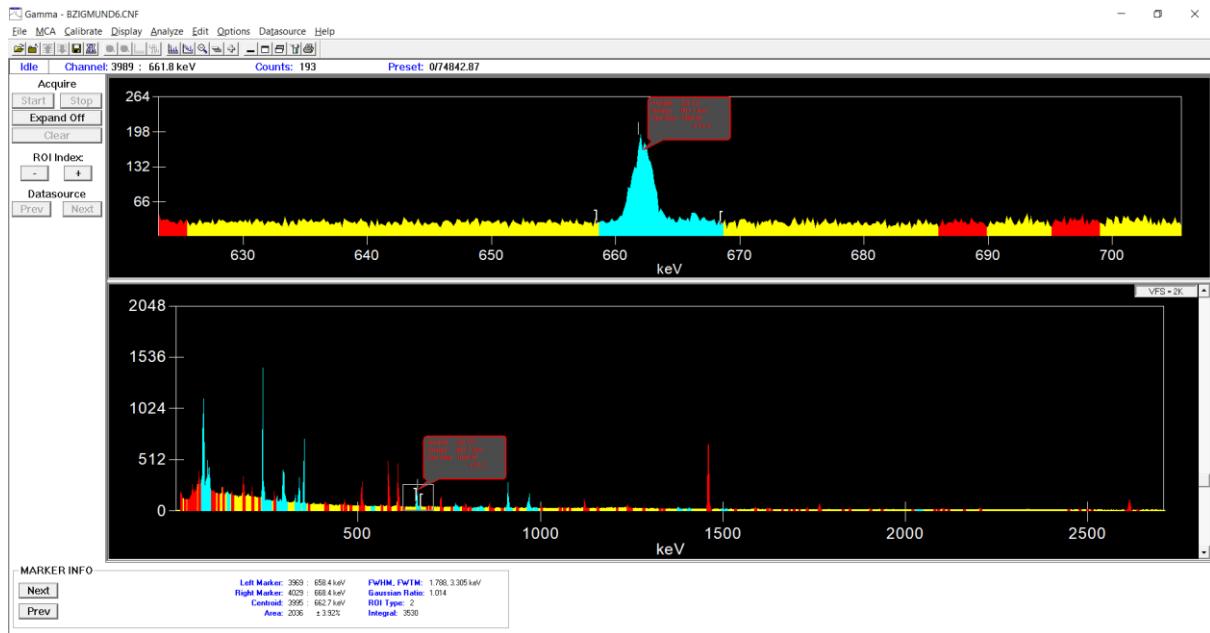


Slika 5.: Interfejs softvera Genie2000 sa spektrom uzorka zemljišta rotkvice.

U levom donjom pravougaoniku dalje možemo pogledati i duge grupe podataka, poput: podaci o vremenu snimanja prikazani su na Slici 6., i podaci o segmentu našeg ispitivanja (ROI – Region-of-interest, pravougaonik sa informacijama se naziva *Marker Info*) prikazan na Slici 7.



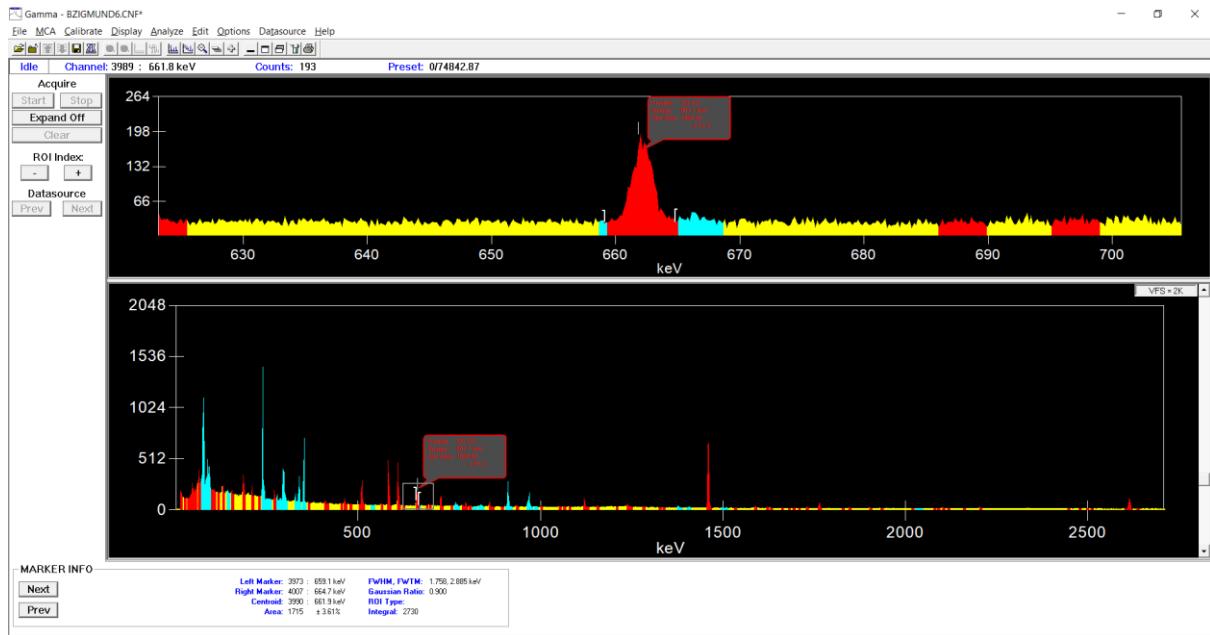
Slika 6.: Podaci o vremenu snimanja uzorka, na slici je prikazan za uzorak zemljišta rotkvice.



Slika 7.: Podaci o markerima na primeru površine γ -pik energije 661.66 keV radioizotopa ^{137}Cs , u spektru uzorka zemljište rotkvice.

Kao što se vidi na Slici 7., softver ima svoju bazu podataka na osnovu koje određuje ROI za svaki radionuklid, koji može da se identificuje. Ponekad ROI-i uključuju veće regije ispred ili iza samog pika, kao na prikazanom primeru za pik 661.66 keV radioizotopa ^{137}Cs .

U ovakvim slučajevima potrebno je manuelno određivanje ROI-a kao što je prikazano na Slici 8., gde je manuelno određen ROI prikazan crvenom bojom u odnosu na automatski određen, prikazan plavom bojom.



Slika 8.: Manuelno određen ROI, označen crvenom, na primeru površine γ -pika energije 661.66 keV radioizotopa ^{137}Cs , u spektru uzorka zemljišta rotkvice.

Aktivnost uzorka je bila bazirana na merenju aktivnosti izotopa: ^{40}K , ^{137}Cs , ^{226}Ra , ^{232}Th

Formula za određivanje aktivnosti uzorka je:

$$A_u = \frac{N}{\varepsilon \cdot p_\gamma \cdot t} \quad (4)$$

gde su:

- N – odbroj površine γ – pika, u softveru Genie2000k označen sa *Area*-om [s^{-1}]
- ε – efektivnost detekcije detektora sa odgovarajućom energijom γ – zračenja [%]
- p_γ – intenzitet γ – zračenja [13,14]
- t – vreme snimanja uzorka [s]

Formula za određivanje koncentracije aktivnosti je:

$$A_m = \frac{A_u}{m_u} \quad (5)$$

gde su:

- A_u – aktivnost uzorka [Bq]
- m_u – masa odgovarajućeg uzorka [kg]

Greška koncentracije aktivnosti se računa prema relaciji:

$$\sigma \overline{A_m} = \sqrt{\left(\frac{dA_m}{dN} \right)^2 \cdot \sigma N^2 + \left(\frac{dA_m}{d\varepsilon} \right)^2 \cdot \sigma \varepsilon^2 + \left(\frac{dA_m}{dt} \right)^2 \cdot \sigma t^2 + \left(\frac{dA_m}{dp_\gamma} \right)^2 \cdot \sigma p_\gamma^2 + \left(\frac{dA_m}{dm_u} \right)^2 \cdot \sigma m_u^2} \quad (6)$$

gde su:

- σN – greška odbroja Net površine pika, iznosi $\sigma N = \sqrt{N}$
- $\sigma \varepsilon$ – greška efikasnosti detekcije detektora odgovarajuće energija γ – zračenja, koji uključuje i greške parametre krive efikasnosti, s tim eksperimentalno se iznosi $\sigma \varepsilon = 0.05 \cdot \varepsilon$, o ovome u poglavlju 3.5.3
- σt – greška vremena snimanja uzorka, data je u spektru, u konkretnom slučaju varira se između 0.01% i 0.02% *Live time*-a
- σp_γ – greška intenziteta γ – zračenja, tabelarna vrednost za odgovarajuće γ – zračenje
- σm_u – greška mase odgovarajućeg uzorka, iznosi $\sigma m_u = 0.05 g = 0.00005 kg$

Formula za određivanje transfer faktora datog radioizotopa je:

$$TF_{izo} = \frac{A_m^{bilj}}{A_m^{zemlj}} \quad (7)$$

gde su:

- TF_{izo} – transfer faktor izotopa
- A_m^{bilj} – koncentracija aktivnosti radionuklida biljke
- A_m^{zemlj} – koncentracija aktivnosti radionuklida zemljišta biljke

Greška transfer faktora se računa preko:

$$\sigma TF_{izo} = \sqrt{\left(\frac{dT F_{izo}}{dA_{bilj}^{izo}}\right)^2 \cdot \sigma A_{bilj}^{izo} + \left(\frac{dT F_{izo}}{dA_{zemlj}^{izo}}\right)^2 \cdot \sigma A_{zemlj}^{izo}} \quad (8)$$

gde su:

- A_{bilj}^{izo} – koncentracija aktivnosti izotopa u biljnoj kulturi
- σA_{bilj}^{izo} – greška koncentracije aktivnosti izotopa u biljnoj kulturi
- A_{zemlj}^{izo} – koncentracija aktivnosti izotopa u zemljištu odgovarajuće biljne kulture
- σA_{zemlj}^{izo} – greška koncentracije aktivnosti izotopa u zemljištu odgovarajuće biljne kulture

Za određivanje aktivnosti uzroka su korišćeni γ – pikovi kod kojih je najmanja verovatnoća sumiranja, koji su:

- ^{232}Th :
 - 238.632 keV od potomaka ^{212}Pb
 - 583.191 keV od potomaka ^{208}Tl
 - 727.33 keV od potomaka ^{212}Bi
- ^{226}Ra :
 - 295.224 keV od potomaka ^{214}Pb
 - 351.932 keV od potomaka ^{214}Pb
 - 609.312 keV od potomaka ^{214}Bi
- ^{137}Cs : 661.66 keV
- ^{40}K : 1460.75 keV

3.4 Eksperimentalno određivanje kalibracione krive efikasnosti detektora

Da bismo mogli da očitamo tačne podatke sa snimljenog spektra, najpre moramo izvršiti preciznu kalibraciju detektora. Eksperimentalna kalibracija se vrši pomoću sertifikovanog referentnog materijala – materijal tačno određene mase, geometrija, sastava i koncentracije aktivnosti pojedinačnih radionuklida. Za kalibraciju detektora B je bio korišćen uzorak napravljen od strane Češkog Meteorološkog Istituta (dalje kao „češki standard“). Uzorak je bio napravljen 20.01.2017., i sačinjen je od silikonske smole u koju su radionuklidi homogeno umešani. Masa uzorka je 245 g, a maseni sastav matrice češkog standarda čini C 32.4%, H 8.16%, O 21.6% i Si 37.9%. Sertifikat češkog standarda je prikazana na Slici 9.



Czech Metrology Institute
Okružní 31, 638 00 Brno, Czech Republic
phone +420 545 555 111
www.cmi.cz

Workplace: Regional Branch Prague, Radiová 1136/3, 102 00 Praha 10
Ionizing Radiation Building, Radiová 1288/1a
Phone: +420 266 020 497

CERTIFICATE

Certificate No.: 1035 - SE - 40001-17 Type: CBSS 2 Serial No.: 191216-1621019

Radionuclide	Half life, days	Activity, kBq	Combined standard uncertainty, %
Am-241	158004	5,302	1,1
Cd-109	461,9	19,68	1,5
Ce-139	137,64	1,671	1,1
Co-57	271,8	1,306	1,9
Co-60	1925,2	3,315	1,1
Cs-137	10976	2,938	1,3
Sn-113	115,09	3,573	2,2
Sr-85	64,85	5,632	1,9
Y-88	106,63	7,422	1,5
Cr-51	27,704	20,50	1,9
Eu-152	4938,8	3,302	1,2

Mass: 245,0 g

Density: 0,98 ± 0,01 g/cm³

Volume: 250,0 ± 2,5 cm³

Radionuclide impurities: gamma < 0,1 %

Reference date: 20.1.2017

Homogeneity better than: 1 %

Description:

Radioactive material is homogeneously dispersed in silicone resin. Composition of the matrix: C - 0,324 H - 0,0816 O - 0,216 Si - 0,379 (mass ratio).

Measuring method:

Preparation issues from standard ER solutions whose activities were determined by suitable absolute method. Final control is based on gamma spectrometry on HPGe detector.

Note:

As the criterion of homogeneity standard deviation of the activity value of 1 cm³ element was chosen (n=10). The volume is calculated from the mass and the density.

Date of the certificate issue: 4.1.2017

Certificate validity: 3 years

Customer:

Faculty of Sciences, University Novi Sad
Trg Dositeja Obradovića 3
21000 Novi Sad
Serbia

(6 months for Cr-51)



Control: Ing. Vlasta Zdychová, RNDr. Pavel Dryák, CSc.

Ing. Jiří Šurán, MBA

Deputy Director of RB Prague

Slika 9.: Sertifikovani referentni materijal, napravljen od strane Češkog Meteorološkog Instituta

Izračunanje energetske efikasnosti se vrši prema jednačini 9:

$$A_{st} = \frac{N}{\varepsilon \cdot p_\gamma t_{snim}} \quad (9)$$

gde su:

- A_{st} – aktivnost standarda na dan snimanja, i izračunat je preko formule 10:

$$A_{st} = \frac{\sum A_{izo} * 2^{\frac{-t}{T}}}{n_{izo}} \quad (10)$$

u koju su A_{izo} – aktivnosti izotopa dana etaloniranja uzorka, t – vreme proteklo od dana etaloniranja uzorka do dana snimanja uzorka, T – vreme poluraspada odgovarajućeg izotopa, i n_{izo} – broj izotopa u standardnom referentnom materijalu

- N – odbroj površine γ – pika
- ε – efikasnost detekcije detektora sa odgovarajućom energijom γ – zračenja
- p_γ – intenzitet γ – zračenja
- t_{snim} – vreme snimanja uzorka

Merenje je izvršeno 19.04.2018. godine u Laboratoriji Katedre za nuklearnu fiziku, Prirodno-matematičkog fakulteta u Novom Sadu. Kalibracija efikasnosti je određena na energetskom intervalu od 59 keV do 1846 keV, koja je prikazana na Slici 10. Za obradu spektra, očitavanje Net odboroja, korišćen je program APTEC, a za fitovanje krive efikasnosti je korišćen program Table Curve 2D. Dobijene efikasnosti su prikazani u Tabelu 3.

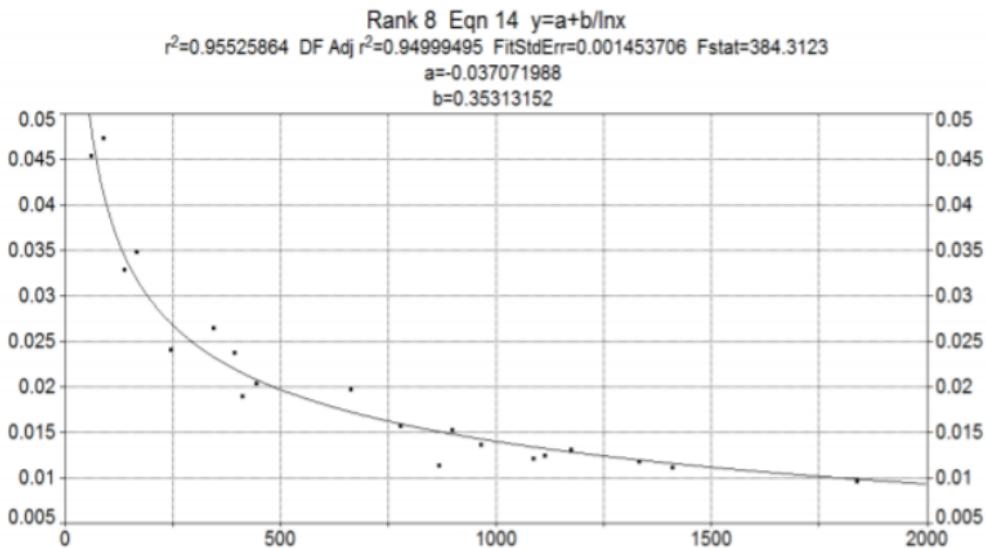
Tabela 3.: Izračunate efektivnosti za date energije

$E [keV]$	$p_\gamma [\%]$	$R [cps]$	ε	$\varepsilon \pm \Delta\varepsilon$
59.5409 (^{241}Am)	35.92	86.4279	0.0455	0.0455(6)
88.0336 (^{109}Cd)	3.66	17.2853	0.0474	0.0474(11)
136.4736 (^{57}Co)	10.71	1.45231	0.0330	0.0330(24)
165.8575 (^{139}Ce)	79.90	4.73849	0.0349	0.0349(8)
244.6874 (^{152}Eu)	7.55	5.66947	0.0242	0.0242(5)
344.2785 (^{152}Eu)	26.59	21.9524	0.0266	0.0266(4)
391.698 (^{113}Sn)	64.97	3.60439	0.0239	0.0239(8)
411.1165 (^{152}Eu)	2.238	1.32309	0.0191	0.0191(15)
443.965 (^{152}Eu)	3.120	1.98176	0.0205	0.0205(11)
661.657 (^{137}Cs)	84.99	48.1497	0.0198	0.0198(3)
778.9045 (^{152}Eu)	12.97	6.33898	0.0158	0.0158(3)
867.380 (^{152}Eu)	4.243	1.51635	0.0115	0.0115(8)
898.042 (^{88}Y)	93.7	5.60627	0.0154	0.0154(4)
964.079 (^{152}Eu)	14.50	6.17581	0.0137	0.0137(3)
1085.837 (^{152}Eu)	10.13	3.83064	0.0122	0.0122(4)
1112.076 (^{152}Eu)	13.41	5.19083	0.0125	0.0125(3)
1173.228 (^{60}Co)	99.85	37.0125	0.0132	0.0132(2)
1332.492 (^{60}Co)	99.9826	33.4662	0.0119	0.0119(2)
1408.013 (^{152}Eu)	20.85	7.2515	0.0112	0.0112(2)
1836.070 (^{88}Y)	99.346	3.72271	0.0097	0.0097(3)

U programu Table Curve 2D nacrtan je grafik efikasnosti u funkciji energije $\varepsilon = f(E)$. Pri odabiru krive u obzir je uzeta njena preciznost i jednostavnost funkcije, koja je opisuje.

Funkcija kalibracione krive je prikazana na Slici 10., i ima matematički oblik (formula 11):

$$\varepsilon = -0.037071988 + \frac{0.35313152}{\ln E} \quad (11)$$



Slika 10.: Kriva efikasnosti detekcije B detektora.

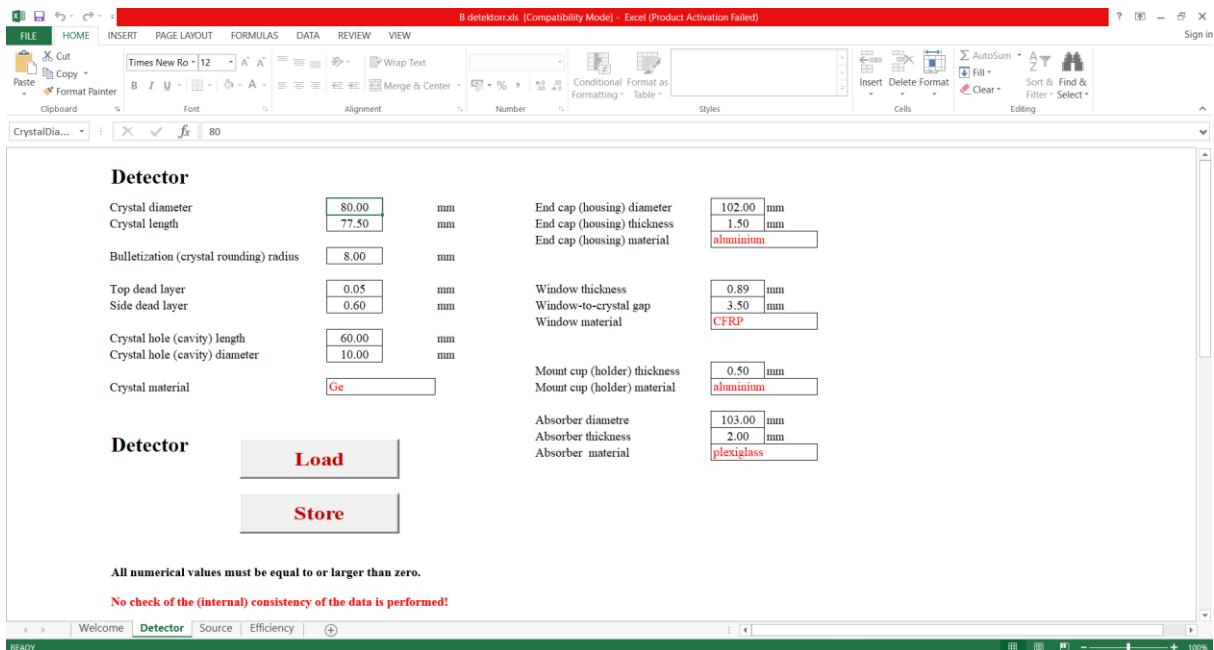
Izabrana kriva daje zadovoljavajuću raspodelu sa malo većim greškama pri niskim energijama, što nam u ovom slučaju ne predstavlja problem jer radionuklidi od interesa emituju gama zračenje na višim energijama.[11,15]

3.5 Korekcija samoapsorpcije pomoću programa EFFTRAN-a

Standardni referentni materijali su napravljeni na taj način da detektor može detektovati najveći deo izraženog radioaktivnog zračenja – da budu što „providniji za zračenje“, a da pri tom efikasnost detekcije bude određena na što precizniji način. Međutim, sastav realnog uzorka apsorbuje deo zračenja. Za korekciju krive efikasnosti koristi se program EFFTRAN, koji radi na principu transfera efikasnosti a u obzir uzima razlike u sastavu matrice samog uzorka (gustina, granulacija i sl.) i razlike u geometriji uzorka. Interfejs programa je baziran na Excelu, ima 4 *sheet-a* (lista) kojima korisnik može da pristupi, a zove su *Welcome*, *Detector*, *Source* i *Efficiency*. U svakom listu postoje polja koja korisnik popunjava sa specifikacijama detektora koje su uglavnom dostupne na sertifikatu koji je obezbeedio proizvođač. Što se tiče uzorka potrebno je što je moguće preciznije ga definisati. Na dnu svakog *sheet-a* postoje definicije delova spektroskopskog sistema i uputstvo za upotrebu.[11]

3.5.1 Podaci o detektoru

Interfejs *Detector sheet* je prikazan na Slici 11.



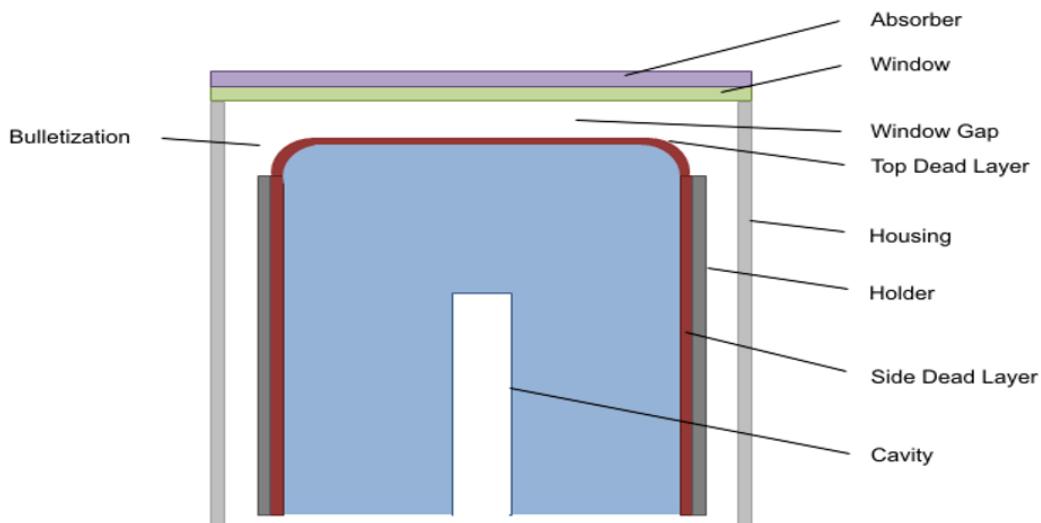
Slika 11.: Interfejs *Detector sheet*, softvera EFFTRAN, na slici su prikazane parametre detektora B.

U ovom delu se unose označeni parametre detektora a to su:

- *Crystal diameter* – prečnik kristala detektora u mm, uključujući i debljinu gornjeg mrvog sloja kristala
- *Crystal lenght* – dužina kristala detektora u mm, uključujući i debljinu spoljašnjeg mrvog sloja kristala
- *Bulletization (crystal rounding) radius* – poluprečnik buletizacije (radijus kojodgovara zaobljenosti gornjih ivica) kristala detektora u mm
- *Top dead layer* – debljina gornjeg mrvog sloja kristala detektora u mm
- *Side dead layer* – debljina mrvog sloja sa strane kristala detektora u mm
- *Crystal hole (cavity) lenght* – dužina šupljine (koja se nalazi vertikalno u kristalu, i u kojoj je smešten štap za hlađenje kristala, unutrašnji sloj ove rupe sadrži mrtav sloj, ali zbog malog uticaja i kompleksnih modelovanja se to ne uzima u obzir) kristala detektora u mm
- *Crystal hole (cavity) diameter* – prečink šupljine (uključuje se i mrtav sloj, ali ne modelira se) kristala detektora u mm
- *Crystal material* – hemijski sastav kristala detektora
- *End cap (housing) diameter* – prečnik kućišta (kriostata) detektora u mm
- *End cap (housing) thickness* – debljina kućišta detektora u mm
- *End cap (housing) material* – materijal od koga je napravljeno kućište detektora
- *Window thickness* – debljina prozora detektora u mm
- *Window-to-crystal gap* – rastojanje između gornjeg mrvog sloja kristala i prozora detektora u mm
- *Window material* – materijal od koga je izrađen prozor detektora
- *Mount cup (holder) thickness* – debljina držača kristala detektora u mm
- *Mount cup (holder) material* – materijal držača kristala detektora

- *Absorber diameter* – prečnik apsorbera (koji može da se postavi na prozor detektora) u mm
- *Absorber thickness* – debljina apsorbera u mm
- *Absorber material* – materijal apsorbera

Na Slici 12 je dat prikaz šeme detektora na kojoj se vide delovi detektora sa označenim informacijama koje su potrebne da bi se detektor definisao u programu EFFTRAN.

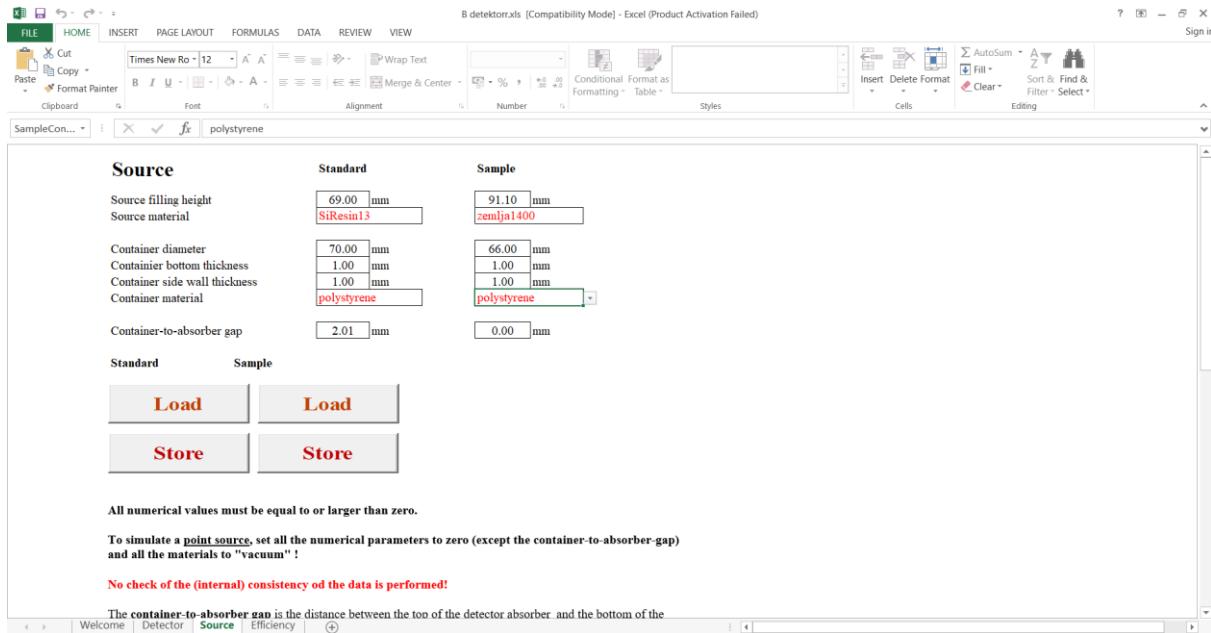


Slika 12.: Prikaz detektora sa označenim parametrima od interesa za EFFTRAN.

Kada se unesu specifikacije detektora one se mogu sačuvati za kasniju upotrebu klikom na opciju *Store*, a ukoliko su specifikacije željenog detektora već sačuvane na računaru mogu se ponovo učitati klikom na opciju *Load*.[11]

3.5.2 Podaci o izvoru

Interfejs *Source sheet* je prikazan na Slici 13.

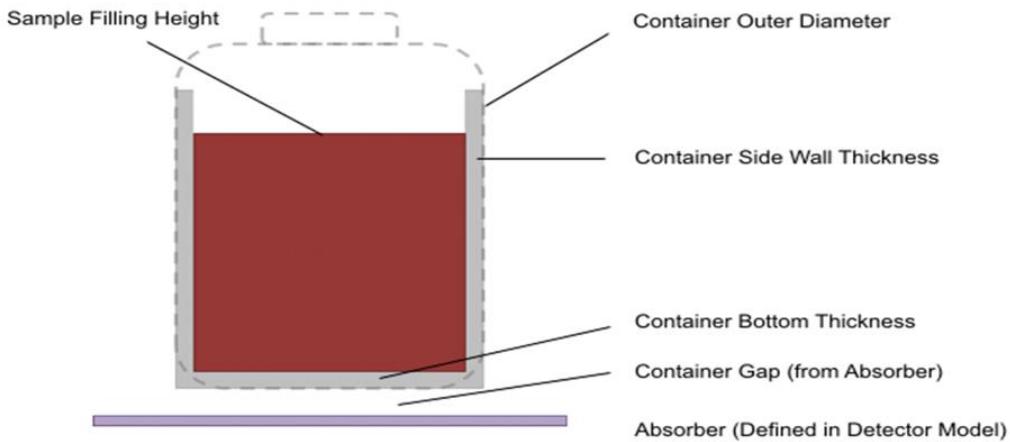


Slika 13.: Interfejs *Source sheet*, softvera EFFTRAN, na slici su kao primer prikazani parametri češkog standarda, i uzorka zemljista rotkvice.

Ovde se unose označeni parametri standarda, na osnovu kojih se određuje kalibraciona kriva, i program računa korekciju za dati uzorak. Unose se i parametri uzorka, čija kalibraciona kriva nam je potrebna. Traženi parametri su:

- *Source filling height* – visina uzorka u kontejneru (posuda u kojoj se nalazi uzorak) u mm
- *Source material* – sastav uzorka (pošto se obično radi o višekomponentim materijalima, onda se atomski/molekularni sastav konstruiše u Material.xls fajlu softvera EFFTRAN, o tome u poglavju 3.5.2.1)
- *Container diameter* – prečnik kontejnera u mm
- *Container bottom thickness* – debljina dna kontejnera u mm
- *Container wall thickness* – debljina zidova kontejnera u mm
- *Container material* – materijal od kog je sastavljen kontejner
- *Container-to-absorber gap* – rastojanje (ako postoji) između dna kontejnera i apsorbera koji je stavljen na prozor detektora u mm

Na Slici 14 prikazana je šema uzorka sa označenim podacima o uzorku koji su potrebni da se unesu u softver EFFTRAN.



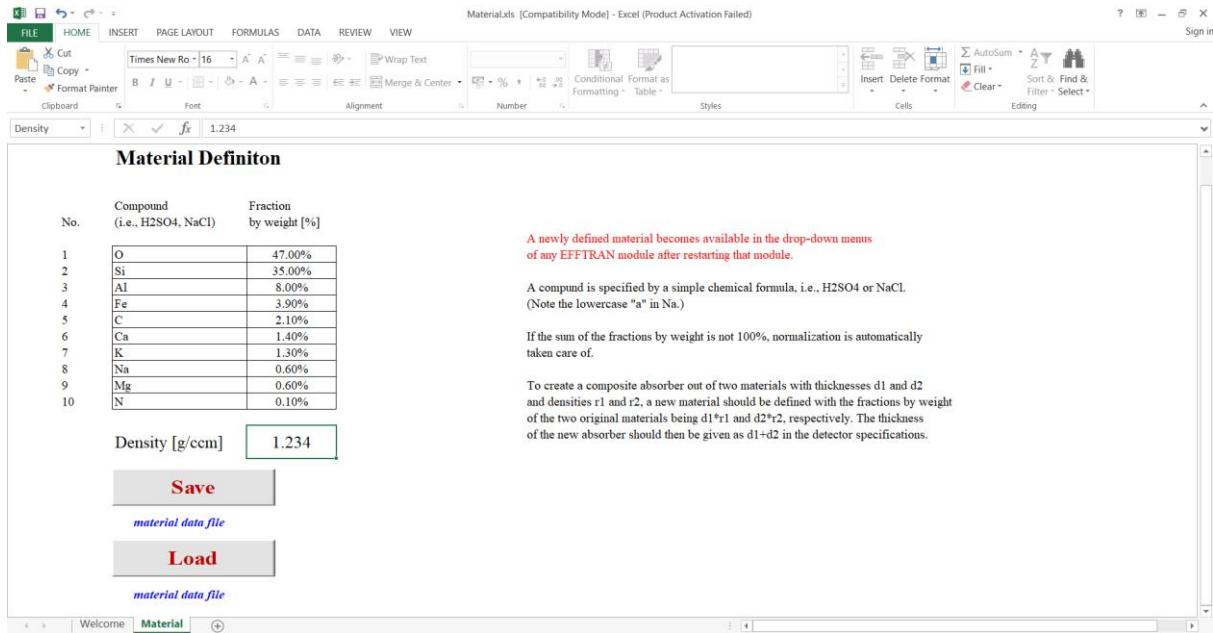
Slika 14.: Šematski prikaz uzorka.

Isto kao i u prethodnom *sheet*-u omogućeno je čuvanje ili učitavanje svih navedenih parametara klikom na opcije *Store* i *Load*, i za standard i za uzorak posebno.[11]

Pri unošenju materijala uzorka bitno je znati njegov sastav i gustinu. Ako imamo unapred sačuvan materijal (*Material Definition*) koji liči na naš uzorak onda se on može samo učitati. Ako nemamo adekvatnog materijala (*Material Definition*), onda moramo sami da ga definišemo u EFFTRAN-u.

3.5.2.1 Definisanje materijala

U slučaju nedostatka odgovarajuće definicije materijala među postojećim u EFFTRAN-u, u folderu EFFTRAN-a moramo naći Material.xls file. Interfejs *Material Definition* je prikazan na Slici 15.



Slika 15.: Interfejs *Material Definition*, softvera EFFTRAN, na slici je prikazan sastav i udeo pojedinačnih elemenata u češkom standardu.

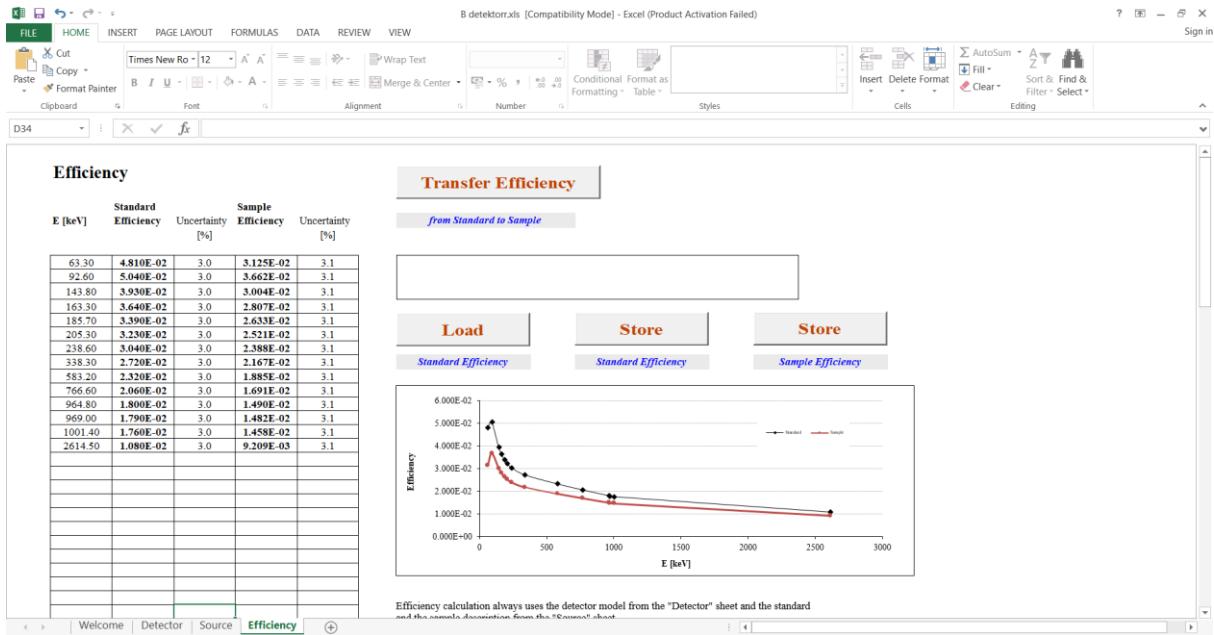
Konstrukcija materijala se vrši unošenjem glavnih komponenta u kolonu *Compound*, u formi simbola hemijskih elemenata, ili u formi molekula kao npr. H₂SO₄ ili NaCl. U kolonu *Fraction by weight* unosi se procena mase datog elementa ili molekula u odnosu na ukupnu masu uzorka. Ako pri sumiranju glavne komponente ne daju 100% mase uzorka, program vrši automatsku korekciju na ukupno 100%, na osnovu postojeće baze podataka.

Ako je kompozitni apsorber sačinjen od dva materijala debljine d_1 i d_2 , i gustine ρ_1 i ρ_2 , novi materijal se mora definisati sa masenim udelima oba materijala, $d_1 * \rho_1$ i $d_2 * \rho_2$ respektivno. Debljina ovako dobijenog apsorbera pri unošenju u specifikaciju detektora mora biti data u formi $d_1 + d_2$.

Na kraju moramo uneti gustinu datog materijala u polje označeno sa *Density* u jedinicama $\frac{g}{cm^3}$ (u programu je označen kao $\frac{g}{ccm}$).

3.5.3 Podaci o efikasnosti detektora

Interfejs *Efficiency* je prikazan na Slici 16.



Slika 16.: Interfejs *Efficiency*, softvera EFFTRAN, na slici je prikazan primer izračunatih vrednosti efikasnosti detektora B za date energije češkog standarda, i izračunate vrednosti efikasnosti detekcije za uzorak zemljišta rotkvice.

U tabeli na Slici 16 u $E[\text{keV}]$ su date ispitivane energije datog standardnog referentnog materijala, za koje su bile računate efikasnosti detekcije ε pri kalibraciji, kao što je opisano u poglavju 3.4, i ove vrednosti se nalaze u koloni *Standard Efficiency*.

Izborom opcije *Transfer Efficiency* program na osnovu uzorka koji smo uneli u *Source sheet*-u izračunava kolike će biti efikasnosti detekcije date energije za dati uzorak u odnosu na referentni materijal. Ove vrednosti efikasnosti detekcije će biti prikazane u koloni *Sample Efficiency*. Nakon kalkulacije *Transfer Efficiency*-a na grafiku prikazanom na Slici 16, program predlaže oblik kalibracione krive.

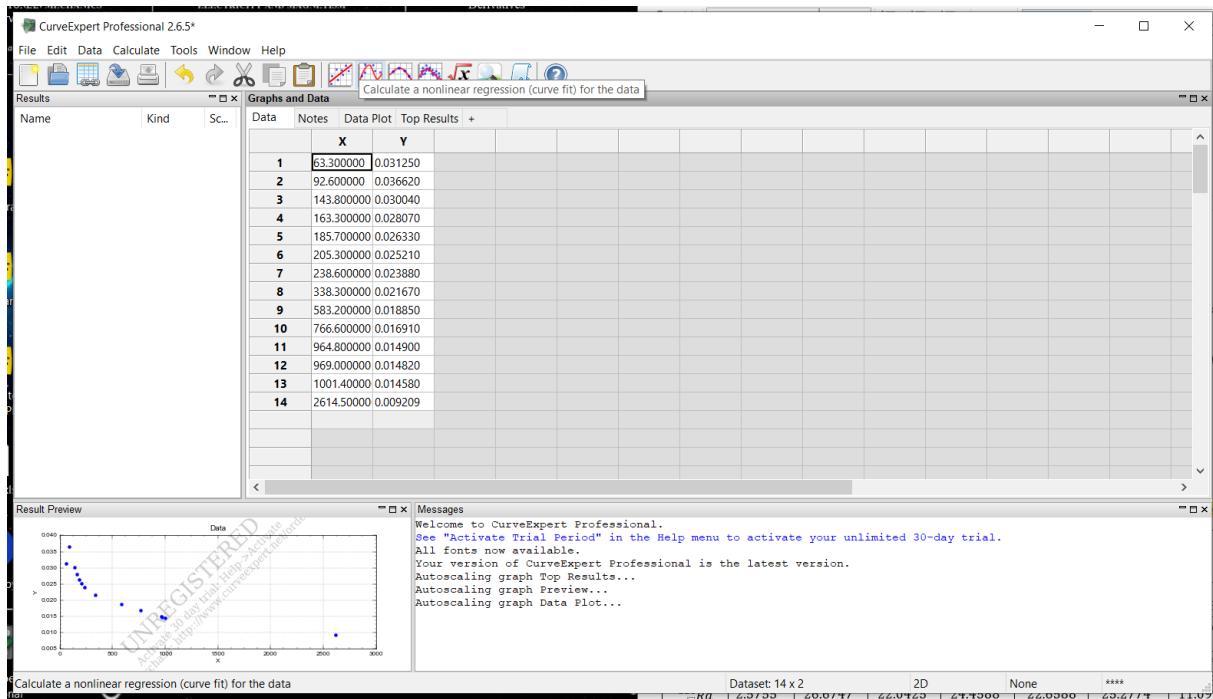
Treba napomenuti da se za mernu nesigurnost uzima 5%, i to na osnovu preporučene merne nesigurnosti za radionuklide prisutne u standardu. EFFTRAN uzima u obzir ovu mernu nesigurnost i dodaje mernu nesigurnost samog transfera efikasnosti što je u ovom slučaju bila mala vrednost i samim tim nije uticala na konačnu vrednost merne nesigurnosti. Metoda transfera efikasnosti je ista za sve uzorke.[11,16]

3.5.4 Određivanje krive kalibracije pomoću programa CurveExpert Professional-a

Kao što je bilo rečeno u poglavlju 3.5.3 nakon kalkulacije transfera efikasnosti EFFTRAN predlaže kalibracionu krivu za dati uzorak, ali ne prikazuje oblik funkcije krive zavisnosti $\varepsilon = f(E)$.

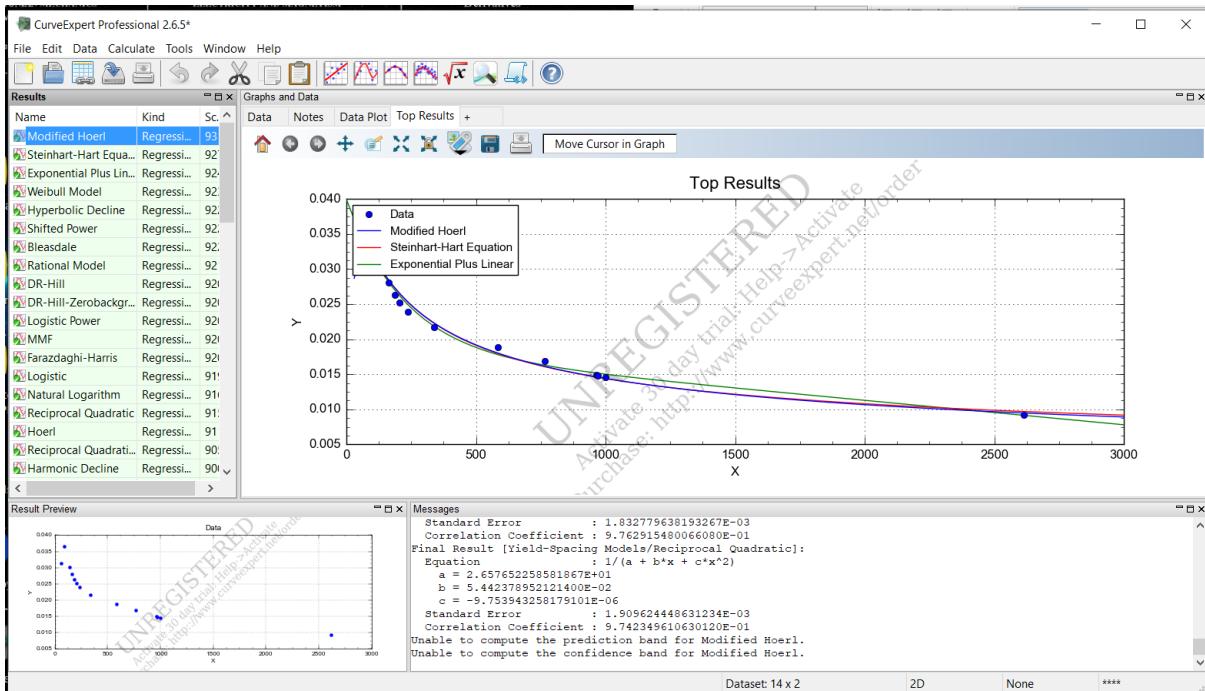
Za određivanje funkcije zavisnosti $\varepsilon = f(E)$, tj. zavisnosti efikasnosti detekcije uzorka od energije γ -zračenja, vrednosti kolone $E[\text{keV}]$ i *Sample Efficiency*-a su unete u softver

CurveExpert Professional 2.6.5, gde je za date podatke kalkulisana nelinearna regresija (*curve fit*) (Slika 17.).



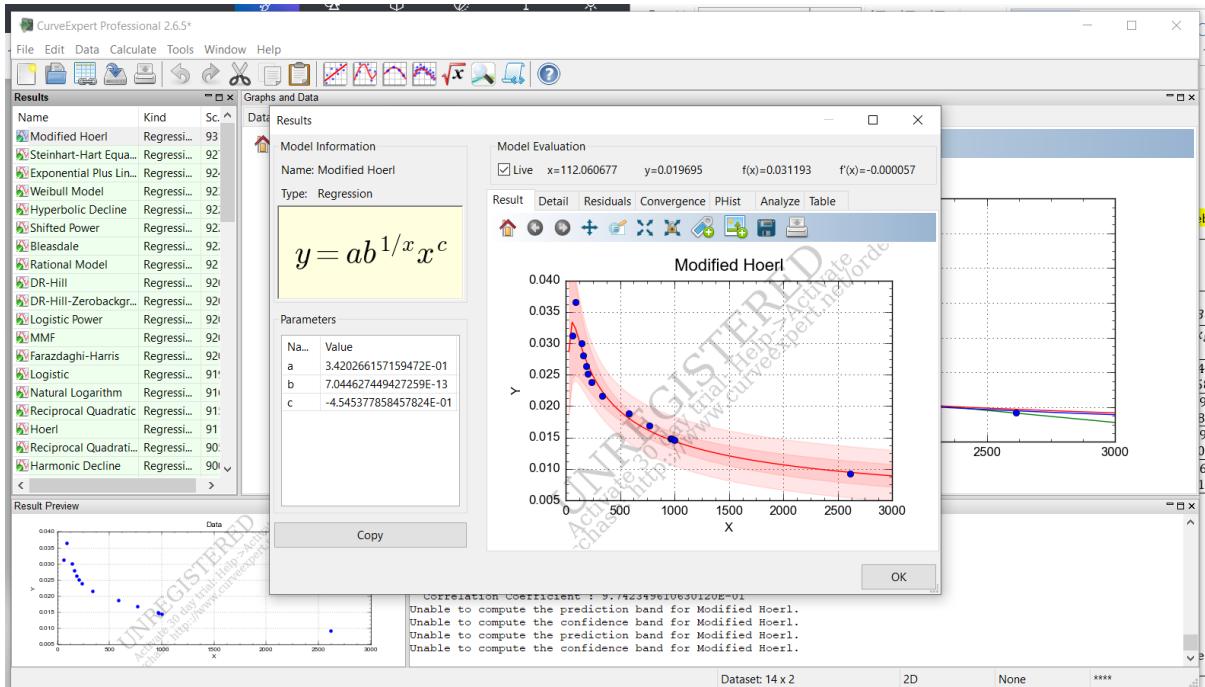
Slika 17.: Interfejs softvera CurveExpert Professional 2.6.5, sa unesenim podacima energije na x-osi, i podacima odgovarajućih efikasnosti detekcije, na y-osi, za uzorak zemljišta rotkvice.

Pokazalo se da je softver CurveExpert Professional 2.6.5 dao adekvatan prikaz kalibracione krive. Jednačine koje najviše odgovaraju su između prvih 10 ponuđenih, kao što je prikazano na Slici 18, za uzorak zemljišta rotkvice.



Slika 18.: Izračunate linearne regresije za unete podatke uzorka zemljište rotkvice.

Pri otvaranju informacije o dатој функцији, са десним кликом на назив функције отварањем *Details...* опције из малог меню у секцију *Results*-а можемоmanuelno проценити облик функције, као што је приказано на Слици 19.



Slika 19.: Informacije о једначини који најбоље описује зависност између унетих података, у овом случају модификована Hoerl једначина.

Dobijenu jednačinu koristimo za određivanje efikasnosti detekcije pri računavanju aktivnosti datog izotopa, kao što je prikazano na Slici 20.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	$t_{\text{snim}} [\text{s}]$	74842.9		$m [\text{kg}]$	0.369		ε	ε	$y = ab^x c$		a	0.34203			
2	σt_{snim}	14.9686								b	7E-13				
3										c	-0.45454				
4	$E [\text{keV}]$	N	σN	p_Y	σp_Y	ε	$A_m \left[\frac{\text{Bq}}{\text{kg}} \right]$	σA_m	$\overline{A_m}$	$\sigma \overline{A_m}$					
5	$^{232}_{90}\text{Th}$	238.632	10393	101.946	0.436	0.0004	0.02526	34.1751	1.74163	27.0136	1.47753				
6		583.191		4997	70.6895		0.845	0.0002	0.01803	11.8746	0.61705				
7		727.33		1047	32.3574		0.0658	0.0005	0.01647	34.9911	2.07391				
8	$^{226}_{88}\text{Ra}$	295.224	3514	59.279	0.193	0.002	0.02345	28.1156	1.51199	26.6747	1.41714				
9		351.932		6382	79.8874		0.376	0.004	0.02198	27.9591	1.47149				
10		609.312	5401	73.4915	0.461	0.005	0.01771	23.9494	1.26793						
11	$^{137}_{55}\text{Cs}$	661.657	1739	41.7013	0.851	0.002	0.01712	4.321	0.23983	4.321	0.23983				
12	$^{40}_{19}\text{K}$	1460.83	12519	111.888	0.1066	0.0017	0.01223	347.796	18.5159	347.796	18.5159				
13															
14	Effektivitás		Hibák												
15															
16	x	y													
17	63.30	#####		σm	0.00005		$\frac{\sigma A}{\sigma N}$	$\frac{\sigma A}{\sigma t_{\text{snim}}}$	$\frac{\sigma A}{\sigma p_Y}$	$\frac{\sigma A}{\sigma \varepsilon}$	$\frac{\sigma A}{\sigma m}$				
18	92.60	#####													
19	143.80	#####		$\sigma \varepsilon$	0.05		0.00329	0.00046	78.3832	1353.14	92.6154				
20	163.30	#####					0.00238	0.00016	14.0528	658.509	32.1805				
21	185.70	#####					0.03342	0.00047	531.779	2125.05	94.8267				
22	205.30	#####					0.008	0.00038	145.677	1199.02	76.1941				
23	238.60	#####					0.00438	0.00037	74.3594	1271.91	75.77				
24	338.30	#####					0.00443	0.00032	51.9511	1352.06	64.9036				
25	583.20	#####					0.00248	5.8E-05	5.07755	252.333	11.71				
26	766.60	#####					0.02778	0.00465	3262.63	28445.5	942.536				
27	964.80	#####													
28	969.00	#####													
29	1001.40	#####													
30	2614.50	#####													

Slika 20.: Korišćenje izabrane jednačine za kalkulaciju efikasnosti detekcije, u računu za određivanje koncentracije aktivnosti radionuklida u uzorku zemljишta rotkvice, u softveru Excel.

4. Rezultati i diskussija

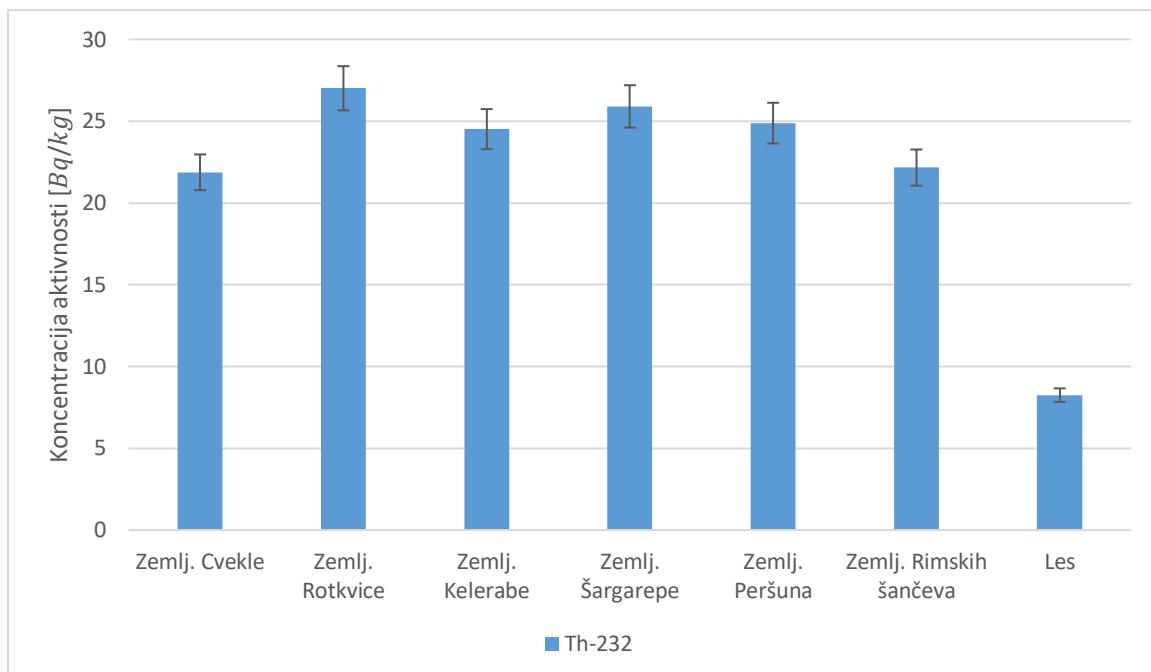
4.1 Koncentracija radionuklida u zemljишtu

Srednje vrednosti koncentracija aktivnosti radionuklida (dobijene na osnovu formule 5) sa standardnim devijacijama (dobijene na osnovu formule 6) za izotope ^{40}K , ^{137}Cs , ^{226}Ra , ^{232}Th u uzorcima zemljишta prikazane su u Tabeli 4.

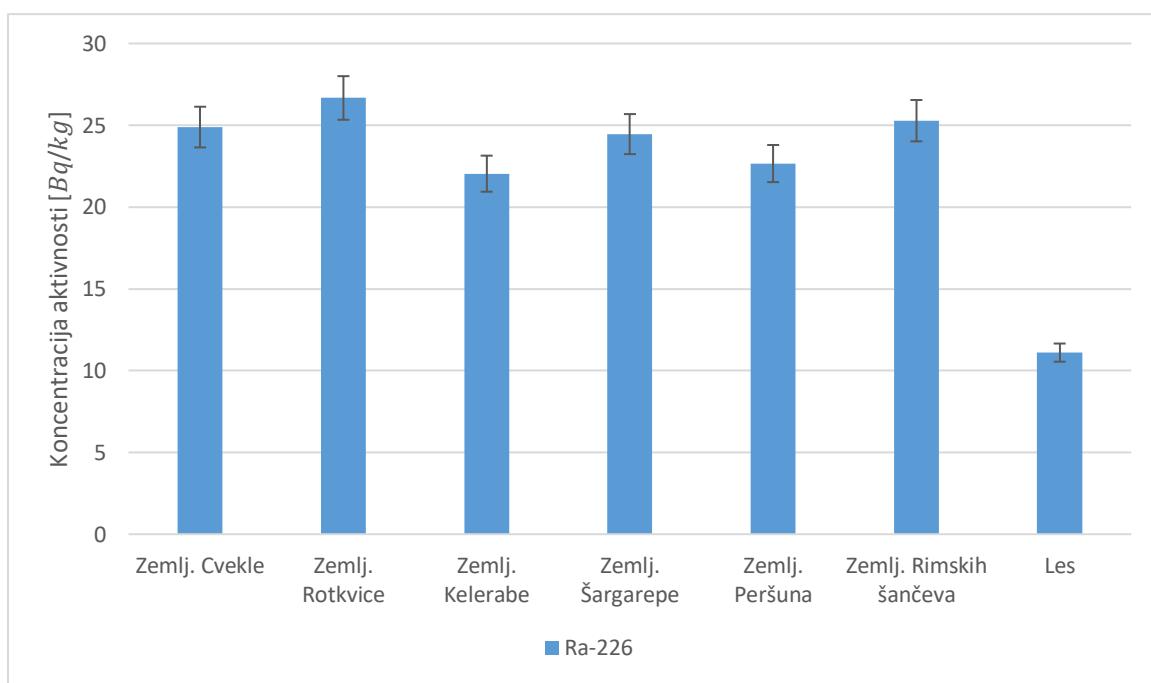
Tabela 4.: Srednje vrednosti koncentracije aktivnosti sa standardnim devijacijama, $\overline{A}_m \left[\frac{Bq}{kg} \right]$, odgovarajućeg uzorka zemljишte, za ispitivane izotope

	Zemljishi cvekle	Zemljishi rotkvice	Zemljishi kelerabe	Zemljishi šargarepe	Zemljishi peršuna	Zemlja rimskih sančeva	Les
radionuk- lid	$\overline{A}_m \left[\frac{Bq}{kg} \right]$						
^{232}Th	21.9 ± 1.2	27.0 ± 1.5	24.5 ± 1.3	25.9 ± 1.4	24.9 ± 1.4	22.2 ± 1.2	8.25 ± 0.46
^{226}Ra	24.9 ± 1.3	26.67 ± 1.42	22.0 ± 1.2	24.5 ± 1.3	22.7 ± 1.2	25.3 ± 1.3	11.10 ± 0.59
^{137}Cs	4.31 ± 0.24	4.32 ± 0.24	2.71 ± 0.15	2.90 ± 0.16	2.94 ± 0.17	1.10 ± 0.06	0.042 ± 0.007
^{40}K	267 \pm 14	348 \pm 18	298 \pm 16	339 \pm 18	314 \pm 17	388 \pm 20	90 \pm 5

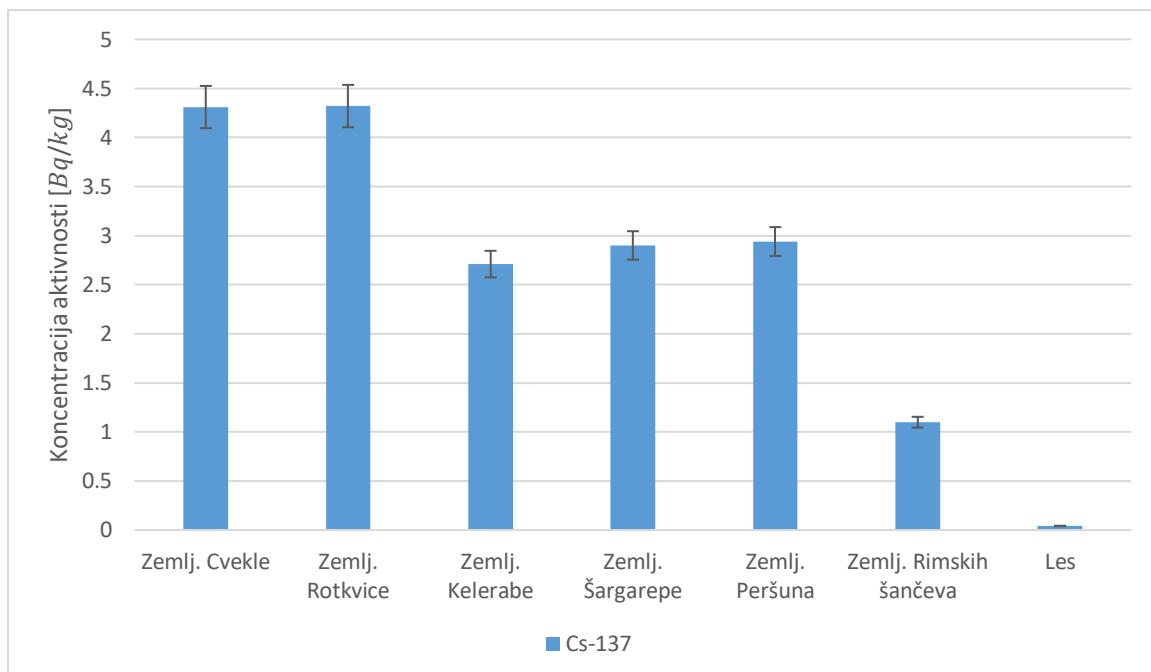
Na grafikonima (od grafikona 1. do grafikona 4.) prikazane su raspodele izmerenih koncentracija aktivnosti radionuklida u uzorcima zemljisha.



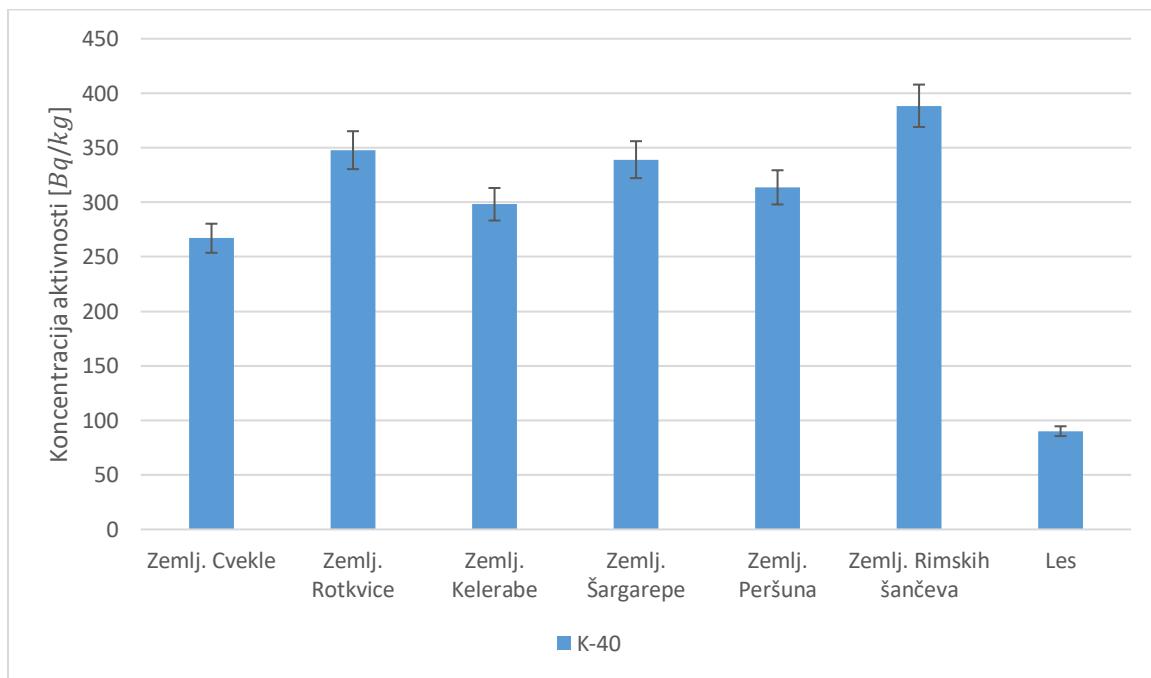
Grafikon 1.: Koncentracija aktivnosti izotopa ^{232}Th u uzorcima zemljišta.



Grafikon 2.: Koncentracija aktivnosti izotopa ^{226}Ra u uzorcima zemljišta.

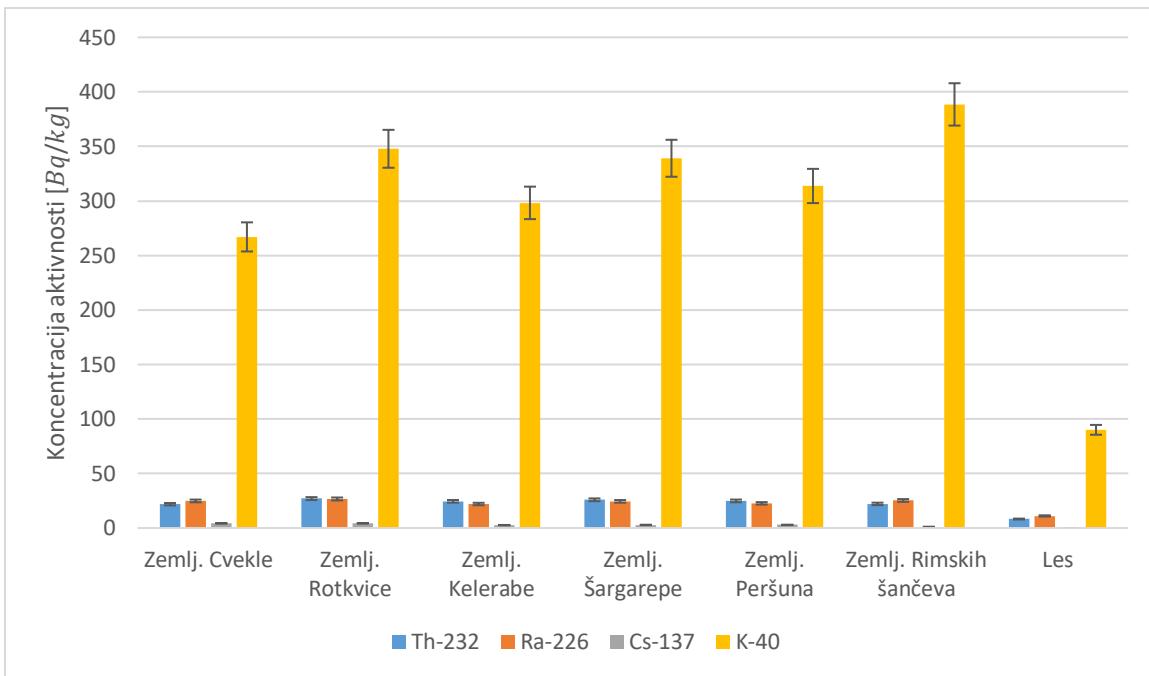


Grafikon 3.: Koncentracija aktivnosti izotopa ^{137}Cs u uzorcima zemljišta.



Grafikon 4.: Koncentracija aktivnosti izotopa ^{40}K u uzorcima zemljišta.

Raspodela koncentracije aktivnosti analiziranih radionuklida u zemljištama je prikazana na grafikonu 5.



Grafikon 5.: Raspodela koncentracije aktivnosti radionuklida ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{137}Cs , ^{40}K u uzorcima zemljišta.

Ako uporedimo analizirane uzorke zemljišta vidimo da zemlja rimskih šančeva, bez obzira na starost i neobrađivanost, je slična po sadržaju radionuklida zemljištima sa gazdinstava, čak ima i malo veću koncentraciju aktivnosti ^{40}K , dok ostali radionuklidi imaju slične vrednosti. Sa druge strane les ima oko polovine koncentracije aktivnosti ^{226}Ra , ^{232}Th , i daleko manju koncentraciju aktivnosti ^{40}K , ^{137}Cs , što nam govori o starost i o realnoj neobrađivanosti ove zemlje.

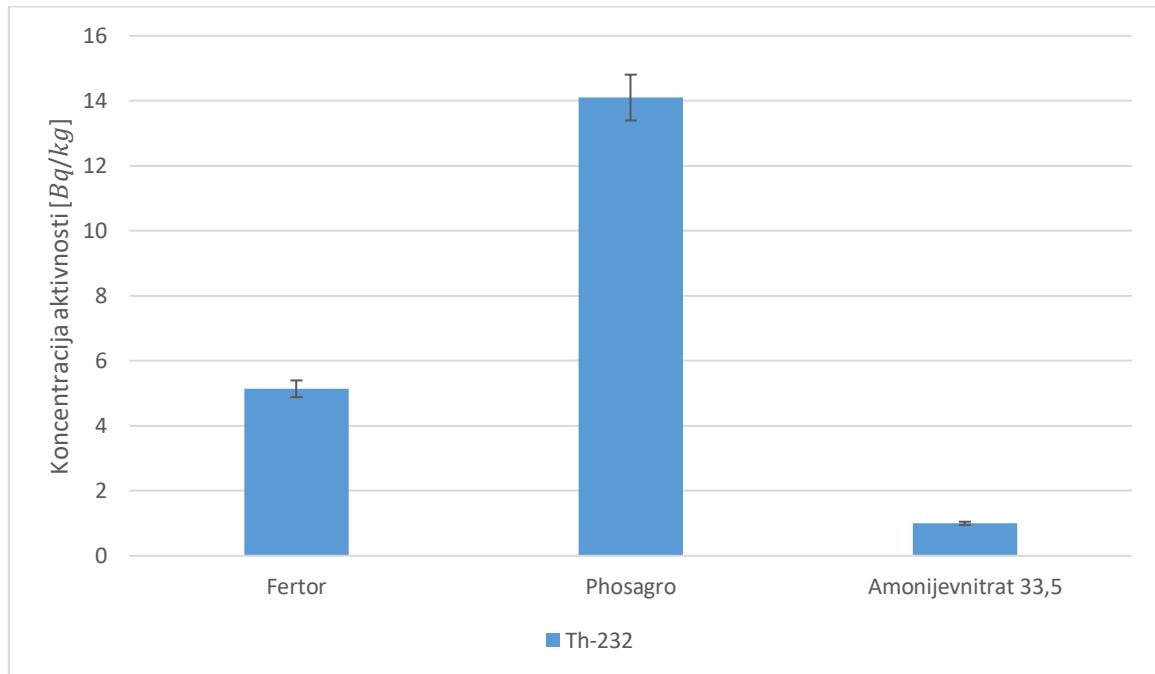
Zmljište sa gazdinstava se stalno obrađuju, s tim što je još potrebno i dopuniti ih mineralima i organskim materijama koje biljne kulture koriste tokom rasta. U tu svrhu se koriste razna veštačka đubriva. Da bismo imali tačnu sliku o dostupnosti radionuklida moramo izmeriti i koncentracije aktivnosti radionuklida u đubrivima. Kod svakog ispitivanog zemljišta važi, da je proces đubrenja vršen tromesečno.

Srednje vrednosti koncentracije aktivnosti radionuklida (dobijene na osnovu formule 5) sa standardnim devijacijama (dobijene na osnovu formule 6) za izotope ^{40}K , ^{137}Cs , ^{226}Ra , ^{232}Th u uzorcima đubriva su prikazane u Tabeli 5.

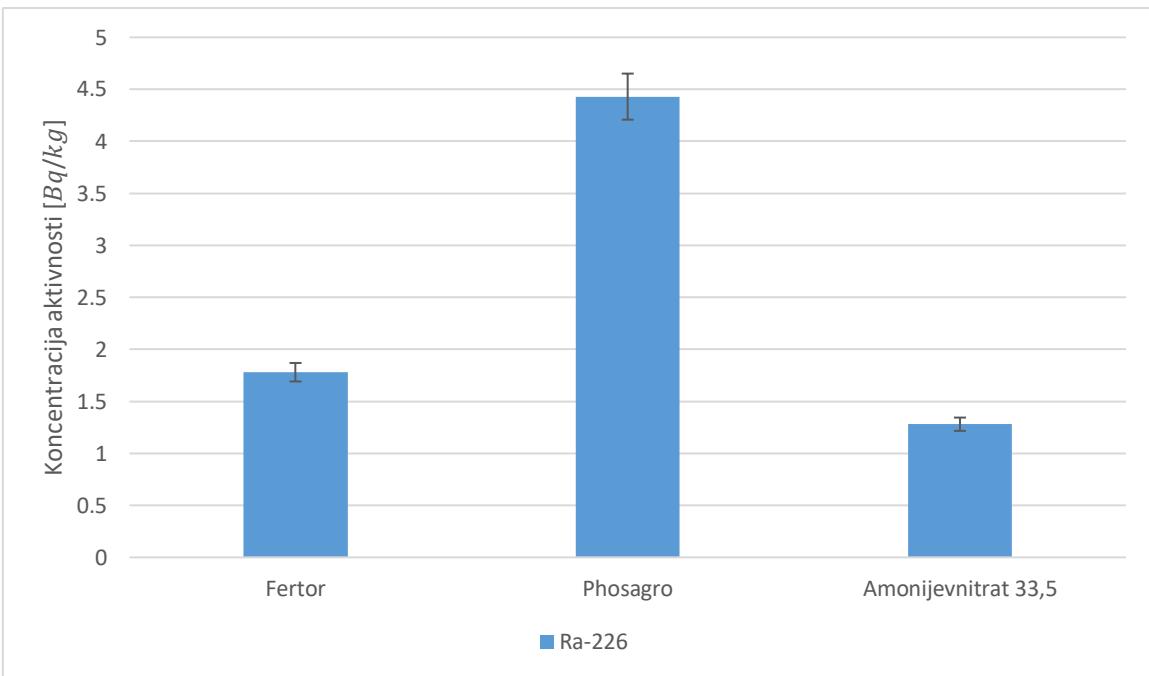
Tabela 5.: Srednje vrednosti koncentracija aktivnosti sa standardnim devijacijama, $\bar{A}_m \left[\frac{Bq}{kg} \right]$, odgovarajućeg uzorka đubriva, za ispitivane izotope.

Veštačko đubrivo radionuklid	<i>Fertor</i> $\bar{A}_m \left[\frac{Bq}{kg} \right]$	<i>Phosagro</i> $\bar{A}_m \left[\frac{Bq}{kg} \right]$	<i>Amonijumnitrat 33,5</i> $\bar{A}_m \left[\frac{Bq}{kg} \right]$
^{232}Th	5.14 ± 0.32	14.10 ± 0.86	1.00 ± 0.13
^{226}Ra	1.78 ± 0.12	4.43 ± 0.29	1.28 ± 0.11
^{137}Cs	0.013 ± 0.004	0.403 ± 0.042	0.054 ± 0.014
^{40}K	80.8 ± 4.3	6563 ± 345	1.64 ± 0.27

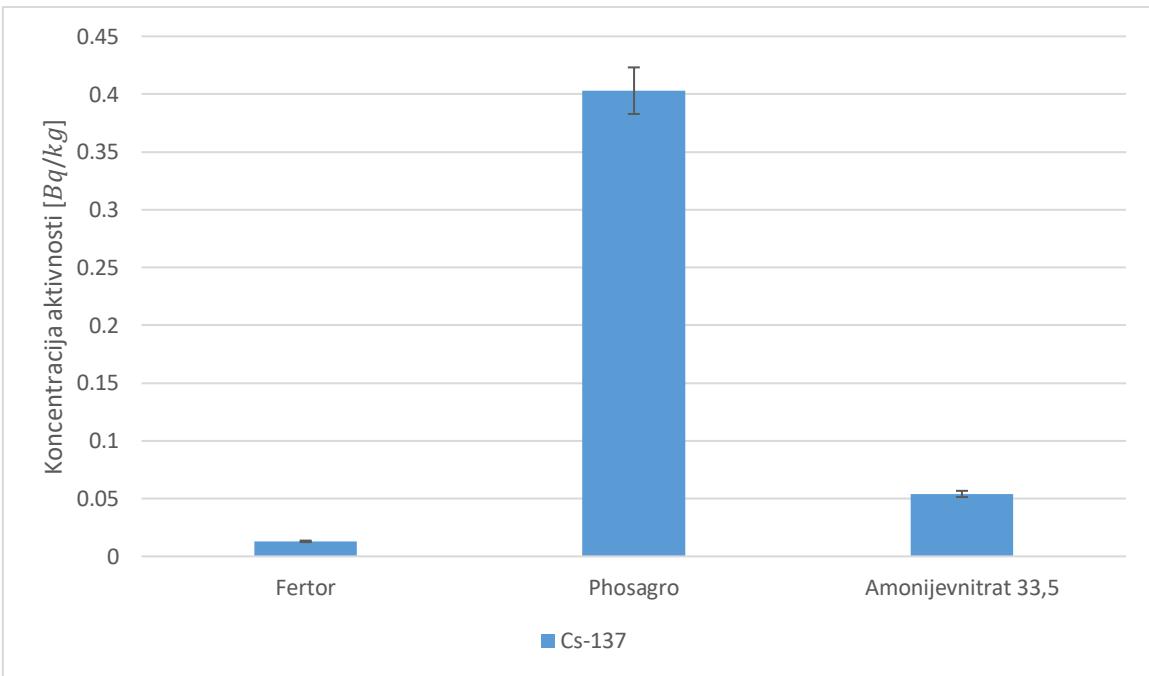
Na grafikonima (od grafikona 6. do grafikona 9.) prikazane su raspodele izmerenih koncentracija aktivnosti radionuklida u uzorcima veštačkih đubriva.



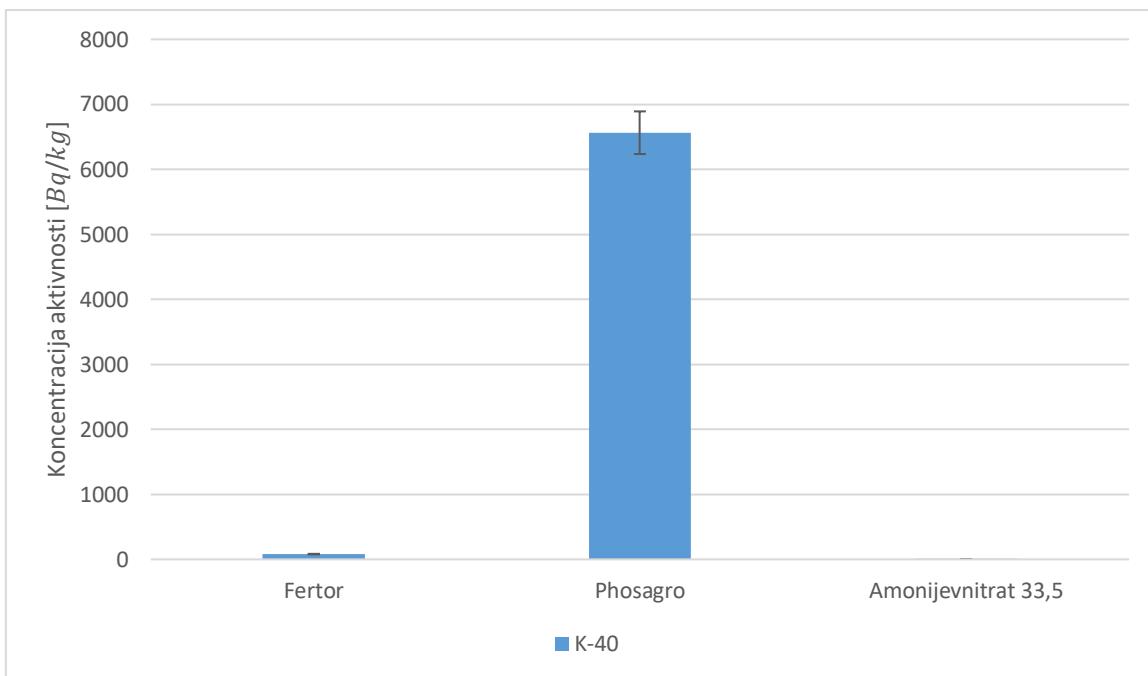
Grafikon 6.: Koncentracija aktivnosti izotopa ^{232}Th u uzorcima đubriva.



Grafikon 7.: Koncentracija aktivnosti izotopa ^{226}Ra u uzorcima đubriva.

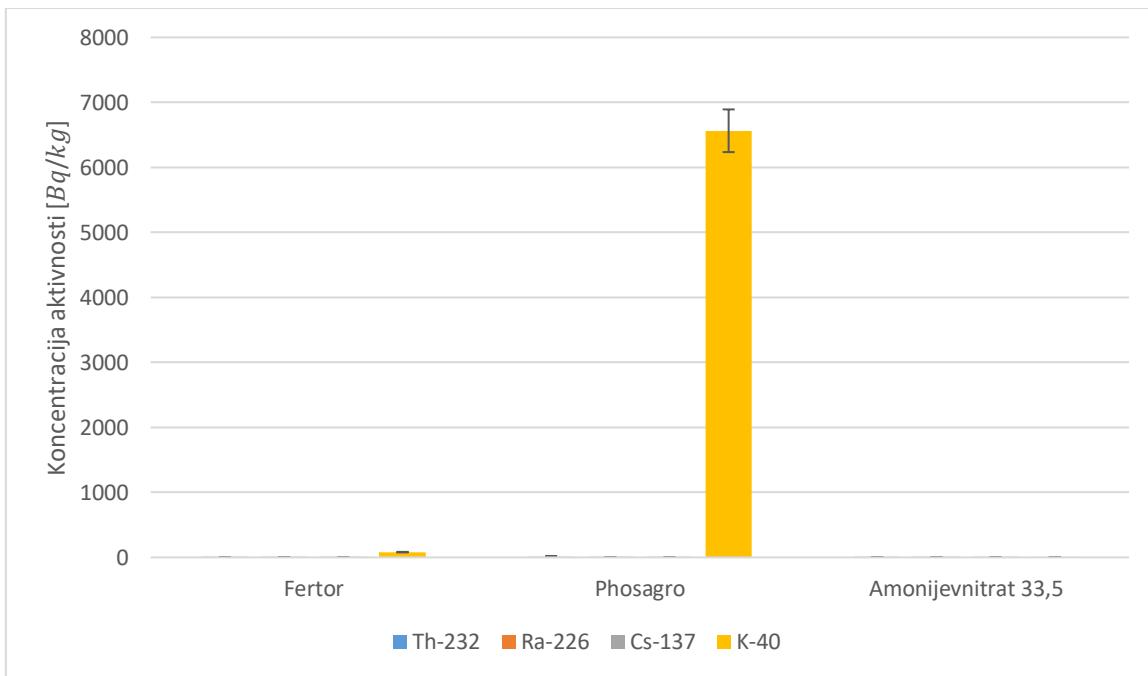


Grafikon 8.: Koncentracija aktivnosti izotopa ^{137}Cs u uzorcima đubriva.



Grafikon 9.: Koncentracija aktivnosti izotopa ^{40}K u uzorcima đubriva.

Raspodela koncentracije aktivnosti analiziranih radionuklida u veštačkim đubrivima je prikazana na grafikonu 10.



Grafikon 10.:Raspodela koncentracije aktivnosti radionuklida ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{137}Cs , ^{40}K u uzorcima đubriva.

Prema Pravilniku o granicama sadržaja radionuklida u vodi za piće, životnim namirnicama, stočnoj hrani, lekovima, predmetima opste upotrebe, građevinskom materijalu i drugoj robi koja se stavlja u prmet („Službeni glasnik RS“, br. 36 od 10.05.2018. godine) u mineralnim đubrivima granica sadržaja koncentracije aktivnosti pojedinačnih radioizotopa iznosi:[17]

- Za ^{226}Ra : $1000 \frac{Bq}{kg}$ i to za mineralna đubriva koja sadrže makrohranljivi element fosfor, a koja se kao takva stavlju u promet i primenjuju, kao i za sirovine za njihovu proizvodnju;
- Za ^{40}K : $27000 \frac{Bq}{kg}$ i to za mineralna đubriva koja sadrže makrohranljivi element kalijum i ili fosfor, a koja se kao takva stavlju u promet i primenjuju, kao i za komponente za njihovu proizvodnju.

Kao što se vidi iz Tabele 5 nijedno od analiziranih veštačkih đubriva se ne približava graničnoj vrednosti za koncentraciju aktivnosti ^{226}Ra , a samo veštačko đubrivo *Phosagro* stiže do $\sim \frac{1}{4}$ granične vrednosti za koncentraciju aktivnosti ^{40}K .

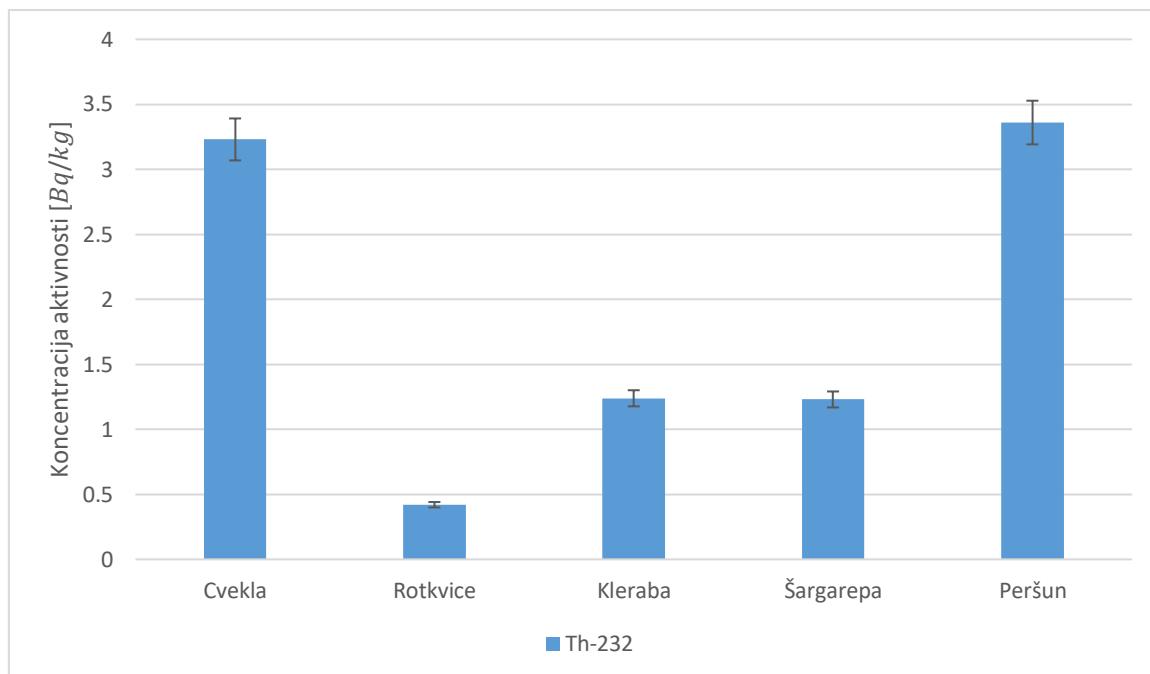
4.2 Koncentracije aktivnosti radionuklida u korenastim povrćima i procena transfer faktora

Srednje vrednosti koncentracije aktivnosti radionuklida (dobijene na osnovu formule 5) sa standardnim devijacijama (dobijene na osnovu formule 6) za izotope ^{40}K , ^{137}Cs , ^{226}Ra , ^{232}Th u uzorcima analiziranih povrća prikazane su u Tabeli 6.

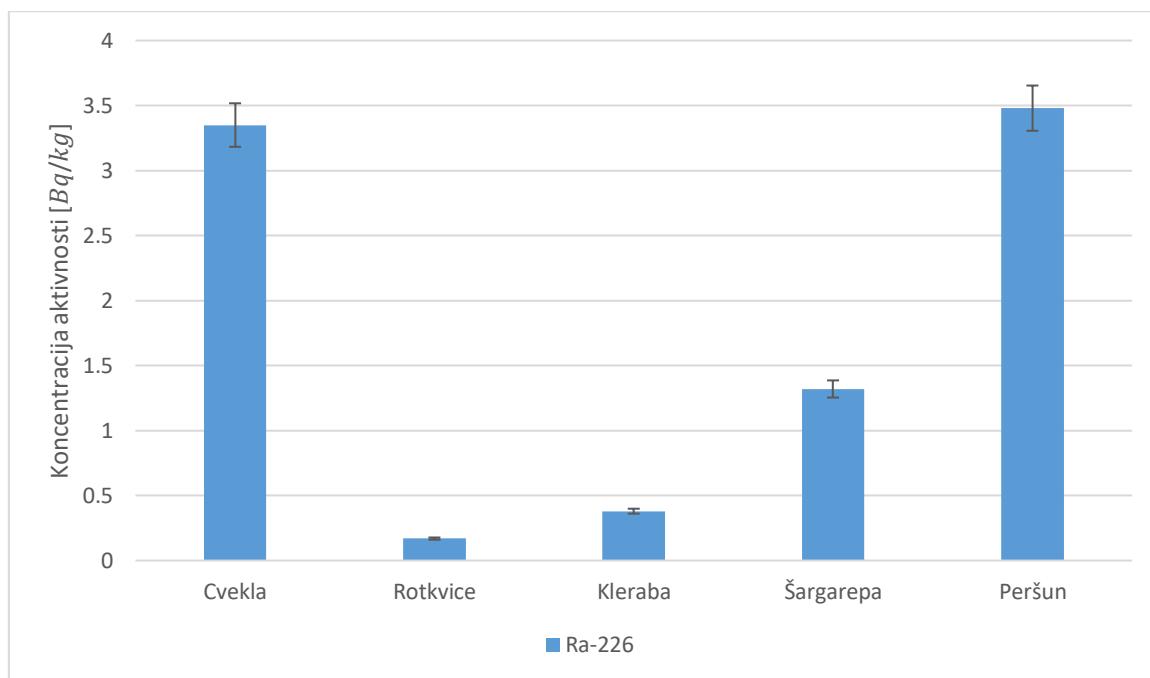
Tabela 6.: Srednje vrednosti koncentracija aktivnosti sa standardnim devijacijama, $\overline{A}_m \left[\frac{Bq}{kg} \right]$, odgovarajućeg uzorka korenastih povrća, za ispitivane izotope.

Korenasto povrće	cvekla	rotkvice	keleraba	šargarepa	peršun
radionuklid	$\overline{A}_m \left[\frac{Bq}{kg} \right]$				
^{232}Th	3.23 ± 0.27	0.42 ± 0.05	1.24 ± 0.10	1.23 ± 0.15	3.36 ± 0.28
^{226}Ra	3.35 ± 0.25	0.169 ± 0.023	0.38 ± 0.04	1.32 ± 0.13	3.48 ± 0.26
^{137}Cs	0.47 ± 0.05	0.052 ± 0.008	0.031 ± 0.006	0.24 ± 0.03	0.49 ± 0.05
^{40}K	107.8 ± 6.1	15.28 ± 0.87	18.1 ± 1.0	104.7 ± 5.9	112.2 ± 6.3

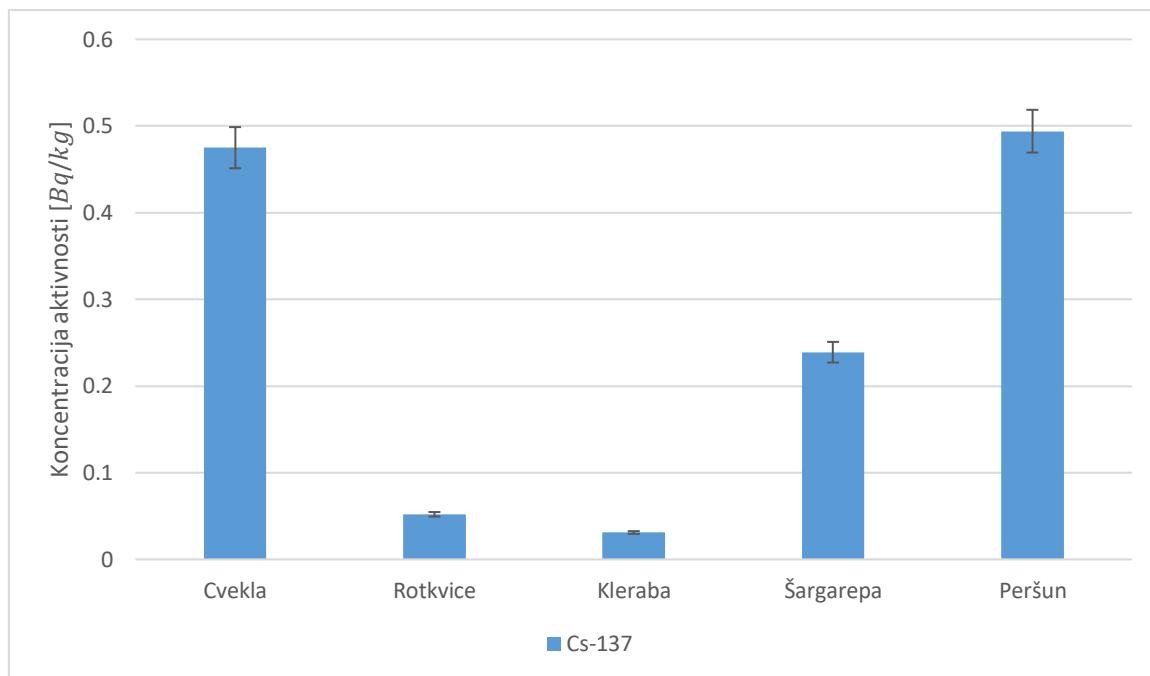
Na grafikonima (od grafikona 11. do grafikona 14.) prikazane su raspodele izmerenih koncentracija aktivnosti radionuklida u uzorcima korenastih povrća.



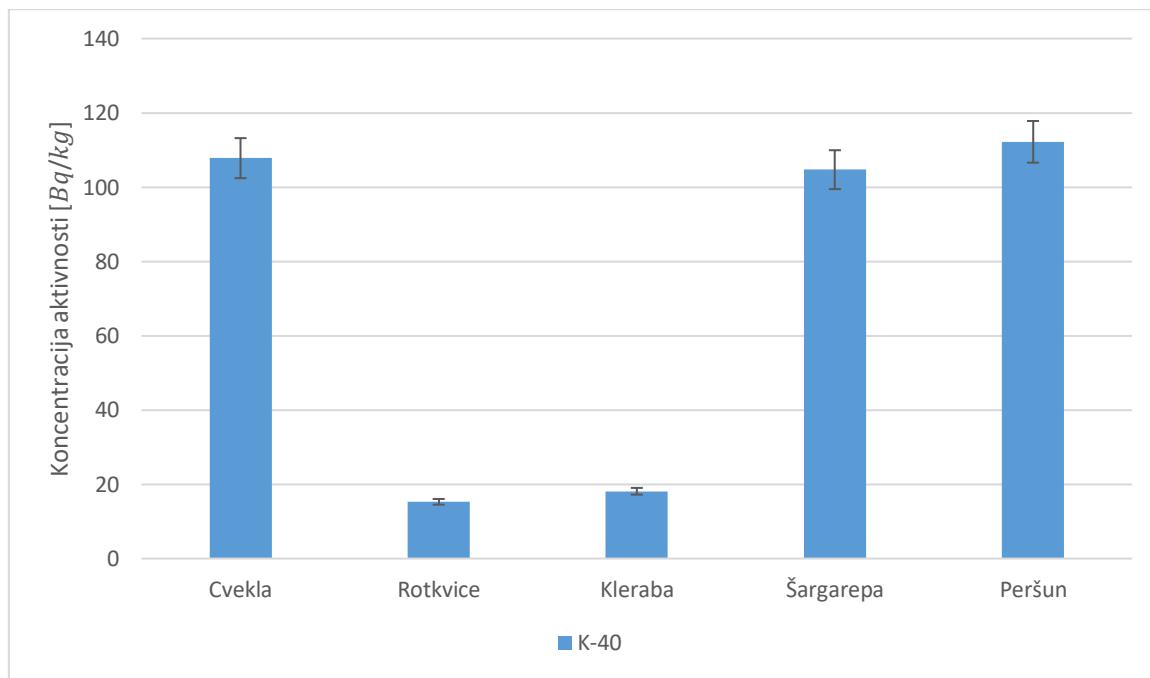
Grafikon 11.: Koncentracija aktivnosti izotopa ^{232}Th u uzorcima korenastih povrća.



Grafikon 12.: Koncentracija aktivnosti izotopa ^{226}Ra u uzorcima korenastih povrća.

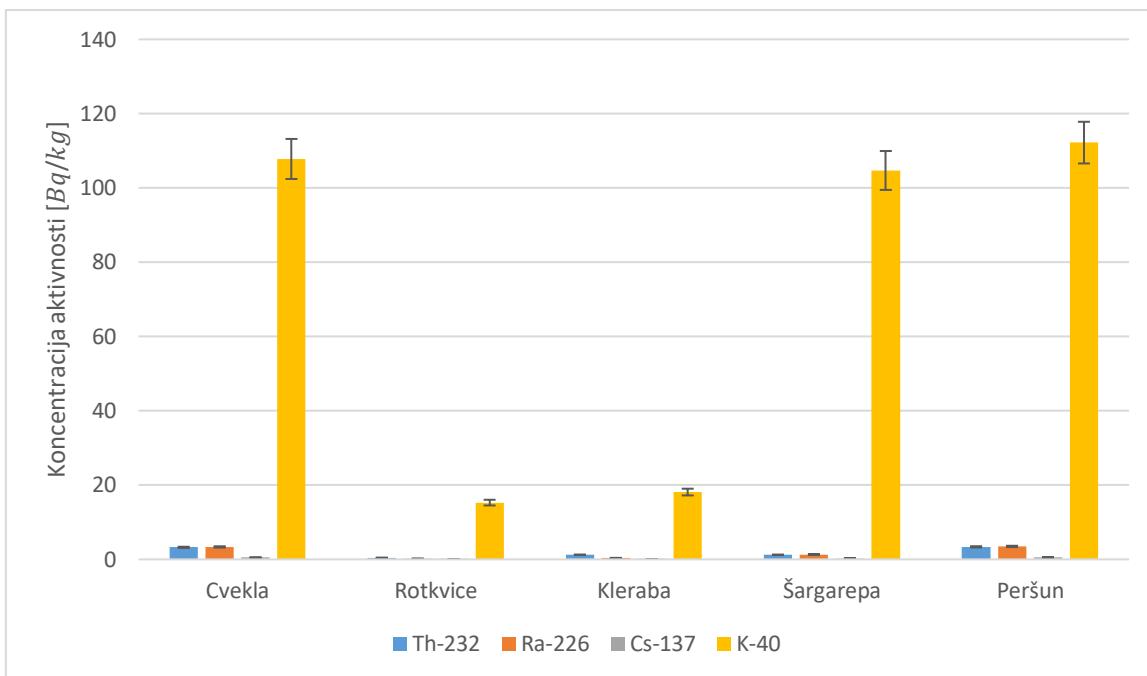


Grafikon 13.: Koncentracija aktivnosti izotopa ^{137}Cs u uzorcima korenastih povrća.



Grafikon 14.: Koncentracija aktivnosti izotopa ^{40}K u uzorcima korenastih povrća.

Raspodela koncentracije aktivnosti analiziranih radionuklida u korenastim povrćima je prikazana na grafikonu 15.



Grafikon 15.: Raspodela koncentracije aktivnosti radionuklida ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{137}Cs , ^{40}K u uzorcima korenastih povrća.

Iz Tabele 6 se vidi da od ispitanih korenastih povrća rotkvice i keleraba apsorbuju najmanju količinu analiziranih radionuklida u odnosu na cveklu, šargarepu i peršun.

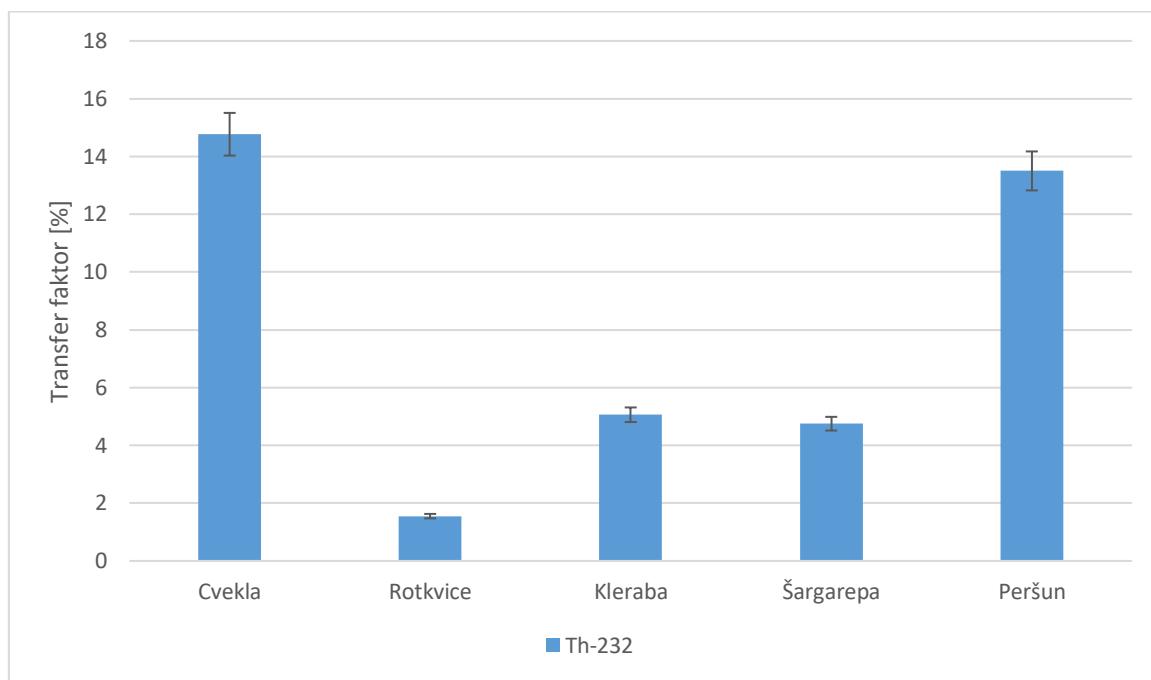
Prema Pravilniku o granicama sadržaja radionuklida u vodi za piće, životnim namirnicama, stočnoj hrani, lekovima, predmetima opste upotrebe, građevinskom materijalu i drugoj robi koja se stavlja u prmet („Službeni glasnik RS“, br. 36 od 10.05.2018. godine), granica sadržaja ^{137}Cs u povrću je $15 \frac{Bq}{kg}$.[17] U ispitanim uzorcima je utvrđeno da svi uzorci sadrže koncentraciju aktivnosti ovog veštačkog radioizotopa koja je značajno ispod propisane granične vrednosti.

Izračunati transfer faktori ([%]) (dobijene na osnovu formule 7) iz zemljišta u povrće sa standardnim devijacijama (dobijene na osnovu formule 8) za ispitivane uzorke korenastih povrća za radionuklide ^{40}K , ^{137}Cs , ^{226}Ra , ^{232}Th su dati u Tabeli 7.

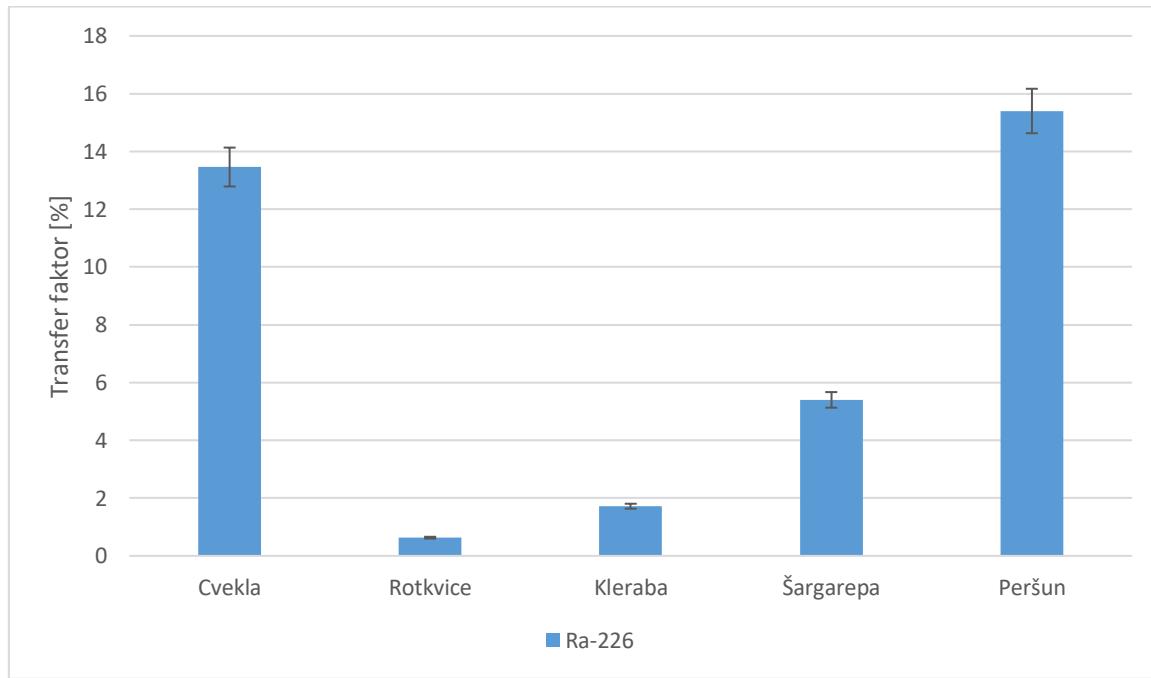
Tabela 7.: Transfer faktori ([%]) radioizotopa sa standardnim devijacijama, za ispitivane uzorke korenastih povrća.

Radionuklid	Cvekla	Rotkvica	Keleraba	Šargarepa	Peršun
^{232}Th	14.8 ± 1.6	1.55 ± 0.19	5.06 ± 0.48	4.75 ± 0.66	13.5 ± 1.4
^{226}Ra	13.6 ± 1.3	0.63 ± 0.09	1.72 ± 0.19	5.40 ± 0.62	15.4 ± 1.4
^{137}Cs	10.0 ± 1.3	1.20 ± 0.19	1.14 ± 0.23	8.2 ± 1.3	16.8 ± 2.1
^{40}K	40.4 ± 3.6	4.39 ± 0.34	6.08 ± 0.47	33.4 ± 2.7	35.8 ± 2.8

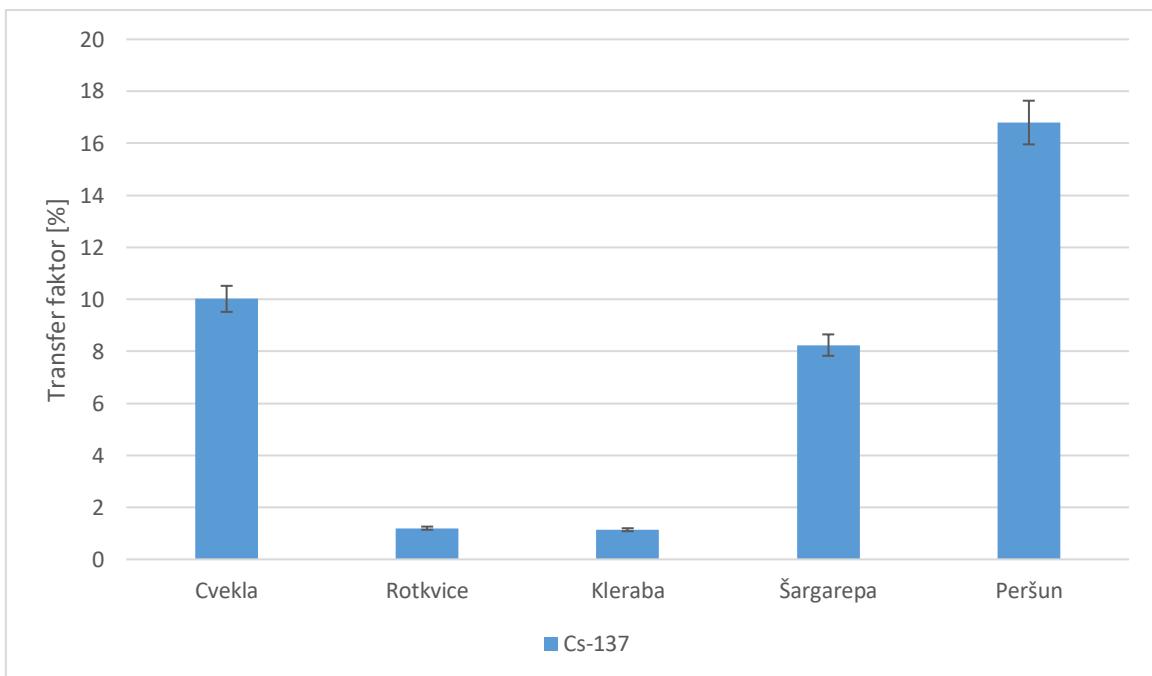
Na grafikonima (od grafikona 16. do grafikona 19.) prikazani su transfer faktori ([%]) radioizotopa za analizirane uzorke korenastih povrća.



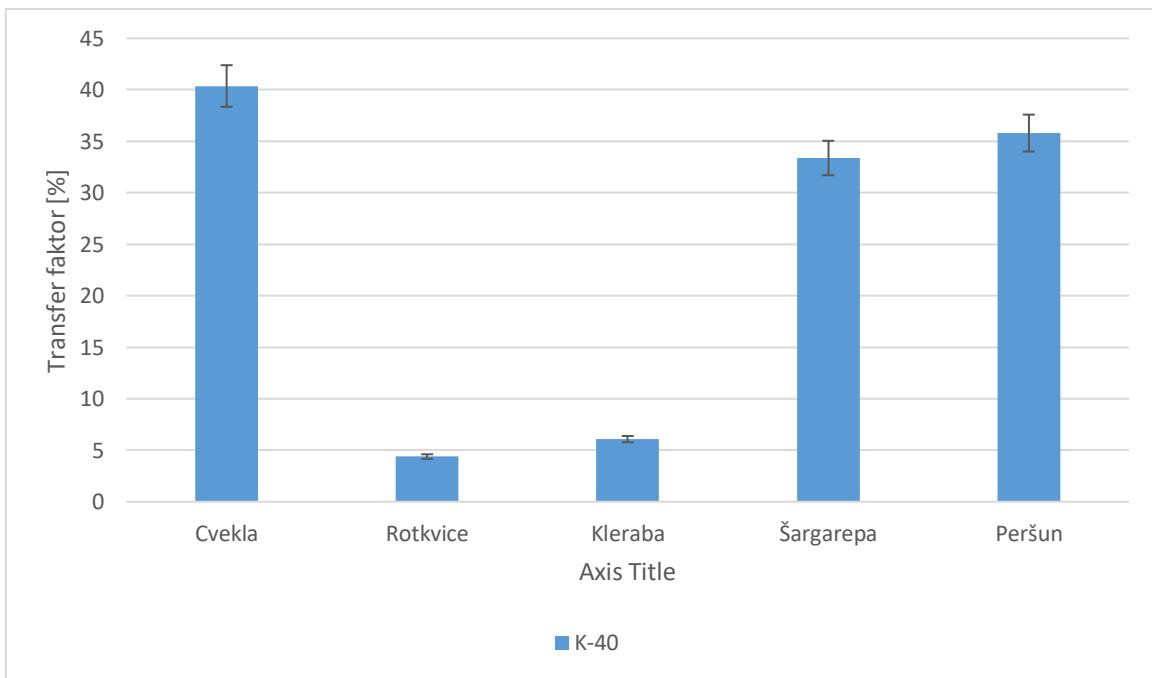
Grafikon 16.: Transfer faktori ([%]) izotopa ^{232}Th za korenasta povrća.



Grafikon 17.: Transfer faktori ([%]) izotopa ^{226}Ra za korenasta povrća.

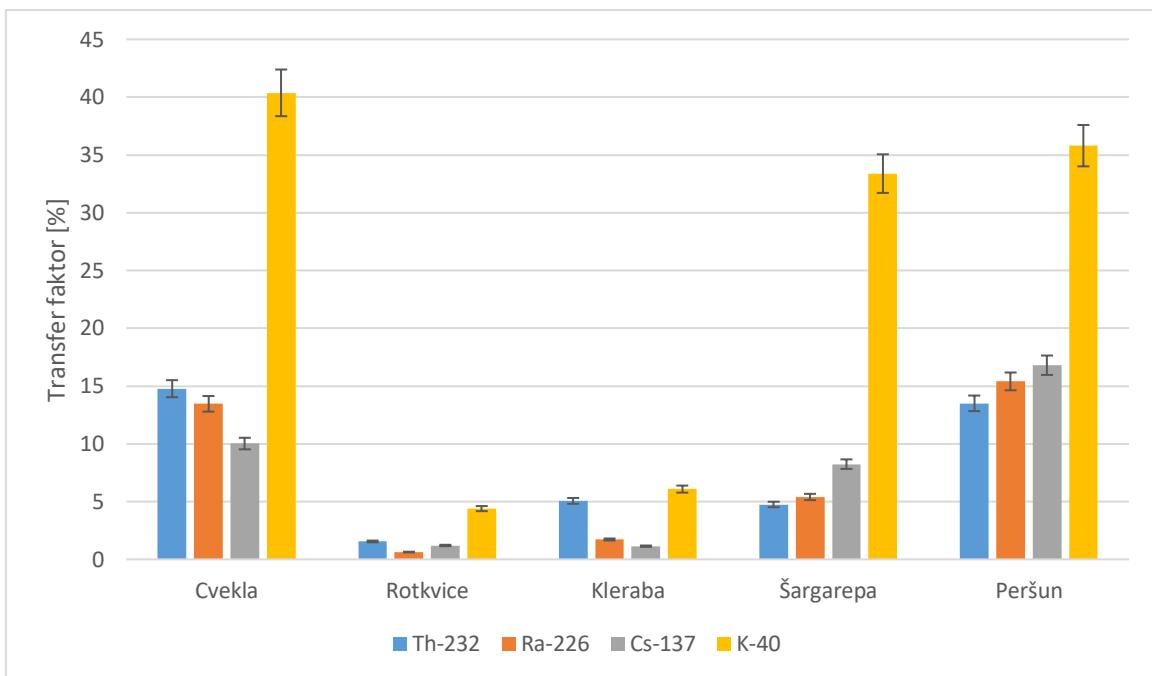


Grafikon 18.: Transfer faktori ([%]) izotopa ^{137}Cs za korenasta povrća.



Grafikon 19.: Transfer faktori ([%]) izotopa ^{40}K za korenasta povrća.

Poređenje vrednosti transfer faktora (%) analiziranih radionuklida za ispitivane uzorke korenastih povrća prikazano je na grafikonu 20.



Grafikon 20. Poređenje transferv faktora ([%]) za ispitivane radionuklide različita korenasta povrća.

Na osnovu dobijenih transfer faktora i izmerenih koncentracija aktivnosti pojedinačnih radionuklida možemo zaključiti, da su svi analizirani uzorci korenastih povrća bezbedni za konzumiranje. To znači da bi ove biljne kulture – korenasta povrća mogla da predstavljaju opasnost po ljudsko zdravlje jednog ako bi se uzbajale na zemljištu koje je visoko radiokontaminirano i sa značajno povišenim koncentracijama aktivnosti analiziranih radionuklida. Generalno svi uzorci su pokazali da najvećim delom usvajaju kalijum-40. Konkretno u slučaju cvekle to je oko 40%, u slučaju šargarepe i peršuna preko 30%.

Eksperimentalno određene transfer faktore upoređujemo i sa tabelarnim vrednostima u publikaciji od strane IAEA, Quantification of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments for Radiological Assessments [18], gde je ispitivano 13 vrsta korenastih povrća, među kojima su i te korenaste biljke koja su i u ovom radu ispitivane. Broj uzoraka za ispitivane izotope varira između 1-150 i transfer faktor je određen na osnovu srednje vrednosti datih uzoraka, koji su prikazani u Tabeli 8.

Tabela 8.: Srednje vrednosti trasfer faktora ([%]) od 13 vrsta korenastih povrća za date radionuklide

Izotop	Transfer faktori
^{232}Th	~0.93%
^{226}Ra	~7%
^{137}Cs	~7,5%
^{40}K	korenasto povrće nije bilo ispitivano

Srednje vrednosti eksperimentalno određenih transfer faktora za ispitivane radionuklide, sa tabelarnim srednjim vrednostima iz gore spomenute publikacije od strane IAEA, i njihova odstupanja su prikazani u Tabeli 9.

Tabela 9.: Srednje vrednosti trasfer faktora ([%]) IAEA [18], srednje vrednosti eksperimentalno određenih trasfer faktora ([%]), i njihovo odstupanje ([%]), za date radionuklide

Izotop	Transfer faktori, tabelarni vrednosti $\frac{\text{IAEA}}{TF_{tab}}$	Transfer faktori, eksperimentalno određeni $\frac{TF_{exp}}{TF_{exp}}$	Odstupanje $1 - \frac{TF_{tab}}{TF_{exp}}$ * 100%
^{232}Th	~0.3%	~7.9%	~88.2%
^{226}Ra	~7%	~7.4%	~5.4%
^{137}Cs	~7,5%	~7.47%	~0.4%
^{40}K	korenasto povrće nije bilo ispitivano	~24%	-

Pošto su u publikaciji IAEA, koncentracija aktivnosti korenastih povrća i odgovarajućih zemljišta prikazane u obliku prosečnih vrednosti, ne postoje detaljni podaci ni o osobinama korenastih povrća ni o osobinama zemljišta. U ovom radu za korišćene uzorke tačno znamo podatke o zemljištu, o obradi zemljišta, o đubrenju zemljišta, o korišćenom tipu đubriva, za svaku vrstu korenastih povrća. Ovo omogućuje gazzinstvima da obezbede stalni kvalitet proizvedenog povrća. U našem slučaju eksperimentalno određene vrednosti transfer faktora tačnije opisuju osobine taloženja radionuklida za ispitivano korenasto povrće. Pri upoređivanju teorijskih i eksperimentalno dobijenih transfer faktora, očigledno je, da se značajno odstupanje javlja kod izotopa ^{232}Th , ali zbog nedostatka podataka, u ovoj formi ne možemo ga objasniti. Kod izotopa ^{40}K ne možemo odrediti odstupanje, pošto za ovaj radioizotop u IAEA publikaciji nije analizirano korenasto povrće. Na osnovu srednje vrednosti eksperimentalno određenih transfer faktora za ^{40}K , ~24%, možemo prihvati ovu vrednost kao smernicu ali su neophodna i dalja istraživanja sa većim brojem uzoraka kako korenastih povrća tako i veštačkih đubriva. Međutim kod izotopa ^{226}Ra i ^{137}Cs odstupanje je malo, za ^{226}Ra je ~5.4%, dok je za ^{137}Cs samo ~0.4%, što je jako bitno obzirom da se prisustvom veštačkog radionuklida ^{137}Cs može detektovati nuklearni akcident.

Ove vrednosti transfer faktora isto pokazuju, da korenasto povrće ne usvaja velike količine radionuklida. Najtačniju sliku mogli bismo imati, ako bi imali mogućnost upoređivanja transfer faktora, koje smo dobili našim merenjima, sa transfer faktorima za iste kulture korenastih povrća koje bi bile uzorkovane sa lokacija nuklearnih nesreća, npr. iz Chernobyl-a.

Moramo napomenuti, pri normalnim uslovima, u slučaju sezonskih povrća transfer faktor ne može da bude više od 100%. Dok kod listnatog povrća, npr. spanać, salata, može da se pojavi vrednost transfer faktora koja je veća od 100%, i to je zbog toga, jer na velikim listovima se mogu taložiti radionuklidi, koji su u aerosolnoj formi, ali u takvim slučajevima se mora proveriti izvor radionuklida koji je povećao transfer faktor. Korenasta povrća najznačajniji deo radionuklida usvajaju iz zemljišta, tj. u slučaju kad transfer faktor prelazi 100%, prvi korak je

da se proveri uzorak zemljišta, da li je bio adekvatno uzorkovan. Ako je uzorkovanje bilo adekvatno, onda se traži uzrok pojave diskutabilnih radionuklida. Ovakva radiokontaminacija zemljišta je retka na područjima koja su udaljena od nuklearnih elektrana i takva zemljišta dominantno sadrže prirodne radionuklide, a retko veštački ^{137}Cs .

U Tabeli 10 su prikazani maseni udeli suve materije za ispitivana korenasta povrća.[18,19]

Tabela 10.: Maseni udeo suve materije u ispitivanim korenastim povrćima.

Korenasto povrće	Maseni udeo suve materije [%]
Cvekla	~22%
Rotkvice	~9%
Keleraba	~6%
Šargarepa	~14%
Peršun	~23%

Na osnovu vrednosti prikazanih u Tabeli 10 i vrednosti transfer faktora prikazanih u Tabeli 7, može se zaključiti da postoji jasna korelacija masenog udela suve materije u biljnoj kulturi i transfer faktora u slučaju analiziranih koreanstih povrća. Odavde, na osnovu određenih podataka, možemo zaključiti da pri procavanju udela suve materije u ispitivanom povrću možemo i grubo proceniti očekivanu koncentraciju aktivnosti radionuklida u povrću. „Suvo” povrće sadrži veću koncentraciju aktivnosti radionuklida, i obrnuto. Dokazivanje ove prepostavke zahteva dalja istraživanja. U svakom slučaju na osnovu ovog parametra možemo samo inicijalno zaključiti koji uzorak je neophodno dalje analizirati i pratiti, posebno u slučaju preterane upotrebe visoko aktivnog veštačkog đubriva ili u slučaju nekog radiološkog akcidenta koji bi doveo do povišene radiokontaminacije poljoprivrednog zemljišta.

5. Zaključak

Koncentracija aktivnosti radioizotopa ^{232}Th u uzorcima poljoprivrednih zemljišta varira oko srednje vrednosti $\sim 25.86 \frac{Bq}{kg}$, što je otprilike polovina srednje vrednosti za poljoprivredno zemljište AP Vojvodine, od $\sim 43 \frac{Bq}{kg}$, na osnovu rezultata merenja iz 2011. godine.[20]

Koncentracija aktivnosti ^{226}Ra u uzorcima poljoprivrednih zemljišta varira oko srednje vrednosti $\sim 24.5 \frac{Bq}{kg}$, što je $\sim 70\%$ srednje vrednosti za AP Vojvodinu, od $\sim 35.4 \frac{Bq}{kg}$, izmerene 2011. godine. Koncentracija aktivnosti ^{226}Ra , koji je član niza ^{138}U , prirodno prati koncentraciju ^{238}U . Koncentracija aktivnosti ^{238}U nije bio predmet ovog rada, tj. tehnološko povećanje ovog izotopa nije praćeno.[20]

Veštački radioizotop ^{137}Cs je prisutan u tragovima u svakom uzorku zemljišta. U zavisnosti od gazdinstva i lokacije parcele vidimo jasne razlike u koncentraciji aktivnosti. Najveću koncentraciju aktivnosti ima zemljište cvekle/rotkvice i iznosi $\sim 4.32 \frac{Bq}{kg}$, dok zemljište šargarepe i peršuna, koje se nalaze nekoliko kilometara dalje imaju samo $\sim 2.90 \frac{Bq}{kg}$. Ovu razliku u koncentraciji aktivnosti ne možemo objasniti samo havarijom nuklearne elektrane „Lenin“ u Chernobyl-u, ni primenom konkretnih veštačkih đubriva na datim zemljištima. Ovo pitanje zahteva dalje istraživanje koje bi uključilo veći broj uzoraka kako bi se dobio reprezentativniji zaključak.[20]

Koncentracija aktivnosti ^{40}K u uzorcima poljoprivrednih zemljišta varira oko srednje vrednosti $\sim 329.32 \frac{Bq}{kg}$, što je $\sim 60\%$ srednje vrednosti za AP Vojvodinu, od $\sim 569 \frac{Bq}{kg}$, izmeren 2011. godine. Kalijum-40 je prisutan u zemljištu u većim koncentracijama jer se u većoj meri koriste veštačka đubriva koja sadrže kalijum i on se zadržava, akumulira se u zemljištu. Razlike u koncentracijama aktivnosti kalijuma-40 na različitim parcelama nisu pronađene bez obzira na korišćeno veštačko đubrivo ili na biljnu kulturu kojom je ta parcela kultivisana.[20]

Eksperimentalno određeni transfer faktori za date kulture korenastog povrća, mogu nam dati dobre smernice ne samo za opštinu Bečeј, već i za teritoriju AP Vojvodine ukoliko se radi o istom tipu zemljišta. Na osnovu ovih transfer faktora i udela suve materije u ispitivanom povrću možemo grubo da procenimo očekivanu koncentraciju aktivnosti radionuklida u povrću. Jasna korelacija između masenog udela suve materije povrća i transfer faktora pokazuje da „suvo“ korenasto povrće (u ovom slučaju cvekla, šargarepa i peršun) sadrži veću koncentraciju aktivnosti radionuklida, i obrnuto (u radu „vlažnije“ povrće su rotkvice i keleraba).

Transfer faktor za radioizotop ^{232}Th je najveći za cveklu $\sim 14.8\%$, čiji maseni udeo suve materije iznosi $\sim 22\%$, a najmanji za rotkvicu $\sim 1.55\%$, čiji je maseni udeo suve materije $\sim 9\%$.

Transfer faktor za radioizotop ^{226}Ra je najveći za peršun $\sim 15.4\%$, čiji je maseni udeo suve materije $\sim 23\%$, a najmanji za rotkvicu $\sim 0.63\%$, čiji je maseni udeo suve materije $\sim 9\%$.

Transfer faktor za radioizotop ^{137}Cs je najveći za peršun $\sim 16.8\%$, čiji je maseni udeo suve materije $\sim 23\%$, a najmanji za kelerabu $\sim 1.14\%$, čiji je maseni udeo suve materije $\sim 6\%$.

Transfer faktor za radioizotop ^{40}K je najveći za cveklu $\sim 40.4\%$, čiji je maseni udeo suve materije $\sim 22\%$, a najmanji za rotkvicu $\sim 4.39\%$, čiji je maseni udeo suve materije $\sim 9\%$.

U slučaju nedostupnosti eksperimentalno određenih transfer faktora za dati region ili za date kulture korenastih povrća, ipak možemo koristiti tabelarne vrednosti određene od strane IAEA. Na osnovu podataka IAEA približno možemo proceniti količine radionuklida u korenastim povrćama i u našem regionu.

U ovom radu se pokazalo da je određivanje transfer faktora adekvatan alat za obezbeđivanje zdrave hrane čiji je izvor korenasto povrće.

Opšti zaključak je da je zbog akumulacije radionuklida u raznim delovima biljnih kultura bitno pratiti radioaktivnost poljoprivrednog zemljišta i truditi se da se ne koriste visoko aktivna veštačka đubriva. Pored toga potrebno je kontrolisati i uzorke biljnih kultura na sadržaj radionuklida. Na ovaj način obezbeđujemo zdravu i ispravnu hranu, kako za ljude tako i za životinje.

6. Literatura

- [1] Holics László, Csákány Antal, Flórik György, Gnädig Péter, Juhász András, Sükösd Csaba, Tasnádi Péter, Fizika, Akadémia kiadó, Budapest 2009.
- [2] <https://www.merckmanuals.com/professional/injuries-poisoning/radiation-exposure-and-contamination/radiation-exposure-and-contamination>
- [3] Nataša Todorović, Dozimetrija i zaštita od jonizujućeg zračenja, Novi Sad, 2009.
- [4] <https://www.armscontrol.org/factsheets/nucleartesttally>
- [5] <https://idsa.in/issuebrief/kudankulam-incident-cherian-munish-161219>
- [6] B.A. Markert, A.M. Breure, H.G. Zechmeister, Bioindicators & Biomonitoring, Elsevier, UK, 2003.
- [7] <http://jps.usm.my/wp-content/uploads/2014/10/24.1.8.pdf>
- [8] https://nottinghamrepository.worktribe.com/preview/1018770/Cox_et_al_Ecomod_Simplification_Accpted.pdf
- [9] <http://www.ekourbapv.vojvodina.gov.rs/wp-content/uploads/2018/10/Merenje-radioaktivnosti-zemljista-na-teritoriji-AP-Vojvodine-u-2010.0.pdf>
- [10] <http://www.gammadata.se/assets/Uploads/XtRa-detectors-C49310.pdf>
- [11] Aleksandar Rikalo, Procena efekta samoapsorpcije u niskoenergetskom delu gama-spektra korišćenjem EFFTRAN-a, master rad, Novi Sad, 2019.
- [12] mr Sofija Forkapić, Istraživanje gasovitih radioaktivnih produkata uranijuma i torijuma, doktorska disertacija, Novi Sad, 2013.
- [13] <https://www.iaea.org/>
- [14] <https://www.nndc.bnl.gov>
- [15] Anja Bartula, Korekcije krive efikasnosti HPGe detektora usled pravog koïncidencijonalnog sumiranja programom EFFTRAN, master rad, Novi Sad, 2018.
- [16] Jelena Nikolić, Tim Vidmar, Dejan Joković, Milica Rajićić, Dragana Todorović, Calculation of HPGe efficiency for environmental samples: comparison of EFFTRAN and GEANT4, 2014.
- [17] <http://www.srbatom.gov.rs/srbatomm/wp-content/uploads/2019/11/Pravilnik-o-granicama-sadrzaja-r.pdf>
- [18] IAEA, Quantification of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments for Radiological Assessments, Vienna, 2009.; link:https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_1616_web.pdf

- [19] Paweł Mundala, Arthur Szwalec, Renata Kedzior, Marek Telk, Marta Machaj, Lead and iron contents in parsley being cultivated in the area of Chrzanow geochemical anomaly, Krakow, 2015.
- [20] Vladica Nikolić, Radioaktivnost zemljišta Vojvodine, diplomski rad, Novi Sad, 2011.



7. Biografija

Žigmond Sečedi je rođen 11.02.1991 u Senti. Završio je osnovnu školu „Sever Đurkić“ i gimnaziju „Gimanazija Bečeј“ u Bečeju. Po završetku gimnazije, 2010. godine upisuje Prirodno-matematički fakultet u Novom Sadu, na nastavnom modulu fizike, koji završava 2019. godine. Iste godine, upisuje master akademske studije nuklearne fizike.

UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

Redni broj:

RBR

Identifikacioni broj:

IBR

Tip dokumentacije:

Monografska dokumentacija

TD

Tip zapisa:

Tekstualni štampani materijal

TZ

Vrsta rada:

Master rad

VR

Autor:

Žigmond Sečedi

AU

Mentor:

Prof. dr Jovana Nikolov

MN

Naslov rada:

Procena transfer faktora i sadržaja radionuklida u korenastim povrćima

NR

Jezik publikacije:

Srpski (latinica)

JP

Jezik izvoda:

Srpski/engleski

JL

Zemlja publikovanja:

Republika Srbija

ZP

Uže geografsko područje:

Vojvodina

UGP

Godina:

2020

GO

Izdavač:

Autorski reprint

IZ

<i>Mesto i adresa:</i>	Prirodno-matematički fakultet, Trg Dositeja Obradovića 4, Novi Sad
MA	
<i>Fizički opis rada:</i>	5 poglavja/60 strana/10 tabela/20 slika/20 grafikon/11 formula/20 reference
FO	
<i>Naučna oblast:</i>	Fizika
NO	
<i>Naučna disciplina:</i>	Nuklearna fizika
<i>ND</i>	
<i>Predmetna odrednica/ ključne reči:</i>	Transfer faktor radionuklida iz zemlje u biljku, koncentracija radionuklida, zemlja, đubrivo, korenasto povrće, EFFTRAN, ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{137}Cs , ^{40}K
PO	
UDK	
<i>Čuva se:</i>	Biblioteka departmana za fiziku, PMF-a u Novom Sadu
ČU	
<i>Važna napomena:</i>	Nema
VN	
<i>Izvod:</i>	Cilj ovog rada je određivanje sadržaja radionuklida u korenastim povrćama, u njihovim zemljиштама, i u korišćenim veštačkim đubrivima, i preko dobijenih podataka eksperimentalno određivanje transfer faktora radionuklida iz zemlje u biljku.
IZ	
<i>Datum prihvatanja teme od NN veća:</i>	10.09.2020.
DP	
<i>Datum odbrane:</i>	28.09.2020.
DO	
<i>Članovi komisije:</i>	
KO	
<i>Predsednik:</i>	dr Nataša Todorović, redovni profesor
<i>član:</i>	dr Jovana Nikolov, vanredni profesor
<i>član:</i>	dr Branka Radulović, naučni saradnik

UNIVERSITY OF NOVI SAD
FACULTY OF SCIENCE AND MATHEMATICS

KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number:

ANO

Identification number:

INO

Document type: Monograph publication

DT

Type of record: Textual printed material

TR

Content code: Final paper

CC

Author: Žigmond Sečedi

AU

Mentor/comentor: Jovana Nikolov, Ph.D, associate professor

MN

Title: Determination of transfer factor and radionuclide content in root vegetables

TI

Language of text: Serbian (Latin)

LT

Language of abstract: English

LA

Country of publication: Republic of Serbia

CP

Locality of publication: Vojvodina

LP

Publication year: 2020

PY

Publisher: Author's reprint

PU

Publication place: Faculty of Science and Mathematics, Trg Dositeja Obradovića 4, Novi Sad

PP

Physical description: 5 chapters/60 pages/10 tables/20 pictures/20 charts/11 equations/20 literature
PD

Scientific field: Physics

SF

Scientific discipline: Nuclear Physics

SD

Subject/ Key words: Transfer factor of radionuclides from soil to plant, radionuclide content, soil, fertilizer, root vegetable, EFFTRAN, ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{137}Cs , ^{40}K
SKW

UC

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

HD

Note: None

N

Abstract: The aim of this paper is to determine the radionuclide content of root vegetables, their soil, and the used fertilizers, and the determination of transfer factors of radionuclides from soil to plant.
AB

Accepted by the Scientific Board: 10.09.2020.

ASB

Defended on: 28.09.2020.

DE

Thesis defend board:

DB

President: dr Nataša Todorović, full professor

Member: dr Jovanan Nikolov, associate professor

Member: dr Branka Radulović, research associate