

UNIVERZITET U BEOGRADU
FAKULTET ZA FIZIČKU HEMIJU

Nataša B. Sarap

**PRAĆENJE DISTRIBUCIJE
RADIONUKLIDA ^{90}Sr
U POLJOPRIVREDNOM ZEMLJIŠTU
I BILJNIM KULTURAMA
METODOM SPEKTROMETRIJE
BETA ZRAČENJA**

doktorska disertacija

Beograd, 2017.

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF PHYSICAL CHEMISTRY

Nataša B. Sarap

**TRACKING OF
 ^{90}Sr RADIONUCLIDE DISTRIBUTION
IN AGRICULTURAL SOIL AND CROPS
BY BETA RADIATION
SPECTROMETRY METHOD**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2017

KOMISIJA ZA OCENU I ODBRANU DOKTORSKE DISERTACIJE

Mentori:

dr Marko Ž. Daković, docent

Katedra za radiohemiju i nuklearnu hemiju,
Fakultet za fizičku hemiju, Univerzitet u Beogradu

dr Marija M. Janković, naučni saradnik

Laboratorija za zaštitu od zračenja i zaštitu životne sredine,
Institut za nuklearne nauke „Vinča”, Univerzitet u Beogradu

Članovi komisije:

dr Marko Ž. Daković, docent

Katedra za radiohemiju i nuklearnu hemiju,
Fakultet za fizičku hemiju, Univerzitet u Beogradu

dr Marija M. Janković, naučni saradnik

Laboratorija za zaštitu od zračenja i zaštitu životne sredine,
Institut za nuklearne nauke „Vinča”, Univerzitet u Beogradu

dr Miloš D. Mojović, vanredni profesor

Katedra za radiohemiju i nuklearnu hemiju,
Fakultet za fizičku hemiju, Univerzitet u Beogradu

Datum odbrane: _____

Zahvalnica

Ova doktorska disertacija je izrađena u okviru projekta III43009: „Nove tehnologije za monitoring i zaštitu životnog okruženja od štetnih hemijskih supstanci i radijacionog opterećenja”.

Posebnu zahvalnost upućujem mentoru doc. dr Marku Dakoviću na ukazanom poverenju, podršci, strpljenju, vremenu, savetima i svestranoj pomoći pri pisanju disertacije, bez čijih korekcija ona ne bi imala ovu formu.

Mentorki dr Mariji Janković, naučnom saradniku Instituta za nuklearne nauke „Vinča” dugujem zahvalnost za sve ono što sam danas u naučnom smislu, na podršci, iskrenosti i razumevanju tokom višegodišnje saradnje i u toku svih faza izrade disertacije.

Zahvalnost dugujem i vanrednom prof. dr Milošu Mojoviću na korisnim sugestijama u finalnoj izradi disertacije.

Kolegama dr Srđanu Šeremešiću, docentu Poljoprivrednog fakulteta Univerziteta u Novom Sadu i dr Željku Dolijanoviću, vanrednom prof. Poljoprivrednog fakulteta Univerziteta u Beogradu, veliko hvala za korisne sugestije i pomoć u savladavanju stručne terminologije iz oblasti ratarstva.

Kolegama dr Ivici Đaloviću i dr Petru Mitroviću, naučnim saradnicima Instituta za ratarstvo i povrtarstvo iz Novog Sada, hvala za pomoć u odabiru ratarskih useva i oglednih parcela, kao i pri uzorkovanju zemljišta i biljnog materijala.

Za određivanje fizičko-hemijskih karakteristika zemljišta veliku zahvalnost dugujem dr Aleksandru Đorđeviću, redovnom prof. Poljoprivrednog fakulteta Univerziteta u Beogradu.

Veliko hvala dr Antoniju Onjii, naučnom savetniku Instituta za nuklearne nauke „Vinča” na pruženoj mogućnosti da analize određivanja koncentracija metala uradim u Laboratoriji „Anahem”.

Hvala kolegi Andriji Saviću iz Laboratorije 060 Instituta za nuklearne nauke „Vinča” za pomoć u određivanju koncentracija anjona i katjona.

Ogromnu zahvalnost upućujem majci Nadi, ocu Branku, sestri Branki i njenoj deci Milanu i Irini, bez čije безусловne podrške i strpljenja ne bih uspeła i koji me svojom ljubavlju i pažnjom čine neizmerno srećnom.

Nataša Sarap

**PRAĆENJE DISTRIBUCIJE RADIONUKLIDA ⁹⁰Sr
U POLJOPRIVREDNOM ZEMLJIŠTU I BILJNIM KULTURAMA
METODOM SPEKTROMETRIJE BETA ZRAČENJA**

Sažetak

Zemljište predstavlja potencijalni izvor kontaminacije živog sveta, zbog čega je od izuzetnog značaja praćenje distribucije veštačke radioaktivnosti u njemu. Cilj ove disertacije je bio da proširi saznanja o kontaminaciji poljoprivrednog zemljišta i useva antropogenim radionuklidom ⁹⁰Sr. Praćena je distribucija ovog radionuklida u zemljišnom profilu i usevima oglednih polja „Radmilovac” u Beogradu i „Rimski Šančevi” u Novom Sadu u periodu od 2013. do 2015. godine, metodom spektrometrije beta zračenja. Osim toga, određene su i koncentracije ukupnih stroncijuma i kalcijuma u zemljištu i usevima, zatim koncentracije anjona i katjona, kao i fizičko-hemijske karakteristike zemljišta oglednih polja.

Primenom statističke analize koja je uključivala linearnu korelacionu analizu i jednofaktorsku analizu varijanse (ANOVA test), utvrđeno je postojanje značajnih razlika (nivo značajnosti: $p < 0,001$; 0,01 i 0,05) u specifičnim aktivnostima ⁹⁰Sr u zemljištu i usevima, kao i karakteristikama zemljišta dva poljoprivredna sistema koja koriste različite tehnologije gajenja useva i režim đubrenja. Pored toga, rezultati statističke analize su dali uvid u glavne faktore koji utiču na migraciju ⁹⁰Sr u zemljištu i biljnim kulturama, što doprinosi spoznaji o ponašanju ovog radionuklida u životnoj sredini i faktorima koji regulišu kompleksan proces njegovog ponašanja u agroekosistemu.

Stepen radijacione sigurnosti ispitivanog dela ekosistema je procenjen na osnovu radioekoloških parametara: transfer faktor zemljište - usev, broj stroncijumovih jedinica, koeficijent diskriminacije, koeficijent zaštite i K-parametar. Na osnovu vremenskog praćenja distribucije ⁹⁰Sr u poljoprivrednom zemljištu i usevima, kao i izračunatih radioekoloških parametara, zaključeno je da ne postoji radijaciona opasnost ispitivanog agroekosistema, niti ciklusa biljne proizvodnje, u pogledu kontaminacije ovim radionuklidom. Rezultati modelovanja migracije ⁹⁰Sr iz zemljišta u nadzemni deo useva su pokazali relativno dobro slaganje sa izračunatim vrednostima transfer faktora

zemljište - usev, što ukazuje da korišćeni model usvajanja može dobro da predvidi migraciju ^{90}Sr iz zemljišta u biljne kulture.

Ključne reči: Radionuklid ^{90}Sr ; Beta spektrometrija; Ogledno polje; Usevi; Statistička analiza; Radioekološki parametri; Matematički model

Naučna oblast: Fizička hemija

Uža naučna oblast: Radiohemija i nuklearna hemija, Zaštita životne sredine

UDK broj: 544.58

**TRACKING OF ^{90}Sr RADIONUCLIDE DISTRIBUTION
IN AGRICULTURAL SOIL AND CROPS
BY BETA RADIATION SPECTROMETRY METHOD**

Abstract

Soil represents a potential source of contamination of biota, which makes tracking of distribution of artificial radioactivity extremely important. The aim of this dissertation was to expand the knowledge on the contamination of agricultural soil and crops by anthropogenic radionuclide ^{90}Sr . Tracking of ^{90}Sr radionuclide distribution in the soil profile, as well as crops at experimental fields "Radmilovac" in Belgrade and "Rimski Šančevi" in Novi Sad during the period 2013 - 2015 was conducted by beta radiation spectrometry method. In addition, the total concentrations of strontium and calcium in the soil and crop, followed by concentration of the anions and the cations, as well as the physical-chemical characteristics of soil of experimental fields were determined.

The application of statistical analysis, which involved linear correlation analysis and analysis of variance (ANOVA) revealed the existence of significant differences (significance level: $p < 0.001$, 0.01 and 0.05) between the specific activity of ^{90}Sr in soil and crops, as well as between soil characteristics of two agricultural systems that use different crop production technologies and fertilization regimes. In addition, the results of statistical analysis provided insights into the main factors that affect the migration of ^{90}Sr in soil and plants, which contributes to the knowledge of the behavior of this radionuclides in the environment and the factors that regulate the complex process of its behavior in agroecosystem.

The radiation safety level of the investigated part of ecosystem was estimated based on radioecological parameters: soil - crop transfer factor (TF), number of strontium units, discrimination coefficient, protection coefficient and K-parameter. Based on the temporal tracking of ^{90}Sr distribution in agricultural soil and crops, as well as the calculated radioecological parameters, it can be concluded there is no radiation danger of investigated agroecosystem and cycle of crop production, in concerning the contamination by this radionuclide. The results of the modeling of ^{90}Sr migration from

the soil to above-ground part of the crops showed relatively good agreement with the calculated values of the transfer factors soil - crop, which indicates that used model can be successfully applied for prediction of ^{90}Sr migration in soil - soil solution - plant system.

Keywords: ^{90}Sr radionuclide; Beta spectrometry; Experimental field; Crops; Statistical analysis; Radioecological parameters; Mathematical model

Scientific field: Physical Chemistry

Narrower scientific field: Radiochemistry and Nuclear Chemistry, Environmental Protection

UDK number: 544.58

SADRŽAJ

1. UVOD	1
1.1. Cilj istraživanja	3
2. TEORIJSKE OSNOVE	4
2.1. Pojam radioaktivnosti i radioaktivnog raspada	4
2.2. Jonizujuće zračenje	4
2.2.1. Vrste jonizujućeg zračenja	5
2.3. Izvori jonizujućeg zračenja u biosferi	6
2.3.1. Prirodna radioaktivnost	7
2.3.2. Veštačka radioaktivnost	7
2.3.2.1. Poreklo veštačkih radioaktivnih supstancija u biosferi	8
2.3.2.2. Radioaktivni zagađivači biosfere fisijonog porekla	9
2.4. Hemijski profil stroncijuma	11
2.5. Radioizotop ^{90}Sr	11
2.5.1. Karakteristike ^{90}Sr	12
2.5.2. Metabolizam ^{90}Sr i njegova distribucija u biološkim sistemima	13
2.6. Migracija ^{90}Sr u ekosistemu zemljište - biljka	15
2.7. Odnos $^{90}\text{Sr}/\text{Ca}$ u ekosistemu zemljište - biljka	18
2.8. Značaj praćenja aktivnosti ^{90}Sr u uzorcima iz životne sredine	19
2.9. Literaturni pregled metoda za određivanje aktivnosti ^{90}Sr	20
2.10. Modelovanje predviđanja radioekoloških procesa	21
3. MATERIJAL I METODE	24
3.1. Lokaliteti uzorkovanja	24
3.2. Agrotehničke mere	28
3.2.1. Tehnologija gajenja useva na oglednom polju „Radmilovac”	28
3.2.2. Tehnologija gajenja useva na oglednom polju „Rimski Šančevi”	30
3.3. Odabir uzoraka zemljišta i useva	31
3.4. Priprema uzoraka	33
3.4.1. Priprema uzoraka za radiohemijsku analizu	33
3.4.2. Priprema uzoraka za određivanje koncentracija Sr i Ca	35
3.4.3. Priprema uzoraka za određivanje koncentracija anjona i katjona	36

3.5. Reagensi	37
3.6. Eksperimentalne metode analize	37
3.6.1. Radiohemijska analitička metoda	37
3.6.1.1. Osiguranje analitičkog kvaliteta i validacija metode	38
3.6.1.2. Princip radiohemijske analitičke metode	40
3.6.1.3. Spektrometrija beta zračenja	42
3.6.1.3.1. Osnovne karakteristike detektora	43
3.6.1.3.2. Određivanje radnog napona detektora	43
3.6.1.3.3. Kalibracija detektora	44
3.6.1.3.4. Stabilnost rada detektora	46
3.6.1.4. Određivanje specifične aktivnosti ^{90}Sr	46
3.6.1.5. Merna nesigurnost određivanja specifične aktivnosti ^{90}Sr	48
3.6.2. Optička emisiona spektrometrija sa induktivno spregnutom plazmom	48
3.6.2.1. Određivanje koncentracija Sr i Ca	49
3.6.3. Jonska hromatografija	49
3.6.3.1. Određivanje koncentracija anjona i katjona	50
3.6.4. Osnovne fizičko-hemijske karakteristike zemljišta	50
3.6.4.1. Određivanje osnovnih fizičko-hemijskih osobina zemljišta	55
3.7. Statistička analiza rezultata merenja	56
3.8. Parametri radijacione sigurnosti	56
3.8.1. Transfer faktor	57
3.8.2. Broj stroncijumovih jedinica	58
3.8.3. Koeficijent diskriminacije	58
3.8.4. Koeficijent zaštite	59
3.8.5. K-parametar	59
3.9. Matematički model migracije ^{90}Sr u sistemu zemljište - biljka	59
4. REZULTATI I DISKUSIJA	63
4.1. Rezultati validacije radiohemijske analitičke metode	63
4.1.1. Evaluacija analitičkih parametara validacije	63
4.2. Specifična aktivnost ^{90}Sr u poljoprivrednom zemljištu	65

4.2.1. Ogledno polje „Radmilovac”	65
4.2.2. Ogledno polje „Rimski Šančevi”	69
4.2.3. Neobradivo zemljište	73
4.3. Specifična aktivnost ^{90}Sr u usevima	74
4.3.1. Ogledno polje „Radmilovac”	74
4.3.2. Ogledno polje „Rimski Šančevi”	76
4.4. Poređenje određivanja aktivnosti ^{90}Sr u uzorcima poljoprivrednog zemljišta i useva primenom različitih metoda	78
4.4.1. Evaluacija rezultata metodološkog poređenja	80
4.5. Koncentracije Sr i Ca u poljoprivrednom zemljištu	83
4.5.1. Ogledno polje „Radmilovac”	83
4.5.2. Ogledno polje „Rimski Šančevi”	86
4.5.3. Neobradivo zemljište	91
4.6. Koncentracije Sr i Ca u usevima	92
4.6.1. Ogledno polje „Radmilovac”	92
4.6.2. Ogledno polje „Rimski Šančevi”	95
4.7. Određivanje karakteristika poljoprivrednog zemljišta	99
4.7.1. Fizičke karakteristike zemljišta oglednih polja	99
4.7.2. Hemijske karakteristike zemljišta oglednih polja	101
4.8. Koncentracije anjona i katjona u poljoprivrednom zemljištu	106
4.8.1. Ogledno polje „Radmilovac”	106
4.8.2. Ogledno polje „Rimski Šančevi”	108
4.9. Korelaciona analiza	110
4.9.1. Jednofaktorska analiza varijanse	113
4.10. Rezultati izračunavanja parametara radijacione sigurnosti	114
4.10.1. Transfer faktor obradivo zemljište - usev	114
4.10.2. Ostali parametri radijacione sigurnosti	118
4.11. Primena modela za procenu migracije ^{90}Sr u sistemu zemljište - biljka	121
5. ZAKLJUČAK	124
6. LITERATURA	127
PRILOG I	139
BIOGRAFIJA KANDIDATA	152

NAUČNI DOPRINOS KANDIDATA	154
PRILOG 1	156
PRILOG 2	157
PRILOG 3	158

1. UVOD

Živi svet i životna sredina su od nastanka izloženi jonizujućem zračenju, koje je prirodna karakteristika životne sredine i u prirodnim uslovima ne dovodi do poremećaja dinamičke ravnoteže biosfere i ekoloških sistema. Nasuprot tome, pojava antropogene (veštačke) radioaktivnosti utiče na izmenu prirodnih ekoloških karakteristika biosfere. Potencijalna ugroženost populacije i životne sredine prisustvom i štetnim dejstvom radioaktivnosti, uslovljena je postojanjem opasnosti u slučaju ratnog sukoba i testiranja i primene nuklearnog oružja, kao i u mirnodopskim akcidentima ili havarijama nuklearnih postrojenja. Primena nuklearne energije u mirnodopske svrhe je dovela do svojevrsne tehnološke revolucije, ali i povećanog rizika kontaminacije životne sredine veštačkim radionuklidima koji nastaju u ovim uslovima što predstavlja ozbiljan i globalni problem. U toku intenzivnih nadzemnih proba (testiranja) nuklearnog oružja u periodu od 1950 - 1970., u atmosferu je dospelo oko $1,89 \times 10^{20}$ Bq dugoživećih radioaktivnih izotopa (^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu , ^{85}Kr , ^{242}Cm), od čega $6,22 \times 10^{17}$ Bq ^{90}Sr i $9,48 \times 10^{17}$ Bq ^{137}Cs [1]. Pored toga, u periodu od 1957 - 2011. dogodilo se 28 nuklearnih akcidenata na reaktorima i nuklearnim postrojenjima, od kojih su na osnovu razmera i sa stanovišta opasnosti po životnu sredinu veoma značajni: Vindskejl (eng. *Windscale*, današnji Selafild, eng. *Sellafield*) u Velikoj Britaniji 1957., Ostrvo Tri Milje u Sjedinjenim Američkim Državama 1979., Černobilj u bivšem SSSR-u 1986. i Fukušima u Japanu 2011. godine. Tokom akcidenta u Černobilju koji je bio nesumnjivo najtežih razmera, u atmosferu je emitovano oko 14×10^{18} Bq radioaktivnih supstancija, koje su obuhvatale dugoživeće radionuklide: $8,5 \times 10^{16}$ Bq ^{137}Cs , 1×10^{16} Bq ^{90}Sr i 3×10^{15} Bq izotopa Pu [2]. Značajne količine radionuklida mogu dospeti u atmosferu i kao posledica primene izvora i generatora zračenja u medicinskoj, industrijskoj, naučno-istraživačkoj i drugim oblastima.

U eri napretka nuklearne tehnologije i uopšte tehnološkog razvoja, pažnju bi prvenstveno trebalo posvetiti kontroli izlaganja stanovništva jonizujućem zračenju, kao i zaštiti životne sredine. Radijaciona sigurnost bioloških populacija je uslovljena poznavanjem radioekoloških karakteristika biosfere, koje zavise od prisustva radionuklida. Osnovni parametar radijacione sigurnosti stanovništva je permanentna kontrola radioaktivnih supstancija u biosferi, a glavni preduslov je određivanje porekla

radioaktivne kontaminacije životne sredine i prostorne raspodele svih potencijalnih izvora radioaktivnog zagađivanja [3]. Time se dobija uvid o kumulativnoj depoziciji i disperziji radioaktivnih supstancija u različitim ekosistemima [4]. Distribucija radionuklida koji putem padavina dospevaju na Zemlju, bitno zavisi od njihovih fizičko-hemijskih osobina, kao i od sposobnosti raznih vrsta zemljišta da vrše sorpciju ili omogućavaju migraciju radionuklida u dublje slojeve zemljišta.

Istraživanja zakonomernosti migracije radioaktivnih fisionih produkata u lancu ishrane, daje mogućnost da se sa određenom tačnošću proceni radijaciona situacija na prostoru izloženom radioaktivnoj kontaminaciji. Danas postoji niz dinamičkih modela za predviđanje obima sadržaja radionuklida u biološkom ciklusu: *vazduh - zemljište - voda - stočna hrana/životinje - namirnice biljnog i životinjskog porekla - čovek* [5-8]. Međutim, većina modela transfera radionuklida u životnoj sredini koji u osnovi daju kvantitativnu procenu koncentracije radionuklida, ima prvenstveno za cilj da ustanovi kritične parametre koji doprinose varijacijama predviđanja u postavljenom modelu, odnosno da proceni korisnost modela za predviđanje transfera radioaktivnih polutanata.

Od antropogenih radionuklida koji nastaju kao proizvodi nuklearne fisije, od najvećeg značaja su ^{90}Sr i ^{137}Cs , jer učestvuju u mineralnom metabolizmu živih organizama. Ovi radionuklidi se lako uključuju u geološko i biološko kruženje materije u prirodi. Kontaminacija se može proširiti na velike udaljenosti putem vazdušnih struja, a rastvorne forme mogu dospeti u vodotokove kontaminirajući površinske i podzemne vode, a posledično i zemljište. Zemljište kao značajna i nezaobilazna karika u lancu kruženja materije i energije u prirodi, je naročito izloženo kontaminaciji, a posebno zemljišta koja se koriste za intenzivnu poljoprivrednu proizvodnju. Deponovanje radionuklida na tlo i vegetaciju dovodi do konzervacionih posledica po biodiverzitet [9].

Pomenuti radionuklidi su bitni radioaktivni zagađivači životne sredine koji svojim prisustvom predstavljaju jedan od najznačajnijih radioekoloških faktora i glavni predmet radioekoloških istraživanja i monitoringa životne sredine [10]. Studije o nivou zračenja i distribuciji radionuklida u životnoj sredini obezbeđuju osnovne radiološke informacije od vitalnog značaja. Takve informacije su takođe od suštinskog značaja za razumevanje izloženosti ljudske populacije izvorima jonizujućeg zračenja i neophodna su baza za donošenje propisa koji se odnose na zaštitu od zračenja. Interesovanje za distribuciju veštačkih radionuklida u uzorcima iz životne sredine je i dalje veliko, što

potvrđuju studije u svetu [11-22], a posebno poslednjih godina zbog porasta incidence pojave kancera poraslo je interesovanje i za procenu faktora rizika.

1.1. Cilj istraživanja

Ciljevi istraživanja obuhvaćenih doktorskom disertacijom su da se na osnovu analize uzoraka poljoprivrednog zemljišta i useva korišćenjem metode spektrometrije beta zračenja, dobiju nove informacije o distribuciji radionuklida ^{90}Sr na ispitivanim područjima oglednih polja u Beogradu i Novom Sadu, te migraciji iz zemljišta u biljne kulture, kao i akumulaciji i preraspodeli u različitim frakcijama useva.

Eksperimentalna istraživanja se odnose na uzorkovanje sprovedeno u periodu 2013 - 2015. i laboratorijsku analizu u cilju određivanja specifične aktivnosti ^{90}Sr , kao i koncentracije ukupnog Sr i njegovog hemijskog analoga Ca, zatim koncentracije anjona i katjona u zemljištu i fizičko-hemijskih osobina prikupljenih uzoraka zemljišta ispitivanih područja. Statističkim metodama su ispitane korelacije između koncentracija ukupnih Sr i Ca, zatim anjona i katjona, kao i aktivnosti ^{90}Sr i fizičko-hemijskih karakteristika analiziranih uzoraka zemljišta, jer one mogu uticati na migraciju ovog radionuklida u terestričkom ekosistemu, a istovremeno uslovljavaju mehanizme i ugrađivanje radionuklida u biološke sisteme. Procena radioekološke situacije u životnoj sredini ispitivanih područja je sprovedena određivanjem različitih parametara radijacione sigurnosti za ciklus obrade zemljišta i biljne proizvodnje, čime je utvrđena translokacija radionuklida ^{90}Sr . Upotrebom matematičkog modela, po prvi put je na teritoriji Republike Srbije, izvršena procena distribucije i migracije ^{90}Sr u poljoprivrednom zemljištu i usevima, čime je potvrđena kompatibilnost eksperimentalno dobijenih rezultata sa rezultatima predviđanja modelovanjem.

2. TEORIJSKE OSNOVE

2.1. Pojam radioaktivnosti i radioaktivnog raspada

Pojam radioaktivnosti je vezan za nestabilnost atomskih jezgara, koja se javlja usled nepovoljnog odnosa nukleona u jezgru atoma hemijskog elementa. Takvi sistemi se putem radioaktivnog raspada transformišu u stabilnije hemijske elemente ili izotope pri čemu dolazi do emisije odgovarajućih čestica i/ili elektromagnetskog zračenja [23,24]. Osnovni tipovi radioaktivnog raspada su: α -raspad, β -raspad, γ -raspad i spontana fisija. Gama raspad predstavlja deekscitaciju pobuđenog jezgra, pri čemu se emituje foton; najčešće prati čestične raspade [25].

2.2. Jonizujuće zračenje

Radioaktivni elementi i jonizujuće zračenje su prisutni svuda u svemiru, pa i na našoj planeti u svim delovima životne sredine. Zračenje se po poreklu deli na: prirodno zračenje (u koje spadaju kosmičko zračenje i geogeno zračenje) i tehničko zračenje tj. zračenje različitih tehničkih uređaja i električnih izvora [26]. U poređenju sa intenzitetom zračenja tehničkih izvora (rendgen aparati, nuklearni reaktori), intenzitet zračenja prirodnih izvora je relativno mali. Ekvivalent doze koju čovek primi od kosmičkog zračenja je 0,45 mSv u toku jedne godine; otprilike toliko kumulativno primi i od zračenja koja potiču od tla, atmosfere, voda i namirnica [25]. Stoga godišnje ekvivalentne doze od prirodnog zračenja iznose oko 1 mSv.

Jonizujuće zračenje je elektromagnetsko ili korpuskularno (čestično) zračenje, koje ima energiju dovoljnu ($> 12,4$ eV) da jonizuje materiju kroz koju prolazi. Tako nastali joni mogu da interaguju sa živom materijom i narušavaju biohemijske procese u živim ćelijama, što može dovesti do raznih poremećaja u njihovom funkcionisanju i deobi. To za posledicu može imati nastanak različitih oboljenja, pa i kancera [27]. Ljudski organizam ne poseduje čulo koje bi registrovalo prisustvo jonizujućeg zračenja. Poznavanje interakcija između jonizujućeg zračenja i žive materije, od ključnog je značaja u zaštiti od zračenja [28].

2.2.1. Vrste jonizujućeg zračenja

Čestično zračenje je zračenje koje se sastoji od čestica (naelektrisanih ili ne), koje imaju masu mirovanja i veliku kinetičku energiju, reda keV-a i MeV-a. Tu spadaju nuklearne čestice, kao što su β čestice ili beta zračenje (pozitivno ili negativno naelektrisane), α čestice ili alfa zračenje, neutroni (n) i protoni (p). Čestice emitovane iz radioaktivnih izvora imaju određenu energiju koju troše u interakciji sa atomima ili molekulima materije kroz koju prolaze. Interakcija jonizujućeg zračenja korpuskularne prirode sa materijom se bitno razlikuje od interakcije zračenja elektromagnetne prirode.

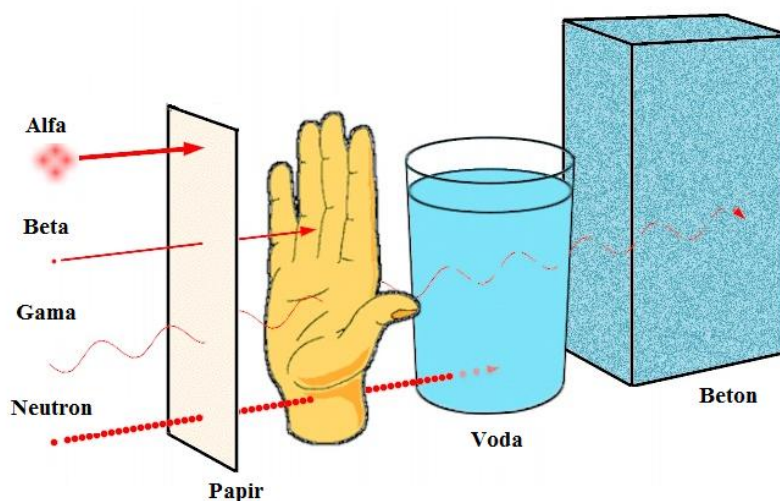
Alfa čestice se šire brzinom od oko 1/20 brzine svetlosti, što je dovoljno sporo da mogu relativno dugo međudejstvovati sa materijom. Zato imaju jako jonizujuće dejstvo. Zbog svoje veličine brzo se sudaraju sa nekim od atoma nakon čega gube energiju, pa im je domet mali (nekoliko cm u vazduhu i nekoliko desetina μm u tkivu) i zato ih može zaustaviti list papira i koža. Ukoliko se α čestice unesu u organizam ingestijom ili inhalacijom, postaju opasne zbog svog jakog jonizujućeg dejstva.

Beta zračenje čine elektroni, negativno naelektrisane čestice, koje putuju velikim brzinama i doživljavaju manji broj interakcija sa sredinom; predaju manje energije po jedinici dužine puta od α čestica. Njihovo jonizaciono dejstvo je mnogo slabije od dejstva α čestica, ali su im dometi veći (nekoliko m u vazduhu i nekoliko cm u tkivu) i zato ih može zaustaviti metalna ploča, debljine nekoliko mm. Ukoliko izvor β zračenja dospe u organizam dovodi do opasnosti usled izlaganja organizma.

Elektromagnetna zračenja imaju istu prirodu i karakteristike, razlikuju se samo u energiji. Gama zračenje je elektromagnetno zračenje velike energije, koje potiče iz jezgra atoma, a širi se brzinom svetlosti. Njegovo jonizaciono dejstvo je slabije od delovanja β čestica, ali mu je domet veći. Predaje relativno malo energije po jedinici dužine puta i može da pređe velika rastojanja, čak i u sredinama velike gustine. Prolazi kroz ljudsko telo, a dejstvo se može redukovati pomoću debelog sloja olova, betona ili vode. Rendgensko ili X zračenje ima ista svojstva kao i γ zračenje, ali i nešto veću talasnu dužinu. Razlikuje se od γ zračenja po načinu nastanka; potiče od elektrona (bombardovanje mete elektronima velikih brzina), a ne iz jezgra (γ zračenje nastaje u metastabilnim jezgrima nastalim raspadom radioaktivnih atoma).

Neutroni se kao zračenje javljaju uglavnom u nuklearnim reaktorima, a kao zaštita od njih koristi se voda i beton.

Kosmičko zračenje čine razne visokoenergetske čestice. Intenzivnije je na većim nadmorskim visinama. Izvor ovog zračenja koje nas neprestano pogađa, je uglavnom izvan našeg Sunčevog sistema, a sastoji se od raznih oblika zračenja, od vrlo brzih teških čestica, pa do visokoenergetskih fotona i miona. Ono deluje sa atomima u gornjim slojevima atmosfere i tako proizvodi radionuklide, kao što su: ^{14}C , ^3H , ^7Be i drugi [25,28]. Prikaz prodornosti različitih vrsta zračenja je dat na slici 2.1.

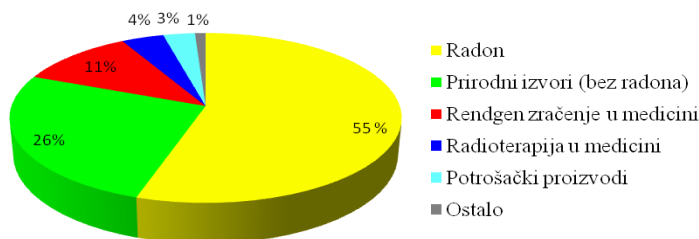


Slika 2.1. Prikaz prodornosti α , β , γ i neutronskeg zračenja (Izvor <http://www.bcm.edu/bodycomplab/Radprimer/radpenetration.htm>)

2.3. Izvori jonizujućeg zračenja u biosferi

Svi izvori jonizujućeg zračenja u biosferi se dele na: *prirodne izvore* (prirodna radioaktivnost), koji nisu posledica ljudskog delovanja i *proizvedene izvore* (veštačka radioaktivnost), koje je čovek stvorio svojim delovanjem. Komponente prirodnih izvora zračenja su kosmičko zračenje koje dolazi iz svemira i zemljišno zračenje, odnosno gasovita radioaktivnost koja iz tla dolazi u atmosferu (radon). Neki od veštačkih radioaktivnih izvora, kao radioaktivni otpad iz industrije, nuklearnih elektrana i nuklearnih eksplozija, koji su dospeli u atmosferu, rašireni su putem vazdušnih masa i vodenih strujanja na široke prostore i doprinose trajnom izlaganju stanovništva. Udeo

godišnje doze koju prima stanovništvo od izlaganja izvorima jonizujućeg zračenja, shematski je prikazan na slici 2.2.



Slika 2.2. Udeo godišnje doze koju prima stanovništvo od izlaganja izvorima jonizujućeg zračenja

2.3.1. Prirodna radioaktivnost

U prirodi postoji oko 60 prirodnih radionuklida, koji se mogu svrstati u tri osnovne grupe: teški radioizotopi (^{238}U , ^{234}U , ^{226}Ra , ^{222}Rn , ^{210}Po), srednje-teški radioizotopi (^{40}K , ^{87}Rb , ^{187}Re) i kosmogeni (uglavnom laki) radioizotopi (^3H , ^7Be , ^{10}Be , ^{14}C , ^{22}Na) [23]. Od najveće praktične važnosti su raspad i tri teška „preživela” jezgra: ^{238}U ($T_{1/2} = 4,5 \times 10^9$ godina; *uranijumov niz*), ^{235}U ($T_{1/2} = 7,1 \times 10^8$ godina, *aktinijumov niz* ili *niz aktinouranijuma*) i ^{232}Th ($T_{1/2} = 1,4 \times 10^{10}$ godina, *torijumov niz*). Za razliku od ostalih, njihovim raspadom započinje formiranje čitavog niza nestabilnih jezgara, koja se raspadaju i prelaze u druga jezgra, sve do nekog krajnje stabilnog jezgra.

2.3.2. Veštačka radioaktivnost

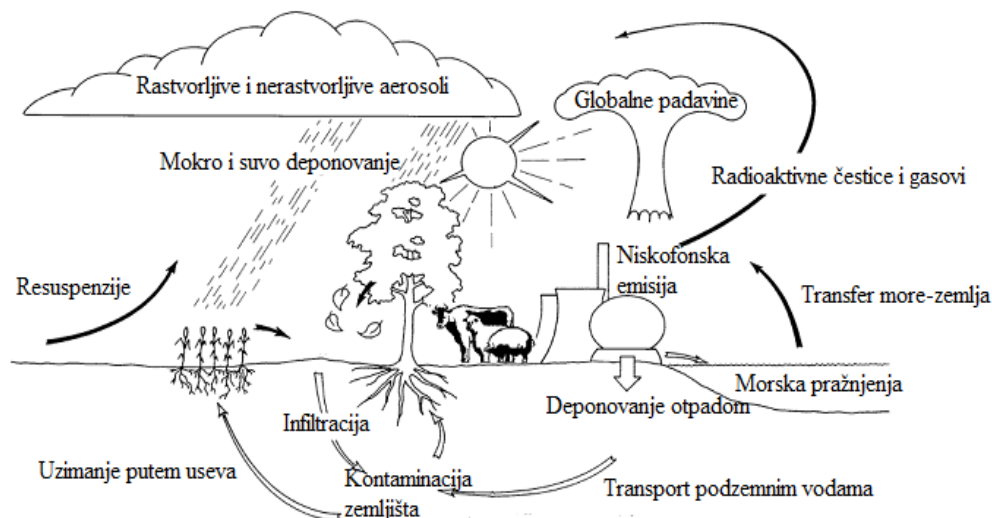
Prvi veštački radioizotopi dobijeni su početkom XX veka bombardovanjem različitih meta alfa česticama. Pronalaskom novih načina za njihovu proizvodnju, korišćenjem akceleratora i nuklearnih reaktora, broj antropogenih radionuklida je značajno porastao. Radionuklidi pogodnog vremena poluraspada i energije emitovanih

čestica/zračenja koji su proizvedeni na taj način, našli su primenu u medicini, industriji, hemiji, biologiji i poljoprivredi.

2.3.2.1. Poreklo veštačkih radioaktivnih supstancija u biosferi

Tehnološka revolucija ostvarena primenom nuklearne energije u mirnodopske svrhe je i pored ogromnog napretka učinjenog u pogledu zaštite životne sredine, neosporno dovela do povećanja radioaktivne kontaminacije biosfere i ciklusa u njoj. Potencijalna opasnost od primene nuklearnog oružja i akcidenata na nuklearnim postrojenjima daju ovom problemu još veći značaj. Veštački radionuklidi u biosferu mogu dospeti kao posledica radioaktivnih padavina posle nuklearnih eksperimentalnih eksplozija, prodora radioaktivnih materija usled akcidenta na nuklearnom reaktoru ili drugim nuklearnim postrojenjima, ili kao nusefekat primene radioaktivnih izotopa u medicinske, tehnološke, tehničke i druge svrhe [29].

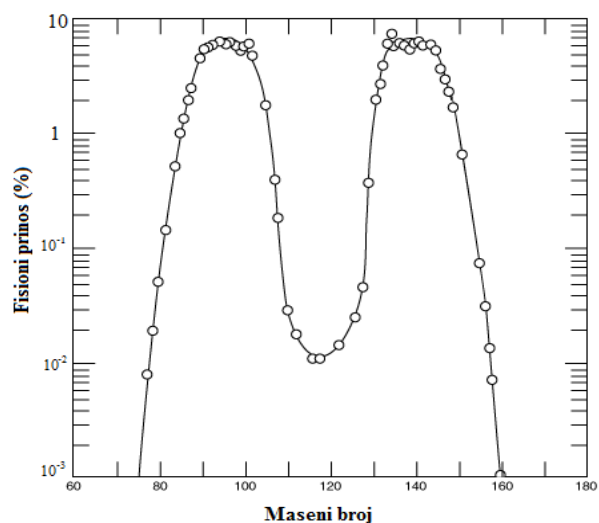
Životna sredina je veoma složen sistem koji se u prirodnim uslovima nalazi u stanju određene ravnoteže. Svaki faktor koji utiče na ovo ravnotežno stanje, ukoliko se ne kompenzuje nekim drugim faktorom, dovodi do izmene ekoloških karakteristika jednog ili više ciklusa u ekološkom sistemu. Posmatrano sa radioekološkog stanovišta, najveći značaj ima kontaminacija biosfere radioaktivnim padavinama, jer atmosferska depozicija dovodi do radioaktivne kontaminacije velikih površina. Širenje kontaminacije je uslovljeno brzinom globalnog kretanja vazdušnih masa i meteorološkim uslovima u oblastima mogućeg pojavljivanja. Putevi redistribucije veštačkih radionuklida u životnoj sredini su prikazani na slici 2.3.



Slika 2.3. Putevi redistribucije veštačkih radionuklida u životnoj sredini (Slika je preuzeta i prilagođena iz reference [3])

2.3.2.2. Radioaktivni zagađivači biosfere fisionog porekla

Od preko 200 radionuklida koji nastaju pri nuklearnoj fisiji, samo mali broj direktno ili preko lanca ishrane dospeva u organizam čoveka. Samo radionuklidi koji imaju značajniji fisioni prinos, duže vreme poluraspada i lako se resorbuju u tkivima, mogu dospeti u žive organizme. Oni se zavisno od metaboličkog procesa u koji se uključuju, mogu lakše ili teže eliminisati iz njih. Biološki značajni radioaktivni zagađivači fisionog porekla su sledeći radionuklidi: ^{89}Sr , ^{90}Sr , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{103}Ru , ^{106}Ru , ^{140}Ba , ^{131}I , ^{144}Ce , ^{65}Zn , ^{239}Pu [30]. Na slici 2.4 je dat grafički prikaz „fisionog prinosa” radionuklida stvorenih pri fisiji ^{235}U , dok su osnovne karakteristike biološki značajnih radionuklida date u tabeli 2.1. Pregled najvažnijih radionuklida i uzoraka iz životne sredine koji mogu biti kontaminirani njima, prikazan je u tabeli 2.2. Određivanje koncentracije aktivnosti navedenih radionuklida je predmet redovnog monitoringa, čija je osnovna uloga registracija i predupređenje akcidentnih situacija.



Slika 2.4. Procenat stvorenih radionuklida pri fisiji ^{235}U termalnim neutronima (Izvor <http://www.science.uwaterloo.ca/~cchieh/cact/nuctek/fissionyield.html>)

Tabela 2.1. Osnovne karakteristike biološki značajnih radionuklida fisionog porekla

Radionuklid	Vreme poluraspada	Fisioni prinos (%)	Vrsta zračenja
^{89}Sr	50,5 d	4,77	β
^{90}Sr	28,8 g	5,76	β
^{95}Zr	64,09 d	6,51	β, γ
^{99}Mo	2,747 d	6,09	β, γ
^{103}Ru	39,272 d	3,03	β, γ
^{106}Ru	372,6 d	0,4	β
$^{129\text{m}}\text{Te}$	33,6 d	0,661	β, γ
^{131}I	8,021 d	2,875	β, γ
^{132}Te	76,856 h	4,282	β, γ
^{137}Cs	30 g	6,136	β, γ
^{140}Ba	12,751 d	6,134	β, γ
^{144}Ce	284,45 d	5,443	β, γ

Tabela 2.2. Kontaminacija uzoraka iz životne sredine radionuklidima fisionog porekla

Vrsta uzorka	Radionuklid
Vazduh	$^{131}\text{I}, ^{134,137}\text{Cs}$
Voda	$^3\text{H}, ^{89,90}\text{Sr}, ^{131}\text{I}, ^{134,137}\text{Cs}$
Mleko	$^{89,90}\text{Sr}, ^{131}\text{I}, ^{134,137}\text{Cs}$
Meso	$^{134,137}\text{Cs}$
Ostala hrana	$^{89,90}\text{Sr}, ^{134,137}\text{Cs}$
Vegetacija	$^{89,90}\text{Sr}, ^{95}\text{Zr}, ^{95}\text{Nb}, ^{103,106}\text{Ru}, ^{131}\text{I}, ^{134,137}\text{Cs}, ^{141,144}\text{Ce}$
Zemljište	$^{90}\text{Sr}, ^{134,137}\text{Cs}, ^{238}\text{Pu}, ^{239+240}\text{Pu}, ^{241}\text{Am}, ^{242}\text{Cm}$

2.4. Hemijski profil stroncijuma

Stroncijum spada u II grupu periodnog sistema elemenata. Otkrili su ga 1790. Adair Crawford i William Cruikshank. Fizičko-hemijske karakteristike stroncijuma su prikazane u tabeli 2.3. Zbog svoje izražene reaktivnosti, u prirodi se ne javlja u elementarnom stanju, već najčešće u vidu minerala, karbonata (stroncijanit) ili sulfata (celestin). Hloridi i karbonati stroncijuma su rastvorljiviji u vodi od sulfata i fosfata [31]. Stabilni stroncijum je dosta rasprostranjen i učestvuje u izgradnji Zemljine kore sa masenim udelom od 0,017 % i može se naći u svim oblicima mineralnog i organskog sveta [32,33]. Stene, zemljište, prašina, ugalj, nafta, površinske i podzemne vode, vazduh, biljke i životinje sadrže različite količine stroncijuma. Tipične koncentracije stroncijuma za većinu supstancija su reda veličine nekoliko ppm (delova na milion), dok se u prirodi u koncentraciji od 375 ppm nalazi u magmatskim stenama [34]. Stroncijum se u malim količinama nalazi združen sa drugim zemnoalkalnim metalima, koji su po osobinama slični kalcijumu. Gradi slična jedinjenja kao i kalcijum, s tim što su stroncijumove soli slabo rastvorne. U biosferi se prirodni stroncijum nalazi kao smeša 4 stabilna izotopa: ^{84}Sr , ^{86}Sr , ^{87}Sr i ^{88}Sr , dok su preostalih 12 izotopa radioaktivni [32].

Tabela 2.3. Osnovne fizičko-hemijske karakteristike stroncijuma

Osobina	Vrednost
Redni broj	38
Atomska masa	87,62
Boja	srebrnobela
Agregatno stanje	čvrsto
Tačka topljenja	777 °C
Tačka ključanja	1382 °C
Gustina	2,63 g cm ⁻³
Atomski radijus	219 pm

2.5. Radioizotop ^{90}Sr

Radioaktivni izotop ^{90}Sr je jedan od značajnih radioaktivnih zagađivača životne sredine, koji spada u grupu dugoživećih fisionih produkata, nastalih pri nuklearnoj fisiji ^{235}U , ^{238}U ili ^{239}Pu u nuklearnim reaktorima, pri nuklearnim eksplozijama i upotrebi nuklearnog oružja. Jedan od načina nastajanja, ali sa malim fisionim prinosom je primer

deobe ^{235}U na fragmente manjih atomskih masa, kao što je ^{90}Sr , nuklearnom lančanom reakcijom, iniciranom visoko energetske neutronima od približno 1 MeV. Nastali fragmenti manjih atomskih masa se nazivaju fisioni nus-produkti i ovaj proces se može prikazati sledećom relacijom [34]:



Izotop ^{90}Sr je u životnu sredinu emitovan kao posledica testiranja nuklearnog oružja nakon 1945. godine, posebno u periodu između 1952. i 1981. godine. Tako je do 1980. u životnu sredinu dospelo oko 6×10^{14} Bq ^{90}Sr , dok se pretpostavlja da je nakon akcidenta u Černobilju dospelo oko $8,1 \times 10^{15}$ Bq ^{90}Sr [34,35]. Sadržaj ^{90}Sr u životnoj sredini južne hemisfere je, zbog manjeg broja izvedenih nuklearnih testova i odsustva reprocesiranja isluženog nuklearnog goriva u nuklearnim elektranama, niži nego u severnoj hemisferi [36].

Globalna distribucija i depozicija fisionih produkata nakon nuklearnih eksplozija u vazduhu vrši se preko radioaktivnih padavina, koje se po svom poreklu dele u tri grupe, zavisno od jačine i mesta eksplozije [37]:

1) *lokalne* - nalaze se u neposrednoj blizini epicentra eksplozije, uglavnom u granicama do 100 km;

2) *troposferske* - prenošenje fisionih produkata se vrši cirkulacijom vazduha u pravcu zapad-istok na geografskoj širini eksplozije i u potpunosti zavisi od meteoroloških uslova: pravca i brzine vazдушnih strujanja i kišnosti.

3) *stratosferske* ili *globalni* (eng. *world wide*) *fallout* - koji predstavlja fino dispergovane fisione produkte, izbačene iznad tropopauze u stratosferu u kojoj mogu da se zadrže i do nekoliko godina. Obzirom da tropopauza predstavlja prirodnu barijeru prelaska vazдушnih masa iz stratosfere u troposferu, zavisno od načina ubacivanja u troposferu, fisioni produkti se tokom vremena sporo i neujednačeno raspoređuju iznad zemljine površine.

2.5.1. Karakteristike ^{90}Sr

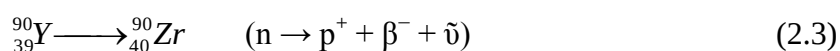
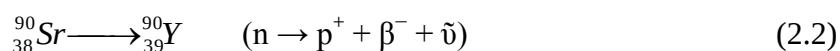
Sa ekološkog stanovišta, značajna su dva radioizotopa stroncijuma, ^{89}Sr i ^{90}Sr , oba fisioni produkti i beta emiteri (tabela 2.1), koji se razlikuju po vremenu poluraspada, koje iznosi 50,5 dana za ^{89}Sr i 28,8 godina za ^{90}Sr , kao i energiji

emitovanih beta čestica, koja iznosi 1,488 MeV za ^{89}Sr i 0,546 MeV za ^{90}Sr . Radioizotop ^{89}Sr je kratkoživeći i zbog toga ga danas gotovo i nema, osim malih količina koje nastaju tečnim ispuštanjem iz nuklearnih postrojenja. Neke od važnih karakteristika izotopa ^{90}Sr su prikazane u tabeli 2.4 [31].

Tabela 2.4. Karakteristike ^{90}Sr

Osobina	Vrednost
Atomski broj	38
Atomska masa	89,81
Tip raspada	β^- (100 %)
Vreme poluraspada	28,8 g
Biološko vreme poluživota	49,3 g
Konstanta raspada	$0,024 \text{ g}^{-1}$
Volatilnost	srednja
Karakteristike beta čestice	
Prosečna energija	200 keV
Maksimalna energija	546 keV
Prosečni domet (voda)	0,2 cm
Specifična aktivnost	$52,9 \times 10^{11} \text{ Bq g}^{-1}$

Radionuklid ^{90}Sr je čist beta emiter čijim raspadom nastaje radionuklid ^{90}Y , takođe čist beta emiter, sa vremenom poluraspada 64,1 h i energijom emitovane beta čestice 2,283 MeV. Između ova dva radionuklida se može uspostaviti stabilna radioaktivna ravnoteža. Emisijom beta čestice, ^{90}Y prelazi u stabilan izotop cirkonijuma, ^{90}Zr . Radioaktivni raspad jezgra ^{90}Sr , odvija se prema relacijama [38-40]:



Zbog svojih karakteristika: dugog vremena poluraspada i biološkog vremena poluživota, fizičko-hemijske i metaboličke sličnosti sa kalcijumom, visokog stepena apsorpcije iz gastrointestinalnog trakta, kao i spore eliminacije iz koštanog tkiva, ^{90}Sr pripada grupi ekstremno toksičnih radionuklida [38,41,42].

2.5.2. Metabolizam ^{90}Sr i njegova distribucija u biološkim sistemima

Posrednici u unošenju internih izvora zračenja su uglavnom hrana biljnog i životinjskog porekla [25]. Radionuklid ^{90}Sr je veoma opasan sa ekološke tačke gledišta,

jer se lako prenosi kroz životnu sredinu formirajući različita jedinjenja, npr. halogenide, okside i sulfide [43]. Čovek se može kontaminirati ovim radionuklidom putem inhalacije (prašine), ingestije (ishranom, uglavnom putem mleka i mlečnih proizvoda) ili direktnim kontaktom (transkutanom resorpcijom) [44].

Izotopi stroncijuma su homogeno distribuirani u organizmima biljaka, životinja i ljudi i jednom kada dospeju u njih slede metabolički put kalcijuma. Resorpcija ^{90}Sr prati resorpciju kalcijuma, tako da je povećanje njegove koncentracije indikator smanjenja koncentracije i usvajanja kalcijuma u organizmu. Resorpcija ^{90}Sr u organizmu čoveka i životinja zavisi od niza faktora, od kojih je posebno značajan tip biljne hrane koja se koristi u ishrani. Pšenica, pirinač i neke leguminoze u toku cvetanja usvajaju znatne količine ^{90}Sr , dok zrna kukuruza i graška koja su u toku germinacije zaštićena, skoro i da ne sadrže ^{90}Sr [33].

Radionuklid ^{90}Sr se najviše inkorporira u koštanom tkivu u obliku hidroksiapatita, te pripada grupi osteotropnih radionuklida [45]. Nakon kontaminacije 70 - 80 % ^{90}Sr se izluči iz organizma, dok se preostalih 20 - 29 % deponuje u kostima; ostatak od oko 1 % se može naći u mekim tkivima. Kada dospe u kosti, ^{90}Sr ostaje u njima duži niz godina izlažući zračenju ne samo koštanu masu, već i ćelije koje učestvuju u eritropoezi i osteoblaste [25]. Biološka eliminacija ^{90}Sr iz organizma ima tri faze: 1) izlučivanje iz krvi i mekih tkiva, 2) izlučivanje iz organa (gde je čvršće vezan) i 3) izlučivanje iz kostiju, što je najsporija faza. Efektivno „vreme poluiščezavanja” ^{90}Sr za kritični organ - kosti, iznosi oko 17 godina. Biološko vreme polужivota ^{90}Sr zavisi od niza faktora, kao što su vrsta organizma, starost i dr. i kreće se u dosta širokom opsegu [33,45-47].

Izotop ^{90}Sr koji se ugradi u kosti može potencijalno uzrokovati karcinom kostiju (osteosarkom), leukemiju, karcinom pluća ili kože, pa se naziva i „ljudskim karcinogenom” [43,46,48]. Rizik razvoja karcinoma zavisi od koncentracije ^{90}Sr u životnoj sredini i od uslova izloženosti. Mlade jedinice su osetljivije na štetno dejstvo ovog radionuklida od odraslih [34,49]. Kostii mladih organizama vezuju 5 - 10 puta veću količinu stroncijuma nego kod starijih organizama, što je posledica velike potrebe za kalcijumom u vreme rasta kostiju.

2.6. Migracija ^{90}Sr u ekosistemu zemljište - biljka

Glavni mehanizmi deponovanja ^{90}Sr iz atmosfere na površinu Zemlje su padavine, odnosno suva i vlažna depozicija („fallout“). Na taj način ovaj radioizotop ulazi u „trofični lanac“ životne sredine, pri čemu prati biološki transfer kalcijuma. Meridionalna depozicija ^{90}Sr na zemljinoj površini nije uniformna. Povezana je sa trendom strujanja vazdušnih masa nakon atmosferske kontaminacije ovim izotopom, a ujedno i količinom padavina na određenoj teritoriji. Tako se maksimalne količine ^{90}Sr u tlu, nalaze između 20° i 60° severne geografske širine. Na neravnomernu distribuciju ovog radioizotopa mogu uticati i geohemijski faktori zemljišta, kao i klimatske pojave, tako da se u istom intervalu geografske širine kumulativni sadržaj ^{90}Sr može razlikovati i za faktor 10 [37].

Radionuklidi koji se na površinu Zemlje deponuju u vidu čvrstih čestica, mehanički se zadržavaju na njenoj površini. Oni koji su rastvoreni u padavinama, procesom filtracije ulaze u zemljište i najvećim delom se vežu u površinskom sloju. Radionuklid ^{90}Sr dospeva na Zemlju u obliku rastvorljivom u vodi i u zemljištu se vezuje za čestice zemljišta ili u obliku zemljišnih rastvora. Nakon kontaminacije zemljine površine, utvrđeno je da se od ukupne količine ^{90}Sr , u sloju zemljišta 0 - 5 cm veže od 60 - 90 % (u proseku oko 85 %), od 5 - 10 cm 12 %, a od 10 - 25 cm oko 3 %. Studije su pokazale da se ^{90}Sr ne ispira lako iz zemljišta, čak ni pri obilnim padavinama [45].

Distribucija veštačkih radionuklida u zemljištu se karakteriše izraženom neravnomernošću po dubini profila [50,51]. Duž neobrađivih i obrađivih profila zemljišta, ovi radionuklidi su neravnomerno raspoređeni. U slučaju kultivisanog zemljišta, u procesu obrade dolazi do mešanja (rotiranja) slojeva zemljišta, tako da prvobitna zemljišna struktura biva poremećena i ^{90}Sr se mehanički preraspodeljuje. Dubina zemljišta do koje će biti distribuiran zavisi od stepena obrade zemljišta, pri čemu se njegova raspodela sa dubinom može izraziti kao funkcija eksponencijalnog karaktera [37]. Obrada zemljišta koja se u kontinuitetu nastavlja tokom dužeg vremenskog perioda, trebala bi da dovede do uniformne distribucije ^{90}Sr duž dubine oranja [50]. U regionima sa umerenom količinom atmosferskih taloga i u zemljištima težeg mehaničkog sastava, najveći deo antropogenih radionuklida se tokom dužeg

perioda zadržava u površinskom sloju (0 - 10 cm) zemljišta, a u oranicama - u oraničnom horizontu (20 - 25 cm, maksimalno 30 cm). U lakšim, peskovitim zemljištima, naročito onim sa procednim tipom vodnog režima, znatan deo radioaktivnih materija, za 10 - 15 godina ispere se na dubinu 40 - 50 cm, ali mogu dospeti i do podzemnih voda i dalje sa njima do reka i mora [51].

Migracija radionuklida ima horizontalnu i vertikalnu komponentu, mada ukoliko su u pitanju ravni tereni, vertikalna komponenta je dominantnija [52]. Za migraciju radionuklida ^{90}Sr u zemljištu, do dubine od jednog metra potrebno je 40 - 200 godina, dok je, na primer za ^{137}Cs potrebno 150 - 4500 godina [53]. Prema stepenu pokretljivosti u zemljištu, antropogeni radionuklidi dugog vremena poluraspada mogu se svrstati u sledeći niz: $^{90}\text{Sr} > ^{106}\text{Ru} > ^{137}\text{Cs} > ^{144}\text{Ce} > ^{129}\text{I} > ^{239}\text{Pu}$ [51]. Relativni stepen vezivanja i zadržavanja ^{90}Sr , kao i ostalih antropogenih radionuklida u zemljištu, u velikoj meri zavisi od jedinjenja u kome se nalaze (vodorastvorljivi, jonoizmenjivi, teško rastvorni), kao i od osobina zemljišta, koje predstavlja dinamičan makrosistem pogodan za jonsku izmenu elemenata. Znatan deo ovih radionuklida se nalazi u adsorbovanom (izmenjivom) stanju na kompleksima oksid/hidroksid, mineralima gline ili kompleksirajućim organskim kiselinama, kao što su humične i fulvične kiseline. Fizičko-hemijski procesi, odnosno interakcije sa matriksom zemljišta, koji utiču na migraciju radionuklida u zemljištu, kontrolisani su pretežno glinastom frakcijom zemljišta. Bitna karakteristika pločastih čestica sekundarnih aluminijum-silikata, koji sačinjavaju glinu, je negativno površinsko naelektrisanje. Sposobnost čestica gline da privlači jone (naročito katjone) ka svojoj površini, predstavlja jednu od najvažnijih osobina zemljišta. Pošto je procenjeno da ukupna površina od oko 30 cm² ilovače ima slobodnu površinu od oko 15,5 m², to su mogućnosti za razmenu jona velike [51]. Katjon stroncijuma stupa u intenzivnu jonsku izmenu sa kalcijumom, pri čemu se uspostavlja dinamička ravnoteža između čvrste i tečne faze u zemljištu.

Rezultati istraživanja su pokazali da migracija radionuklida u zemljištu zavisi od brojnih ekoloških činilaca: intenziteta njihove depozicije iz atmosfere (brzina dospevanja i količina kiše), kao i sinergijskih uticaja prirodnih uslova (vegetacija, klima, reljef tj. lokalna konfiguracija terena). Naročito zavisi od osobina zemljišta, kao što su: fizičko-hemijska svojstva (sadržaj organske materije, osobine adsorptivnog kompleksa, pH vrednost, minerološki sastav), struktura (mehanički sastav, poroznost),

stepen vlažnosti (sadržaj vode, nivo podzemne vode), agrotehničke mere (odvodnjavanje i stepen obrade, đubrenje) [50,54].

Sa tačke gledišta kontaminacije hrane radioizotopom ^{90}Sr , važno je znati puteve translokacije u prirodnim uslovima i u kom stepenu se biljke mogu kontaminirati ovim fisionim produktom. Postoje dva mehanizma koja omogućavaju usvajanje ^{90}Sr od strane biljnih kultura: direktna apsorpcija preko nadzemnog dela biljke iz vazduha i padavina i indirektna apsorpcija iz zemljišta putem korenovog sistema biljke. Kontaminacija ljudske i stočne hrane, prvim načinom je dominantna u trenutku i neposredno nakon nuklearnih i drugih akcidenata koji dovode do porasta koncentracije antropogenih radionuklida u atmosferi; posle izvesnog vremena, kada koncentracija radionuklida opadne, dominira drugi mehanizam [37]. Radioaktivni izotopi prisutni u zemljištu, prelaze u koren biljke na isti način kao i neaktivni izotopi istih katjona. Od ukupne količine zastupljenih radionuklida u zemljištu, biljke najviše resorbuju ^{90}Sr (5 - 10 %), zatim i ostale radionuklide u sledećim procentualnim iznosima: 0,1 - 0,5 % ^{137}Cs , 0,01 - 0,05 % ^{144}Ce , 0,01 - 0,03 % ^{90}Y i 0,05 - 0,13 % ^{106}Ru . Radionuklid ^{90}Sr vezuje se za zemljište mnogo manje nego neki drugi radionuklidi, te zbog toga prelazi iz zemljišta u poljoprivredne kulture mnogo više od ostalih [51].

Resorpcija nekog dugoživećeg radionuklida od strane biljke zavisi u velikom stepenu od toga da li radionuklid ostaje na dohvat korenovog sistema biljke, u kom obimu je hemijski raspoloživ, od metaboličkih zahteva biljke, kao i od fizičko-hemijskih karakteristika zemljišta. Naročito hemijski sastav zemljišta ima uticaja na resorpciju radionuklida iz tla, pošto u njegovom vezivanju za komponente zemljišta konkurišu drugi joni stabilnih elemenata. Način na koji se neki radionuklid raspoređuje na različite frakcije biljne kulture, određuje koliko dugo on može ostati na mestu depozicije i obim do kog će biti na raspolaganju biljkama. Obim prodiranja nekog jona zavisi, pre svega, od njegove valentnosti: dvovalentni katjon je čvršće vezan od strane zemljišta nego jednovalentni. Radioizotop ^{90}Sr koji je u jonskom obliku dvovalentan, brže će prodirati nego jednovalentni ^{137}Cs , zato što su stroncijumovi joni prisutni u zemljištu u znatno većoj količini nego joni cezijuma [51].

Migracija ^{90}Sr u ekosistemu zemljište-biljka u velikoj meri zavisi od količine slobodnog, odnosno za biljku raspoloživog ^{90}Sr na koju utiče više faktora. Pri nižim pH zemljišta, biljke resorbuju oko 10 puta više ^{90}Sr nego one koje rastu na krečnjačkom

zemljištu. Specijacija stroncijuma u zemljištu (oblika Sr u kome se nalazi pri različitim vrednostima pH zemljišta), količina izmenjivih katjona (veća količina slobodnog resorptivnog Ca uslovljava smanjenje količine za biljku raspoloživog ^{90}Sr), kao i mineraloški i mehanički sastav zemljišta takođe značajno utiču na usvajanje ovog radionuklida [37].

Morfološko-fiziološke karakteristike biljnih kultura (vrsta, građa, rast, dužina vegetacionog perioda) su veoma značajni faktori od kojih zavisi stepen resorpcije radionuklida. Resorpcija ^{90}Sr iz zemljišta nije podjednaka kod svih vrsta biljaka; tako, na primer, leguminoze u poređenju sa travama resorbuju znatno više ^{90}Sr iz zemljišta. Zbog toga je interna kontaminacija ovim radionuklidom, znatno veća kod životinja koje se hrane leguminozama nego kod čistih travojeda [33]. Takođe, biljke na početku vegetacionog perioda (mlade biljke) resorbuju iz zemljišta 2 - 3 puta više ^{90}Sr , nego na kraju vegetacionog perioda, u fazi pune zrelosti. Mineralni metabolizam biljaka utiče na neravnomernu raspodelu radionuklida u pojedinim delovima biljaka. Unutrašnja raspodela radionuklida zavisi od puteva unošenja i stepena mobilnosti pojedinih radionuklida. Ako se po mobilnosti u biljkama uporede dva najznačajnija antropogena radionuklida ^{90}Sr i ^{137}Cs , dominira drugi. Radioaktivne aerosoli resorbovane preko nadzemnih delova biljke zadržavaju se više u lišću nego u zrnavlju. Tako na primer, u zrnu žitarica koncentracija ^{90}Sr iznosi samo 20 % od količine ovog radionuklida u lišću, što se tumači mehanizmom zaštite reproduktivnih organa biljke. Takođe, distribucija radionuklida nije podjednaka ni u svim delovima generativnih organa biljke (plod). Koncentracija ^{90}Sr je uvek veća u omotaču zrna nego u jedru, što ukazuje na njegovu relativno malu prodornost u unutrašnjost zrna. Kao posledica toga zrnavlje i proizvodi od njega pokazuju razlike u koncentraciji ^{90}Sr [37].

2.7. Odnos $^{90}\text{Sr}/\text{Ca}$ u ekosistemu zemljište - biljka

Prelaz ^{90}Sr iz jedne u drugu kariku ekosistema je uslovljen sadržajem Ca u posmatranom ekološkom ciklusu. Procesi izmene ^{90}Sr i Ca su slični, tako da apsorpcija ^{90}Sr iz zemljišta u biljku zavisi od ukupne koncentracije oba elementa, ali i od relativnog sadržaja svakog od njih u ukupnoj koncentraciji u zemljištu. U biljci se deponuju u istim tkivima i organima i između njih se uspostavlja određeni odnos, koji

zavisi i od njihovog sadržaja u spoljašnjoj sredini [37]. Apsorpcija i kruženje ^{90}Sr u biosistemima predstavljaju dosta složen proces, jer živa materija vrši diskriminaciju stroncijuma i kalcijuma u korist drugog. Stoga svaki deo ekološkog sistema ima karakterističan odnos $^{90}\text{Sr}/\text{Ca}$. U ekosistemu zemljište-biljka, ovaj odnos je inverzno proporcionalan količini slobodnog Ca u zemljištu. Faktori diskriminacije $^{90}\text{Sr}/\text{Ca}$ za pojedine karike ekosistema iznose: biljka/zemljište 0,7 - 1,3; biljke/životinje 0,25 i biljke/mleko (ili meso) 0,25 [33].

2.8. Značaj praćenja aktivnosti ^{90}Sr u uzorcima iz životne sredine

Da bi se sagledala radioekološka situacija u životnoj sredini, a samim tim i u lancu ishrane, neophodno je poznavanje izvora kontaminacije radioaktivnim supstancijama i njihove zastupljenosti u ekosistemu. Radijaciona kontrola karika ekološkog lanca ima za cilj prevenciju zagađenja bioloških zajednica radionuklidima, kako u somatskom, tako i u genetskom smislu. Na osnovu određivanja različitih parametara translokacije ^{90}Sr , može se doneti zaključak o odnosu efekata koristi i rizika, koji su sa druge strane uslovljeni karakteristikama koje utiču na mehanizme i brzinu ugrađivanja radionuklida u biološke sisteme.

Na osnovu izloženih literaturnih podataka, može se zaključiti da je ^{90}Sr zbog svoje radiotoksičnosti zaista biološki opasan radioizotop. Međutim, interesantna je činjenica da koncentracija ^{90}Sr u skeletu ne zavisi od vrste kostiju ili njihovog eventualnog oboljenja, kao ni od starosti organizma (osim kod vrlo mladih organizama). Nasuprot tome, ona je u velikoj meri zavisna od njegove koncentracije u zemljištu, odnosno od količine koja se u organizam unosi hranom. Redovnim unošenjem malih količina stroncijuma hranom, stvara se ravnoteža između stroncijuma u hrani i skeletu. Stoga je veoma bitno pratiti sadržaj i distribuciju ^{90}Sr , naročito u obradivom zemljištu i usevima. Posmatrano sa radijaciono-higijenskog stanovišta, zemljište koje je kontaminirano ovim radionuklidom, ima važnu ulogu u kontaminaciji ciklusa biljne i stočne proizvodnje, odnosno prehrambenom ciklusu. Stoga je radioizotop ^{90}Sr jedan od glavnih predmeta monitoringa životne sredine i radioekoloških istraživanja i njegovo određivanje u uzorcima iz životne sredine je od velikog interesa, kako zbog biološkog kruženja, tako i zbog potencijalnog ekološkog rizika [34,55-57].

Uzimajući u obzir da je značajni deo Republike Srbije pod oranicama, kao i da nema dokumentovanih podataka o detaljnijim istraživanjima i merenjima aktivnosti ovog radionuklida u agroekosistemu našeg područja, istraživanje obuhvaćeno ovom doktorskom disertacijom je od izuzetne važnosti. Ono je sprovedeno u cilju utvrđivanja prostorne raspodele i vertikalne distribucije ^{90}Sr , u okviru tehnologije obrade i gajenja na oglednim poljima sa različitim tipom zemljišta. Rezultati proistekli iz ove studije su od značaja za zaštitu životne sredine ispitivanih područja i ovakvi podaci mogu biti referentni u slučaju pojave budućih antropogenih aktivnosti, koje mogu uzrokovati dodatnu kontaminaciju zemljišta, a samim tim i gajenih useva.

2.9. Literaturni pregled metoda za određivanje aktivnosti ^{90}Sr

Proučavanje metoda za određivanje ^{90}Sr ima za cilj da se ustanovi mogućnost praktične primene pojedinih metoda za rutinsku kontrolu aktivnosti ovog radioizotopa u uzorcima iz biosfere (voda, zemljište, biljne kulture i drugi). Pošto se radi o čistom beta emiteru koji se ne može određivati direktno, metodologija kvantifikacije ^{90}Sr je dosta složena i pre detekcije zahteva njegovo izdvajanje od makrokoličina ostalih ometajućih elemenata, pre svega kalcijuma i eventualno prisutnog barijuma. U literaturi su opisane različite metode za određivanje aktivnosti ^{90}Sr u uzorcima iz životne sredine. U preglednom radu Vajde i Kima [58], prikazane su različite analitičko-hemijske tehnike za izdvajanje ^{90}Sr , uključujući selektivno taloženje, tečno-tečnu ekstrakciju i jonsku izmenu/jonsku hromatografiju.

U širokoj upotrebi su klasične radiohemijske metode analize aktivnosti ^{90}Sr , koje u cilju izolacije stroncijuma, uključuju brojna taloženja i filtracije. Jedna od njih se zasniva na taloženju stroncijum nitrata upotrebom 100 % azotne kiseline i razdvajanju ^{90}Sr od potomka ^{90}Y [30,59]. Druga pak, aktivnost ovog nuklida određuje preko radioaktivnog potomka ^{90}Y , taloženjem pomoću oksalne kiseline u prisustvu aluminijuma kao nosača [33,37,60] ili, alternativno, oksalatnom taloženju zemnoalkalnih metala i izdvajanju i merenju ^{90}Y bez prethodne separacije [61]. Veliki broj metoda, kao što su višestepena ekstrakciona metoda određivanja ^{90}Sr pomoću rastvarača tri-butil fosfata (TBP) [33,62] i tečno-tečna ekstrakcija [63-68], zasnovan je na različitoj rastvorljivosti soli zemnoalkalnih metala u neorganskim i organskim

rastvaračima. Za separaciju zemnoalkalnih metala, razrađene su i različite hromatografske jonoizmenjivačke metode sa smolama (uglavnom Dowex i Amberlite) [42,69-72], pri čemu se joni kalcijuma, stroncijuma i barijuma prvo adsorbuju kao katjoni, a zatim eluiraju citratnim ili sa EDTA (etilen-diamin-tetrasirćetna kiselina) medijumom [73].

U zavisnosti od toga koja je analitičko-hemijska metoda primenjena za određivanje aktivnosti ^{90}Sr , za detekciju se može koristiti gasni proporcionalni brojač ili tečni scintilacioni brojač (LSC, od eng. *Liquid Scintillation Counter*), koji se može kombinovati sa Čerenkovljevim brojačem.

U ovoj disertaciji je primenjena radiohemijska analitička metoda za određivanje aktivnosti ^{90}Sr u uzorcima zemljišta i biljnih kultura, koja je zasnovana na taloženju zemnoalkalnih metala pomoću oksalata i izdvajanju ^{90}Y na $\text{Al}(\text{OH})_3$ kao nosaču [60].

2.10. Modelovanje predviđanja radioekoloških procesa

Za prikazivanje i predviđanje radijacione situacije, odnosno za prikazivanje radioekoloških procesa u biosferi, kao i niza vrlo složenih radiobioloških procesa u živim organizmima, koriste se određeni matematički izrazi koji se nazivaju *modeli predviđanja* (*predikcioni modeli*). Za izučavanje ovih procesa od odlučujućeg značaja je distribucija aktivnosti u funkciji vremena, pri čemu se mora obuhvatiti i niz drugih procesa, kao što su unošenje, transport i raspodela određene aktivnosti u funkciji vremena. Izbor matematičkog modela ne zavisi samo od vrste radionuklida, već i od načina i brzine izlučivanja radionuklida iz date sredine [74].

Modeli predviđanja radioekološkog uticaja na životnu sredinu su osnovni alat za upotrebu u redovnoj kontroli regulacije rutinskih ispuštanja radionuklida u životnu sredinu, ali i u planiranju mera koje treba preduzeti u slučaju akcidenta i proceni zdravstvenih, ekonomskih i socijalnih uticaja. Oni se takođe koriste za predviđanje uticaja budućih akcidenata, na primer u slučaju emisije iz podzemnih skladišta radioaktivnog otpada. Važno je proveriti pouzdanost takvih predviđanja u poređenju sa izmerenim vrednostima u životnoj sredini ili u poređenju sa predviđanjima drugih modela [74].

Za matematičko prikazivanje i prognozu određenih procesa u biosferi, koristi se nekoliko tipova matematičkih modela predviđanja. U širokoj upotrebi su: jednokomponentni model (JK-M), dvokomponentni model bez povratne sprege (DK-M) ili sa povratnom spregom, kao i model paralelno vezanih sistema. Globalni prikaz ovih modela je sledeći:

Jednokomponentni model (JK-M)

$$A_{in}(t) \rightarrow A(t) \rightarrow A_{iz}(t) \quad (2.4)$$

Dvokomponentni model (DK-M) bez povratne sprege

$$A_{in}(t) \rightarrow A_1(t) \xrightarrow{A_{y,1 \rightarrow 2}} A_2(t) \xrightarrow{A_{y,2 \rightarrow j}} \quad (2.5)$$

Dvokomponentni model sa povratnom spregom

$$A_{in}(t) \rightarrow A_1(t) \xrightarrow{A_{y,1 \rightarrow 2}} \leftarrow \xleftarrow{A_{y,2 \rightarrow 1}} A_2(t) \quad (2.6)$$

Model paralelno vezanih sistema

$$A_{in}(t) \rightarrow A_1(t); A_2(t); A_j(t) \rightarrow A_{iz}(t) \quad (2.7)$$

gde je $A_{in}(t)$ - unošenje aktivnosti u neki sistem u funkciji vremena, $A_{iz}(t)$ - eliminacija aktivnosti iz sistema u funkciji vremena, A_j - posmatrani sistem i A_1, A_2 - delovi posmatranog sistema (na primer, organi u organizmu).

Prvi korak modelovanja prostiranja radionuklida u životnoj sredini je definisanje cilja modelovanja, dakle, formulacija problema i prikupljanje podataka. Drugi korak je formiranje blok-dijagrama sistema, u okviru kojeg se pojedinačni elementi sistema mogu izdeliti na jednostavnije elemente. Zavisne promenljive u modelima su odgovarajuće aktivnosti radionuklida, koje se raspoređuju ravnomerno po svim delovima sistema. Pojedini delovi mogu biti isključeni iz modela, ukoliko se smatra da nisu značajni za konkretan rezultat modelovanja [2].

Matematičko modelovanje predviđanja radioekoloških procesa se zasniva na izvesnim pretpostavkama i u suštini predstavlja aproksimaciju realnosti. Neodređenosti u predviđanju najčešće nastaju zbog izostavljanja važnog dela sistema ili pojednostavljenja modela radi lakšeg numeričkog rešavanja problema, koje je moguće usled poznavanja ekološkog ponašanja pojedinih radionuklida u različitim segmentima životne sredine. Prema tome, ne mogu se opisati tačno sve komponente i procesi koji se odvijaju u biosferi. Rezultati predviđanja se mogu poboljšati ukoliko se koriste

parametri radioekoloških modela, koji su određeni na lokacijama za koje se i primenjuju, na primer, koeficijenti transfera radionuklida u lancu ishrane [75].

Kada je reč o strukturi procene, brojni modeli su usvojili pristup po „nivoima”, koji se primenjuje za potrebe regulatornog odlučivanja. Niži nivoi su obično veoma konzervativni i zahtevaju minimalan unos podataka, dok su viši nivoi realniji i zahtevaju detaljniju procenu. Svrha nižih nivoa je da se brzo odbace situacije u kojima ne postoji rizik od uticaja sa visokim stepenom poverenja. Procena može da se fokusira na one situacije koje zahtevaju detaljnu procenu iz određenih razloga [74].

3. MATERIJAL I METODE

3.1. Lokaliteti uzorkovanja

Za istraživanje su izabrana dva lokaliteta oglednih polja na teritoriji Republike Srbije: „Radmilovac” - ogledno školsko dobro Poljoprivrednog fakulteta Univerziteta u Beogradu i „Rimski Šančevi” - ogledno polje Instituta za ratarstvo i povrtarstvo iz Novog Sada.

Područje ispitivanja „Radmilovac” pripada teritoriji Beograda (slika 3.1). Beograd odlikuje umereno kontinentalna klima sa prosečnom godišnjom temperaturom 12,3 °C, količinom padavina oko 680 mm i pojavom jugoistočnog vetra-košave.

Područje ispitivanja „Rimski Šančevi” pripada teritoriji Novog Sada (slika 3.2). Klima na ovom području ispitivanja prelazi iz umereno kontinentalne u kontinentalnu, sa prosečnom godišnjom temperaturom oko 11 °C i količinom padavina oko 600 mm; tokom jeseni i zime povremeno duva hladan vetar košava.

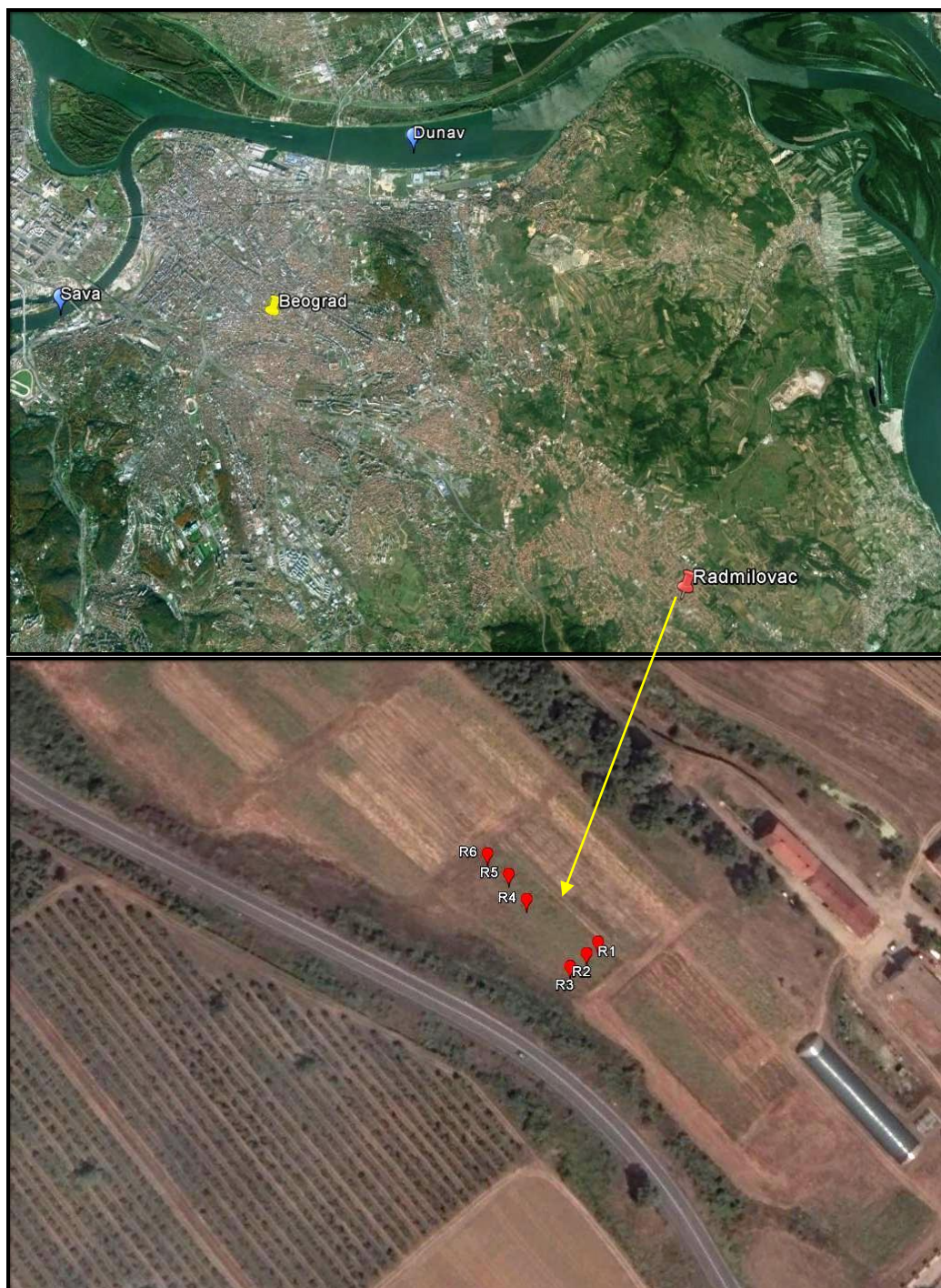
Opis parcela sa GPS (eng. *Global Positioning System*) koordinatama (*N* - sever od eng. North i *E* - istok od eng. East) pojedinačnih mesta uzorkovanja, prikazan je u tabelama 3.1 i 3.2. Parcele oglednog školskog dobra „Radmilovac” na kojima je izvršeno uzorkovanje, obeležene sa R1 - R6 na mapi (slika 3.1), nalaze se na nadmorskoj visini od 143 m i predstavljaju deo četvoropoljnog plodoređa. Ogledne parcele oglednog polja „Rimski Šančevi” (slika 3.2), obeležene sa NS1 - NS9, nalaze se na 90 m nadmorske visine, dok se parcela obeležena sa NS10, nalazi na 84 m nadmorske visine. Ispitivani sistemi ratarenja predstavljaju različite plodoređne rotacije i monokulture.

Tabela 3.1. Opis oglednih parcela oglednog školskog dobra „Radmilovac”

Koncept poljoprivrede	Oznaka lokacije	Tretman	GPS koordinate
<i>Organska</i>	R1	Mikrobiološko đubrivo	N: 44° 45' 17,9" E: 20° 34' 48,5"
	R2	Organsko đubrivo	N: 44° 45' 17,7" E: 20° 34' 48,1"
	R3	Kontrolna varijanta	N: 44° 45' 18,0" E: 20° 34' 47,7"
<i>Održiva</i>	R4	120 kg N ha ⁻¹	N: 44° 45' 18,3" E: 20° 34' 47,5"
	R5	60 kg N ha ⁻¹	N: 44° 45' 18,4" E: 20° 34' 47,4"
	R6	Kontrolna varijanta	N: 44° 45' 18,5" E: 20° 34' 47,4"
Kontrolni uzorak neobrađivog zemljišta			N: 44° 45' 25,6" E: 20° 34' 45,3"

Tabela 3.2. Opis oglednih parcela oglednog polja „Rimski Šančevi”

Oznaka lokacije	Sistem gajenja	GPS koordinate
NS1	Monokultura pšenice	N: 45° 19' 27,3" E: 19° 50' 48,9"
NS2	Monokultura kukuruza	N: 45° 19' 28,0" E: 19° 50' 48,0"
NS3	Monokultura soje	N: 45° 19' 20,8" E: 19° 50' 46,0"
NS4	Dvogodišnja rotacija useva bez đubrenja	N: 45° 19' 29,5" E: 19° 50' 49,8"
NS5	Dvogodišnja rotacija useva sa đubrenjem	N: 45° 19' 25,1" E: 19° 50' 47,7"
NS6	Trogodišnja rotacija useva bez đubrenja	N: 45° 19' 28,5" E: 19° 50' 51,6"
NS7	Trogodišnja rotacija useva sa đubrenjem 1	N: 45° 19' 24,4" E: 19° 50' 47,6"
NS8	Trogodišnja rotacija useva sa đubrenjem 2	N: 45° 19' 18,2" E: 19° 50' 44,8"
NS9	Dvanaestopoljna rotacija useva sa đubrenjem	N: 45° 19' 26,8" E: 19° 50' 47,0"
NS10	Trogodišnja rotacija useva sa đubrenjem 3	N: 45° 19' 41,6" E: 19° 49' 57,2"
Kontrolni uzorak neobrađivog zemljišta		N: 45° 19' 19,9" E: 19° 49' 46,9"



Slika 3.1. Mapa oglednog polja „Radmilovac” u Beogradu



Slika 3.2. Mapa oglednog polja „Rimski Šančevi” u Novom Sadu

3.2. Agrotehničke mere

U ovom poglavlju će biti opisane agrotehničke mere, koje predstavljaju primenu savremenih naučnih dostignuća iz oblasti hemije, biologije i mehanizacije na obradivo zemljište, sa ciljem da se poveća plodnost zemljišta, a samim tim i prinos. Među najvažnije agrotehničke mere, svakako spadaju plodored i smena useva, kao i mere agrotehničke melioracije.

3.2.1. Tehnologija gajenja useva na oglednom polju „Radmilovac”

Organska poljoprivreda (eng. *organic farming*) je sistem poljoprivrede koji se bazira na visokom poštovanju ekoloških principa i životne sredine. Ekološki balansirana poljoprivreda se bazira na očuvanju prirodnih karakteristika zemljišta i maksimalnoj biološkoj aktivnosti [76]. Pored toga, to je zakonski regulisana proizvodnja koja uključuje kontrolu i sertifikaciju proizvodnje i proizvoda. Održiva poljoprivreda (eng. *sustainable agriculture*), čiji naziv potiče od latinske reči *sustinere* (*sus* - ispod i *tenere* - držati) označava održanje ili očuvanje tokom dužeg vremenskog perioda. Sistem održive poljoprivrede je noviji sistem poljoprivredne proizvodnje, uveden zbog očuvanja životne sredine kroz favorizovanje alternativnih sistema zemljoradnje (združeni i pokrovni usevi) i očuvanja biodiverziteta [77].

U okviru održivih i organskih sistema zemljoradnje, plodored (prostorna i vremenska smena useva) zauzima centralno mesto kao agrotehnička, organizaciona i fitosanitarna mera [78]. U okviru plodorednih polja na Radmilovcu koja su osnovana 1992. godine i traju do danas, gaje se najvažniji ratarski usevi u sistemu dvopoljnog, tropoljnog, četvoropoljnog i šestopoljnog plodoreda. Kako bi se pokazale prednosti ispitivanih plodoreda u pogledu količine i kvaliteta prinosa isti usevi se gaje u monokulturi, koja predstavlja kontrolnu varijantu. Sistem smene useva u plodoredima je kompleksan sistem sa širokim efektima na zemljište i useve. Tip zemljišta na kome se izvode eksperimenti je izluženi černozem.

Tehnologija gajenja useva u organskoj proizvodnji mora odgovarati svim zakonskim standardima, koji su propisani Zakonom o organskoj poljoprivredi [79]. To podrazumeva modifikaciju agrotehničkih mera u skladu sa klimatskim i zemljišnim

karakteristikama. Modifikacija podrazumeva redukovanu obradu zemljišta, pretežno konzervacijskog karaktera, zatim ozbiljan pristup sistemu đubrenja i održavanja zemljišne plodnosti, kao i integralni pristup u zaštiti useva od korova, bolesti i štetočina. Obzirom da je zabranjena upotreba agrohemijskih sredstava, većinu problema (korovi, bolesti i štetočine) potrebno je rešavati preventivnim merama, posebno plodoređom. Đubrenje u organskoj poljoprivredi se vrši radi održavanja i poboljšanja plodnosti zemljišta, pri čemu je dozvoljena upotreba samo đubriva organskog porekla i prirodnih mineralnih đubriva.

U okviru sistema organske poljoprivrede, prva varijanta je podrazumevala folijarnu primenu tečnog mikrobiološkog đubriva, u proleće u vreme intenzivnog rasta useva (tretman R1). Primenjen je preparat pod trgovačkim nazivom „Slavol” (Agrounik, Šimanovci). Ovaj preparat predstavlja prirodno mikrobiološko đubrivo koje sadrži dve grupe bakterija, azotofiksatore i fosfominalizatore, kao i neke biostimulatore rasta biljaka. Suština delovanja ovog preparata se sastoji u tome, da pored snabdevanja biljaka u azotu i fosforu, omogućava i produkciju entomoloških toksina koji štite biljke od insekata. Sve ovo zajedno utiče na ubrzan rast useva na jedan ekološki prihvatljiv način. Druga varijanta je podrazumevala upotrebu prirodnog organskog đubriva, koje se primenjuje u jesen (tretman R2). Primenjeni biohumus je proizveden jedinstvenom biotehnologijom po posebnom postupku, od organskih materija sa farmi svinja i živine koje prerađuju muve po posebnoj tehnologiji. Ovo organsko đubrivo pod trgovačkim nazivom „Biohumus ROYAL ofert” (Altamed, Beograd) primenjuje se neposredno pred osnovnu obradu zemljišta. Karakteriše ga pH vrednost 8 i sadržaj organske materije od 57 %. Da bi se ustanovila prednost primenjenih đubriva koja su dozvoljena u organskim sistemima zemljoradnje, postojala je i kontrolna varijanta, bez đubrenja (tretman R3).

Tehnologija gajenja useva zasnovana na konceptu održive poljoprivrede, podrazumeva promene u tri veoma važne agrotehničke mere: obradi zemljišta, đubrenju i zaštiti useva. Kao polazni osnov u tehnologiji gajenja uzima se obrada zemljišta. U ogled je bio uključen konvencionalni sistem obrade zemljišta, koji podrazumeva oranje u jesen na dubini od 25 - 30 cm i predsetvenu pripremu tanjiračem i drljačem. Pored osnovnog đubrenja u jesen primenom 300 kg ha^{-1} NPK đubriva 15:15:15 (HIP-Azotara, Pančevo), obavljena je dopunska prihrana azotom u proleće. Prihranjivanje je izvedeno u dva nivoa, viši sa 120 kg N ha^{-1} (tretman R4) i racionalni sa 60 kg N ha^{-1} (tretman

R5), a postojala je i kontrolna varijanta bez aplikacije azota (tretman R6). Azotna đubriva koja su korišćena za prihranjivanje su ili KAN sa 25 % N ili urea sa 46 % N (HIP-Azotara, Pančevo).

3.2.2. Tehnologija gajenja useva na oglednom polju „Rimski Šančevi”

Višegodišnji ogled „Plodoredi” je zasnovan 1946. godine i traje sa manjim izmenama do danas [80,81]. Ogledne parcele sa monokulturama pšenice i kukuruza su zasnovane 1970. godine, dok je monokultura soje započeta 2005., na parceli na kojoj se nalazio četvorogodišnji plodored (kukuruz - pšenica - stočni grašak - kukuruz). Ogledne parcele koje su odabrane za uzorkovanje su grupisane tako da reprezentuju jedan tip zemljišta, koji se koristi putem različitih sistema gajenja useva, pri čemu nema ponavljanja. Ogledno polje se nalazi na granici černozemne zone južnog Panonskog basena, u kome Vojvodina predstavlja glavnu oblast poljoprivredne proizvodnje.

Tehnologija obrade zemljišta se zasniva na oranju dubine 27 - 30 cm, dok se predsetvena obrada obavlja sa setvospremačem (Germinator, Kongskilde) na dubini od 15 cm. Što se tiče đubrenja, na svim parcelama se primenjuje mineralni azot (N), izuzev za gajenje soje i parcelama na kojima se ne primenjuje đubrivo od zasnivanja. Fosfor i kalijum se primenjuju u skladu sa analizom zemljišta [82]. U jesen se primenjuje 50 kg aktivne materije $N\ ha^{-1}$ po celoj oglednoj površini, dok se u proleće primenjuje 50 kg $N\ ha^{-1}$ za pšenicu i 70 kg $N\ ha^{-1}$ za kukuruz. Zavisno od useva, ovaj način đubrenja se odnosi i na tip đubrenja 1 (tabela 3.2), dok tip đubrenja 2 (tabela 3.2) označava primenu samo stajskog đubriva, dobijenog sa farme goveda, u količini od 20 t ha^{-1} svake druge godine. Ogledna parcela obeležena sa NS10 se uvek deli na dva dela, tako da na jednoj polovini bude uljana repica, a na drugoj kukuruz ili pšenica, čime se uspostavlja pravilna rotacija. Na pomenutoj parceli se primenjuje 30 kg $N\ ha^{-1}$ pre setve, a u proleće 90 kg $N\ ha^{-1}$ (tip đubrenja 3, tabela 3.2). Setva soje se obavlja sa semenom koje je prethodno tretirano mikrobiološkim đubrivom „NS-Nitragin”, koje predstavlja smešu visoko aktivnih sojeva kvržičnih bakterija - simbioznih azotofiksatora.

3.3. Odabir uzoraka zemljišta i useva

Poljoprivredno zemljište je uzorkovano dva puta godišnje, u kasno proleće i jesen, dok je biljni materijal (usevi koji se gaje na tom zemljištu) prikupljan jednom godišnje, u sezoni proleće ili leto, zavisno od vrste useva, počevši od 2013. godine. U toku perioda istraživanja, izvršeno je uzorkovanje (jednom godišnje) i neobradivog zemljišta na području ispitivanih lokaliteta, kao kontrolnih uzoraka. Uzorci biljnog materijala sa oglednih polja, za analize biomase (koren, stablo i list, ili podzemni i nadzemni delovi biljke) su uzimani u fazi plodonošenja, tj. u fazi pune zrelosti.

Vremenski uslovi na dan uzorkovanja po kampanjama uzorkovanja su prikazani u tabeli 3.3 (preuzeto sa sajta Republičkog Hidrometeorološkog Zavoda Republike Srbije, http://www.hidmet.gov.rs/latin/meteorologija/klimatologija_godisnjaci.php).

Tabela 3.3. Vremenski uslovi u sezonama uzorkovanja (dnevni proseki)

Lokacija	Datum	Temperatura (°C)	Vazdušni pritisak (mbar)	Relativna vlažnost
Radmilovac	29.05.2013.	22,4	986,4	51
	19.11.2013.	10,0	995,7	65
	14.08.2014.	24,1	994,3	59
	24.11.2014.	4,8	1011,6	73
	04.06.2015.	25,2	1004,8	57
	20.11.2015.	12,7	993,8	61
Rimski Šančevi	21.06.2013.	28,2	1003,6	65
	14.08.2013.	21,4	1008,4	55
	12.12.2013.	- 2,3	1023,8	94
	30.06.2014.	17,7	1000,0	86
	20.08.2014.	22,8	1003,6	69
	15.12.2014.	4,5	1011,8	94
	09.06.2015.	23,3	1005,1	65
	05.08.2015.	27,7	1005,3	57
	15.12.2015.	- 0,4	1018,8	100

U sezoni kada se vrši istovremeno uzorkovanje useva i zemljišta, prvo se izvrši uzorkovanje gajenog useva, a potom zemljišta sa istog mesta. Uzorci useva su uzorkovani tako što je uzeta biljka u celini sa vegetativnim (koren, stablo i list) i generativnim organima (plod), mase oko 2 kg. Uzorci zemljišta, uključujući i neobradivo zemljište (oko 2,5 kg), uzorkovani su na dve dubine 0-15 i 15-30 cm,

pomoću ašova i sonde od nerđajućeg čelika prečnika 10 cm. Uzorkovanje zemljišta je obavljeno u skladu sa preporukama [83]. Na lokalitetu uzorkovanja, uzorci su stavljeni u kese za uzorkovanje i adekvatno obeleženi, nakon čega su transportovani do laboratorije.

Rotacija useva na oglednim parcelama po godinama ispitivanja, na lokacijama Radmilovac i Rimski Šančevi je prikazana u tabeli 3.4.

Tabela 3.4. Rotacija useva po godinama uzorkovanja

Oznaka lokacije	Smena useva po godinama
Radmilovac	
R1 - R6	2013. <i>pšenica</i> 2014. <i>kukuruz</i> 2015. <i>pšenica</i>
Rimski Šančevi	
NS1	2013 - 2015. <i>pšenica</i>
NS2	2013 - 2015. <i>kukuruz</i>
NS3	2013 - 2015. <i>soja</i>
NS4	2013. <i>pšenica</i> 2014. <i>kukuruz</i> 2015. <i>pšenica</i>
NS5	2013. <i>pšenica</i> 2014. <i>kukuruz</i> 2015. <i>pšenica</i>
NS6	2013. <i>soja</i> 2014. <i>pšenica</i> 2015. <i>kukuruz</i>
NS7	2013. <i>soja</i> 2014. <i>pšenica</i> 2015. <i>kukuruz</i>
NS8	2013. <i>soja</i> 2014. <i>pšenica</i> 2015. <i>kukuruz</i>
NS9	2013. <i>pšenica</i> 2014. <i>soja</i> 2015. <i>pšenica</i>
NS10	2013 - 2015. <i>uljana repica</i>

Na oglednom polju „Radmilovac” u organskom sistemu zemljoradnje, u svim godinama ispitivanja, gajena je alternativna vrsta ozime pšenice *Triticum durum* (sorta *Durumko*), koja je ozimo-jara sorta namenjena isključivo za pravljenje testenina. Predusev za ozimu pšenicu uvek je kukuruz. U održivim sistemima zemljoradnje, gajena je *Rapsodija*, srednje rana sorta obične meke pšenice *Triticum aestivum vulgare*, koja takođe spada u sorte namenjene za ljudsku ishranu (hlebna pšenica), a čije su karakteristike dobra otpornost na zimu, tolerancija na sušu i visok potencijal za prinos. Hibrid kukuruza (*Zea mays* L.) koji je gajen u okviru ovog sistema je *ZP SC 677*, srednje kasni hibrid sa 130 - 135 dana vegetacije, najviše zastupljen u ravničarskim rejonima do 200 m nadmorske visine. U ispitivanom periodu na višegodišnjem oglednom polju „Rimski Šančevi”, gajene su žitarice: srednje rana sorta hlebne pšenice *NS 40S* (*Triticum aestivum* L.), tolerantna na sušu i izuzetno visokog potencijala za prinos, srednje kasni hibrid kukuruza (*Zea mays* L.) *NS 6010*, koji je pogodan za primenu intenzivnije agrotehnike, kao i industrijsko bilje: sorta ozime uljane repice *Zlatna* (*Brassica napus* L.), koja dobro podnosi niske temperature i sadrži oko 44 % sadržaja ulja u semenu, i kasnostasna visoko adaptabilna sorta soje *Venera* (*Glycine max* L. Merr), koju karakteriše povišen sadržaj ulja. Odabrane sorte i hibridi na ispitivanim parcelama u okviru ogleda oba lokaliteta, su selekcionisani u Institutu za ratarstvo i povrtarstvo iz Novog Sada (NS Seme).

3.4. Priprema uzoraka

U narednim poglavljima će biti opisan postupak pripreme uzoraka zemljišta i biljnog materijala, za pojedinačne primenjene metode analize, koje zahtevaju posebnu pripremu uzoraka.

3.4.1. Priprema uzoraka za radiohemijsku analizu

Priprema uzoraka zemljišta je uključivala sledeće korake: uklanjanje mehaničkih nečistoća i sitnjenje prstima do agregata veličine 1 - 3 cm, merenje uzoraka na decimalnoj elektrovagi (Mettler Toledo, Švajcarska) i sušenje u sušnici do konstantne mase na 105 °C, tokom 24 - 48 h, a zatim ponovno merenje. Uzorci zemljišta su tokom

sušenja izgubili oko 19 % u odnosu na početnu masu. Osušeni uzorci su mehanički usitnjeni u mlinu za mlevenje uzoraka koji radi na principu smicanja dve ploče i dodatno ručno u avanu sa tučkom, a zatim prosejani kroz sito od nerđajućeg čelika (veličine pora 250 μm), čime su homogenizovani do praha. Dalja priprema je obuhvatala odmeravanje oko 120 g ovako pripremljenih suvih uzoraka i mineralizaciju na 500 °C u peći za žarenje. Uzorci zemljišta tokom mineralizacije su izgubili 5 - 8 % u odnosu na masu suvog uzorka. Mineralizacija je poslednji korak u pripremi uzoraka, nakon čega se uzorci hlade u eksikatoru i ponovo mere, čime su pripremljeni za radiohemijsku proceduru određivanja aktivnosti ^{90}Sr . Postupak pripreme uzoraka zemljišta je prikazan na slici 3.3.



Slika 3.3. Postupak pripreme uzoraka zemljišta

Uzorkovani biljni materijal tj. usevi, su u laboratoriji, ručno razdvojeni na delove, pri čemu pšenica i uljana repica na koren i ostatak biljke tj. stabljiku sa zrnima, dok su kukuruz i soja razdvojeni na pojedinačne biljne organe: koren, stablo, list i plod (kukuruz - samo klip bez komušine, a soja sa mahunom). Ostaci zemljišta su odstranjeni sa korenovog sistema pod mlazom tekuće vode, posle čega je vršeno ispiranje destilovanom vodom. Koren je prethodno opran destilovanom vodom i držan nekoliko sati u 0,1 M HCl, radi uklanjanja ostataka zemlje i mineralnih oksida sa površine. Biljna masa je iseckana na sitnije delove. Masa uzoraka u svežem stanju je izmerena na

decimalnoj elektrovagi, nakon čega su uzorci sušeni na vazduhu i sobnoj temperaturi, minimalno tri nedelje (slika 3.4). Biljni materijal tokom sušenja gubi 30 - 60 % od početne mase, u zavisnosti od vrste useva, kao i odgovarajućeg biljnog organa. Osušeni uzorci su ponovo izmereni, zatim su usitnjeni i mineralizovani na temperaturi od 450 °C tokom 24 h, u peći za žarenje, metodom suvog spaljivanja. Tokom mineralizacije uzorci su izgubili 75 - 90 % u odnosu na masu osušenog uzorka. Kada se mineralizovani uzorci ohlade, izmeri im se masa, zatim se mineralni ostatak homogenizuje i proseje na sito od nerđajućeg čelika (veličine pora 250 µm), čime su uzorci pripremljeni za radiohemijsku proceduru određivanja aktivnosti ^{90}Sr . Za potrebe ove analize se koristi 20 g mineralizovanog biljnog materijala.

Proces mineralizacije uzoraka je neophodan, s obzirom da se primena radiohemijske metode vrši uvek iz mineralnog ostatka uzorka. Pri postupku mineralizacije mnogi radionuklidi se delimično ili potpuno gube iz uzorka, naročito ako su volatilni. Da bi gubitak bio sveden na minimum, temperatura mineralizacije treba postepeno da raste (oko 10 °C min⁻¹) i da ne prelazi tačku (temperaturu) isparavanja ispitivanog radionuklida, koja za ^{90}Sr iznosi 600 °C [84].



Slika 3.4. Deo postupka pripreme uzoraka biljnog materijala

3.4.2. Priprema uzoraka za određivanje koncentracija Sr i Ca

Priprema uzoraka zemljišta i biljnog materijala za određivanje koncentracija stroncijuma i kalcijuma je ista kao i priprema za radiohemijsku analizu, zaključno sa homogenizovanjem do praha, na način opisan u prethodnom poglavlju.

Uzorci zemljišta i biljnog materijala su rastvoreni prema sledećem postupku [85]: 0,5 g uzorka je odmereno u teflonsku kivetu i preliveno sa 7 mL 65 % HNO_3 i 2 mL 35 % H_2O_2 . Nakon toga je vršeno rastvaranje uzoraka u mikrotalasnom digestionom

sistemu (MDS-2100, USA) oko 30 minuta. Rastvoreni ekstrahovani uzorci su filtrirani kroz kvantitativni filter papir „plava traka” (№ 9.045 851, LLG Labware, Lab Logistics Group GmbH, Francuska) u normalne sudove zapremine 25 mL, koji su potom dopunjeni do merne oznake dejonizovanim vodom. Postupak pripreme uzoraka za određivanje koncentracije ukupnih Sr i Ca je prikazan na slici 3.5.



Slika 3.5. Priprema uzoraka za određivanje koncentracije ukupnih Sr i Ca

Koncentracija stroncijuma je merena iz ekstrakta uzoraka zemljišta i biljnog materijala direktnim merenjem apsorpcijskom tehnikom na ICP-OES-u. Rastvaranje uzoraka zemljišta i biljnog materijala smešom HNO_3 i H_2O_2 daje najbrže, najsigurnije i najpreciznije analitičke rezultate, sa tačnošću većom od 5% za određivanje sadržaja metala u pomenutim matriksima.

Uz svaku seriju uzoraka pripremljeni su na isti način i sertifikovani standardni referentni materijali: kanalizacioni mulj (eng. *sewage sludge*, Certified Reference Material - CRM 029, Fluka Analytical, Sigma-Aldrich, USA) i lišće breskve (eng. *peach leaves*, Standard Reference Material - SRM 1547, National Institute of Standards & Technology, Gaithersburg, Maryland, USA), koji imaju sledljivost do NIST (eng. *National Institute of Standards & Technology*). Upotrebljeni referentni materijali, pored ostalih elemenata, sadrže i poznatu vrednost koncentracije stroncijuma, koji je ispitivan.

3.4.3. Priprema uzoraka za određivanje koncentracija anjona i katjona

Uzorci zemljišta za analizu sadržaja anjona i katjona su osušeni, prosejani i homogenizovani na način opisan u poglavlju 3.4.1. Odmereno je 10 g suvog uzorka u plastičnu bočicu zapremine 50 mL i pipetom je dodato 25 mL dejonizovane vode, tj.

napravljena je 1:2,5 (v/v) suspenzija tla u vodi. Uzorci su mućkani 24 h na tresilici - translatornoj mešalici (Edmund Bühler, KS 15 B, Germany) i zatim profiltrirani kroz membranski filter špric od 0,22 μm . Uzorci su do merenja čuvani u plastičnim kontejnerima na 4 °C. Iz ekstrakta su direktno određene koncentracije anjona i katjona.

3.5. Reagensi

Sve korišćene hemikalije su visokog stepena čistoće, reagensi za analizu A.R. (eng. *analyzed reagent*) ili p.a. (lat. *pro analysi*) i upotrebljavaju se bez dodatnog prečišćavanja. Za pripremanje rastvora korišćena je destilovana voda.

Korišćene hemikalije su: HCl 35 - 38 % (Avantor Macron, Poljska), HNO₃ 65 % (Carlo Erba, Italija), NH₄OH 25 % (Carlo Erba, Italija), Al(NO₃)₃×9H₂O (Sigma-Aldrich, USA), NH₄Cl (Centrohem, Srbija), (NH₄)₂CO₃ (Centrohem, Srbija), CaCO₃ (Centrohem, Srbija), H₂C₂O₄×2H₂O (Centrohem, Srbija), H₂O₂ 35 % (Beta Hem, Srbija), indikatori bromkrezol zeleno i fenol crveno (Centrohem, Srbija).

3.6. Eksperimentalne metode analize

U ovoj doktorskoj disertaciji primenjene su sledeće metode analize:

- *Radiohemijska analitička metoda* određivanja aktivnosti ⁹⁰Sr
- *Optička emisiona spektrometrija sa induktivno spregnutom plazmom (ISP-OES)* za određivanje koncentracija ukupnih Sr i Ca
- *Jonska hromatografija (IC)* za određivanje koncentracija anjona i katjona
- *Metode* određivanja fizičko-hemijskih karakteristika zemljišta.

3.6.1. Radiohemijska analitička metoda

Da bi se odredila aktivnost pojedinačnih radionuklida, koriste se specifične metode merenja, koje zahtevaju posebnu pripremu uzoraka u skladu sa primenjenom metodom. U slučaju radionuklida ⁹⁰Sr, izabrana je radiohemijska selektivna metoda. Obzirom da procesom radioaktivnog raspada, ⁹⁰Sr prelazi u radioaktivni potomak ⁹⁰Y, radiohemijska metoda određivanja ⁹⁰Sr predstavlja analitičko-hemijsku metodu, koja se

zasniva na primeni nosača¹ (povlačivača), a nosač za ^{90}Y je $\text{Al}(\text{OH})_3$. Ukoliko uzmemo u obzir vremena poluraspada roditelja (^{90}Sr) i potomka (^{90}Y), posle dovoljno dugog vremena (bar 5 - 6 vremena poluraspada potomka), što iznosi 18 dana, uspostavlja se stanje stabilne radioaktivne ravnoteže, pri kojoj su aktivnosti roditelja i potomka izjednačene, te se na ovaj način ^{90}Sr određuje preko radioaktivnog potomka ^{90}Y .

Radiohemijska analitička metoda za određivanje aktivnosti ^{90}Sr u uzorcima iz životne sredine, je praktična metoda pogodna za rutinski rad, daje zadovoljavajuće rezultate, a istovremeno je, ukoliko uzmemo u obzir nekomplikovanost hemijskih operacija, ekonomična i tehnički lako ostvarljiva. Iz navedenih razloga, za određivanje aktivnosti ^{90}Sr u zemljištu i biljnim kulturama, izabrana je upravo ova metoda. Primenjena metoda je nestandardna i modifikovana metoda, koja je u skladu sa tim validovana [86].

3.6.1.1. Osiguranje analitičkog kvaliteta i validacija metode

Osiguranje analitičkog kvaliteta laboratorije je kompletan set mera koje laboratorije moraju preduzeti kako bi se osiguralo da se uvek mogu postići visoko kvalitetni rezultati [87]. Pored upotrebe validovanih i/ili standardizovanih metoda, ove mere podrazumevaju i efikasnu internu kontrolu kvaliteta procedura (upotreba referentnih materijala), izradu kontrolnih karata za proveru različitih parametara, kao i akreditaciju prema međunarodnim standardima [88]. Validacija analitičkih metoda predstavlja prvi nivo u osiguranju kvaliteta laboratorije [89].

Validacija neke metode obuhvata postupak izvođenja eksperimentalnih procedura i njihovo dokumentovanje, sa ciljem prikupljanja objektivnih dokaza da data metoda odgovara planiranoj upotrebi ili primeni [90]. Takođe, obuhvata postupak utvrđivanja i provere karakterističnih parametara, kako bi se obezbedilo da karakteristike metode budu razumljive i da je metoda naučno opravdana u uslovima njene primene. Prema standardu [88], validacija se primenjuje na nestandardne metode, metode razvijene u laboratoriji, standardne metode izvan predviđenog područja primene ili na proširene i modifikovane standardne metode.

¹Nosači se koriste za izdvajanje mikrokoličina radioizotopa.

Validnost predložene metode se vrši u skladu sa ICH preporukama (eng. *International Conference on Harmonization* [91]. U vezi sa tim, neophodno je određivanje analitičkih parametara validacije, kako bi se dokazalo da analitička metoda omogućava postizanje očekivanih rezultata u skladu sa zadatkom. Procedura podrazumeva eksperimentalno određivanje odabranih parametara validacije i poređenje sa kriterijumima utvrđenim za ove parametre. Međutim, nisu svi parametri uvek podjednako važni što zavisi od tipa primenjene analitičke metode. Kombinacijom odgovarajućih analitičkih parametara, oblikuje se plan validacije za svaku metodu pojedinačno.

Minimalan broj analitičkih parametara validacije koji treba da se testiraju su: tačnost, preciznost i granica detekcije [89].

➤ *Tačnost* (eng. *trueness*) predstavlja meru usaglašenosti između eksperimentalno dobijenih rezultata predloženom metodom i stvarne, tj. prihvaćene referentne vrednosti. Ovaj parametar ukazuje na ispravnost merenja. U praksi se tačnost metode može proceniti na nekoliko načina: analizom sertifikovanih referentnih materijala i poređenjem izmerenih rezultata sa sertifikovanim vrednostima, poređenjem sa rezultatima druge validovane ili generalno prihvaćene metode, kao i određivanjem procenta prinosa, odnosno „Recovery” vrednosti (RCV, %). Prihvatljiva RCV iznosi 95 - 105 %. Numerički pokazatelj tačnosti je određen sistematskim odstupanjem (eng. *bias*) metode, koji se dobija kao razlika aritmetičke sredine rezultata i referentne vrednosti ili kao njihov odnos.

➤ *Preciznost* metode predstavlja merilo disperzije rezultata i određuje se kao izraz slaganja između niza merenja izvedenih iz istog homogenog uzorka pod propisanim uslovima. Kod preciznosti, razlikuju se tri pojma: *repetabilnost* (eng. *repeatability*), koja predstavlja ponovljivost rezultata dobijenih istom metodom, istim materijalom, od strane istog analitičara, u istoj laboratoriji, istim instrumentom i u kratkom vremenskom periodu; *reproduktivnost* ili obnovljivost (eng. *reproducibility*), kada je reč o istoj metodi i materijalu, ali su promenjeni uslovi primene metode, tj. drugi analitičar, druga laboratorija, drugi instrument i dug period vremena; i *međupreciznost* (eng. *intermediate precision*), odnosno preciznost koja odgovara merenjima u međuserijama izvršenim pod maksimalno promenljivim uslovima u jednoj laboratoriji, tj. ista metoda, ista

laboratorija, različiti analitičari, različiti instrumenti i srednje dug vremenski period. Preciznost se obično izražava kao relativna standardna devijacija (RSD):

$$RSD = \frac{\sigma}{x_s} \quad (3.1)$$

gde je x_s - srednja vrednost merene veličine i σ - standardna devijacija, data izrazom:

$$\sigma = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_s)^2}{n-1}} \quad (3.2)$$

u kome je x_i - izmerena vrednost pojedinačnog merenja i n - broj merenja. Međutim, raspodela slučajnih veličina koje se dobijaju u realnom eksperimentu odgovara Studentovoj t-raspodeli, koja je data izrazom:

$$RSD = t \times \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (3.3)$$

gde je t - faktor Studentove raspodele. Prihvatljiva RSD je najčešće u opsegu od 1,5 do 3 %, ali prihvatljive vrednosti RSD mogu biti i veće, zavisno od tipa analitičke metode.

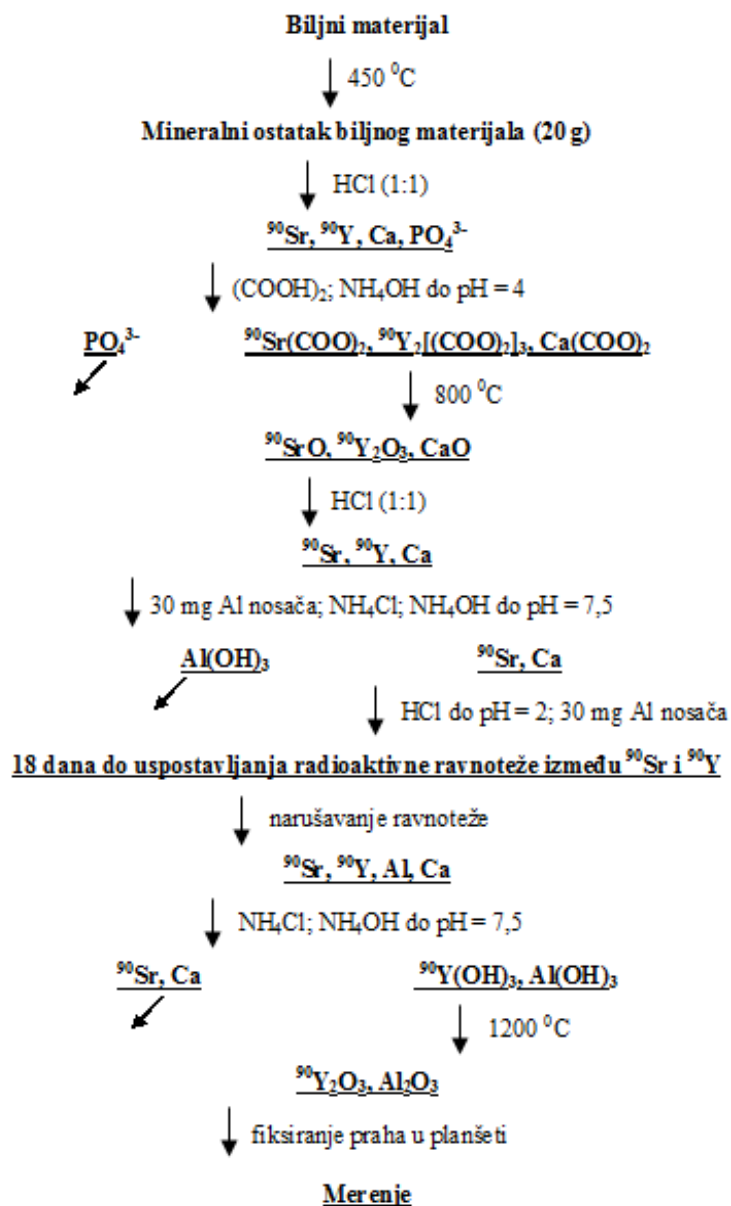
➤ *Granica detekcije* (eng. *Limit of Detection*, LOD ili *Detection Limit*, DL) je najniža koncentracija koja se realno može detektovati, ali ne i kvantitativno odrediti, odnosno ne može se kvantifikovati kao tačna vrednost. Za određivanje LOD koristi se nekoliko pristupa, koji zavise od toga da li je metoda određivanja analita instrumentalna ili neinstrumentalna. Takođe, vrednosti LOD zavise kod jedne iste metode i od korišćenog detektora.

3.6.1.2. Princip radiohemijske analitičke metode

A) Hemijsko-analitički tretman za uzorke biljnih kultura

Mineralni prah uzorka biljnog materijala se rastvara u 6 M HCl, uz blago zagrevanje. Filtratu se dodaje CaCO_3 , jer kalcijum služi kao nosač za ^{90}Sr i ^{90}Y , a zatim 8 % oksalna kiselina u višku, čime se talože oksalati kalcijuma, stroncijuma i itrijuma. Oksalati se žare do oksida na 800 °C, rastvaraju u 6M HCl, zatim se dodaje aluminijum u obliku aluminijum nitrata, koncentracije 30 mg Al mL⁻¹, na kome se adsorbuje ^{90}Y i pomoću NH_4OH se taloži aluminijum hidroksid. Nakon odbacivanja taloga, filtrat se zakiseli sa 6M HCl, opet mu se dodaje aluminijum nitrat i rastvor se prenese u PVC bocu, da bi se tokom 18 dana uspostavila radioaktivna ravnoteža ^{90}Sr - ^{90}Y . Nakon ovog vremena,

istim postupkom se kvantitativno taloži $\text{Al}(\text{OH})_3$, koji je nosač za nastali $^{90}\text{Y}(\text{OH})_3$. Ovaj postupak se ponavlja radi potpunog odvajanja i prečišćavanja ^{90}Y od tragova stroncijuma i kalcijuma. Potom se $\text{Al}(\text{OH})_3$ žari na $1200\text{ }^\circ\text{C}$ do oksida, Al_2O_3 . Izareni beličasti prah se odmerava u planšete na analitičkoj vagi (Mettler AE160, Švajcarska) i fiksira rastvorom PVC - aceton, nakon čega se vrši merenje. Opisani princip primenjene metode, shematski je prikazan na slici 3.6.



Slika 3.6. Shematski prikaz principa hemijsko-analitičkog odvajanja ^{90}Y [60]

B) Hemijsko-analitički tretman za uzorke zemljišta

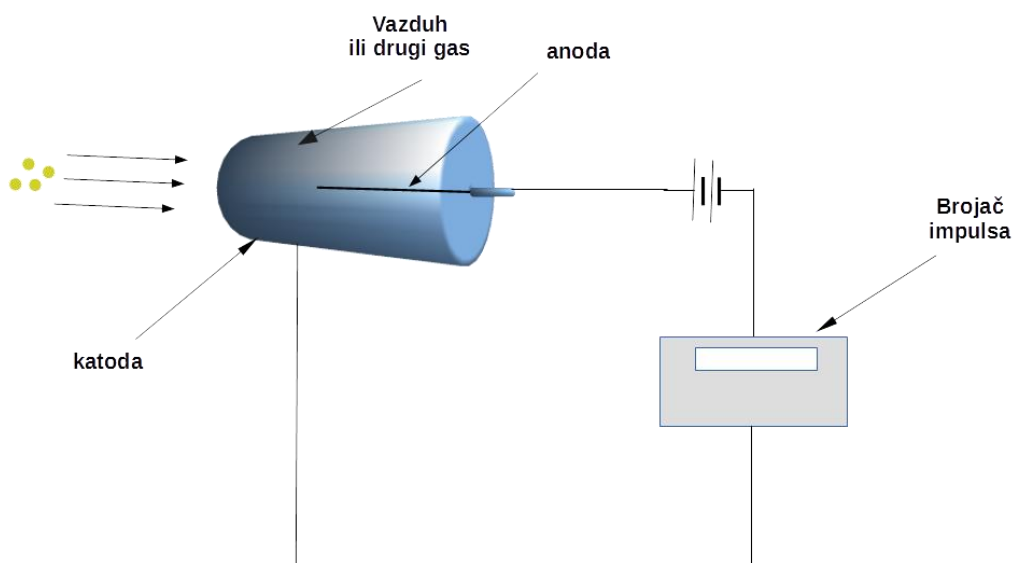
Mineralizovanom uzorku zemljišta dodaje se 1 L HCl (6 M) i uz stalno mešanje tokom 2 h, vrši se ekstrakcija ^{90}Sr . Nakon filtriranja i ispiranja uzorka destilovanom vodom do neutralne reakcije, filtrat uparava do suva. Uparenom ostatku se dodaje 10 mL koncentrovane HCl i ključala destilovana voda, čime se silicijum prevodi u nerastvoran oblik. Nakon toga se uzorku dodaje nekoliko mL koncentrovane HNO_3 , da bi se oksidovalo gvožđe i potom se vrši taloženje hidroksida III analitičke grupe, pomoću NH_4OH . Dobijeni voluminozni talog se zagreva do ključanja kako bi se dobro koagulirao, zatim se filtrira i ispira do neutralne reakcije, rastvara u 6 M HCl, nakon čega se vrši ponovno taloženje i ispiranje. Filtratu se posle uklanjanja hidroksida dodaje amonijum karbonat i vrši zagrevanje do ključanja, čime se formira talog zemnoalkalnih karbonata, koji se zatim rastvara u 6 M HCl. Potom se filtratu dodaje nosač aluminijuma u obliku aluminijum nitrata i naredni koraci procedure su isti kao za uzorke biljnog materijala [37].

3.6.1.3. Spektrometrija beta zračenja

Jedan od mernih uređaja koji se koristi za merenje niskih aktivnosti beta emitera u uzorcima iz životne sredine je gasni proporcionalni brojač. Princip rada ovog tipa detektora je zasnovan na jonizaciji i shematski je prikazan na slici 3.7. Jonizujuća čestica prolazi kroz efikasnu zapreminu detektora², koja je u ovom slučaju gas, pri čemu interaguje sa gasom i dolazi do stvaranja određenog broja jonskih parova; sakupljanjem jonskih parova na elektrodama dobija se informacija o zračenju. Pošto je intenzitet zračenja dat brojem detekcija u jediničnoj zapremini brojača u jedinici vremena, njegovo merenje svodi se na merenje broja električnih impulsa koji se pojavljuju na izlazu brojača.

Za merenje aktivnosti ^{90}Sr u uzorcima zemljišta i agrokultura, korišćen je niskofonski α/β gasni proporcionalni brojač *Thermo Eberline FHT 770 T* (ESM Eberline Instruments GmbH, Erlangen, Germany).

²Materijalni prostor u detektoru koji nakon interakcije sa zračenjem može da pruži indicaciju o postojanju - prolasku jonizujućeg zračenja.



Slika 3.7. Shematski prikaz principa rada gasnih detektora

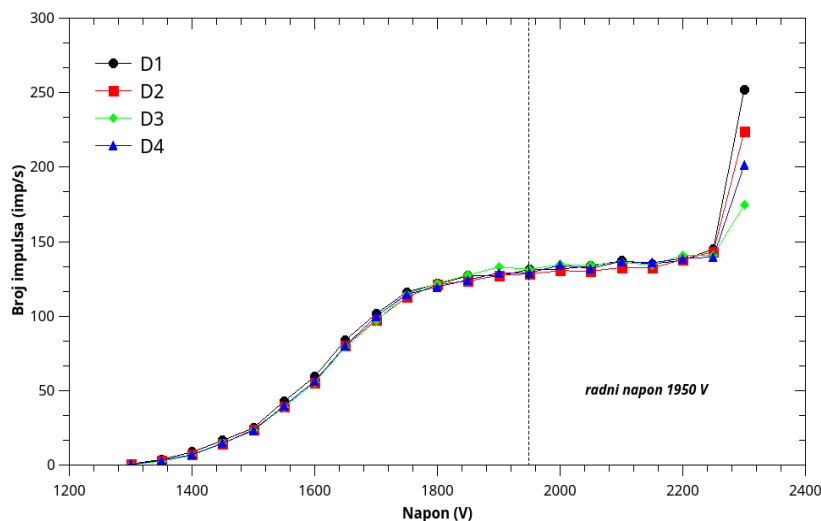
3.6.1.3.1. Osnovne karakteristike detektora

Detektor je predviđen za istovremeno merenje šest uzoraka, koji se mere 3600 s u 5 serija. Površina prozora svakog od šest detektora-brojača koji su raspoređeni na tri horizontalna klizača, iznosi 28 cm^2 , a za merenje uzoraka se koriste planšete od nerđajućeg čelika prečnika 5,9 cm. Sastavni deo detektora je i niskofonska zaštita od zračenja koju čini olovno kućište (olovne ploče) debljine zida 10 cm. Temperaturski opseg za rad detektora je od $+5$ do $+40 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Za ispiranje radne zapremine detektora koristi se gasna mešavina argon - metan (90 % Ar i 10 % CH_4) [92]. Efikasnost mernog uređaja (pojedinačnih detektora-brojača) za merenje ukupne beta aktivnosti u proseku iznosi oko 35 %.

3.6.1.3.2. Određivanje radnog napona detektora

Pri određivanju radnog napona, potrebno je odabrati sredinu platoa visokog napona, kao najpouzdaniju tačku za merenja. Za svih šest mernih pozicija u detektoru postoji tzv. test kanal. Vrednost brzine brojanja u test kanalu mora biti manja od $1/4$ ili veća od $3/4$ od brzine brojanja u $(\alpha+\beta)$ kanalu. Vrednost radnog napona za koju odnos test/merni kanal iznosi 0,5 uzima se kao operativna tačka [93]. Određena optimalna

vrednost radnog napona za β režim rada detektora, odnosno za merenje β aktivnosti iznosi 1950 V (slika 3.8).



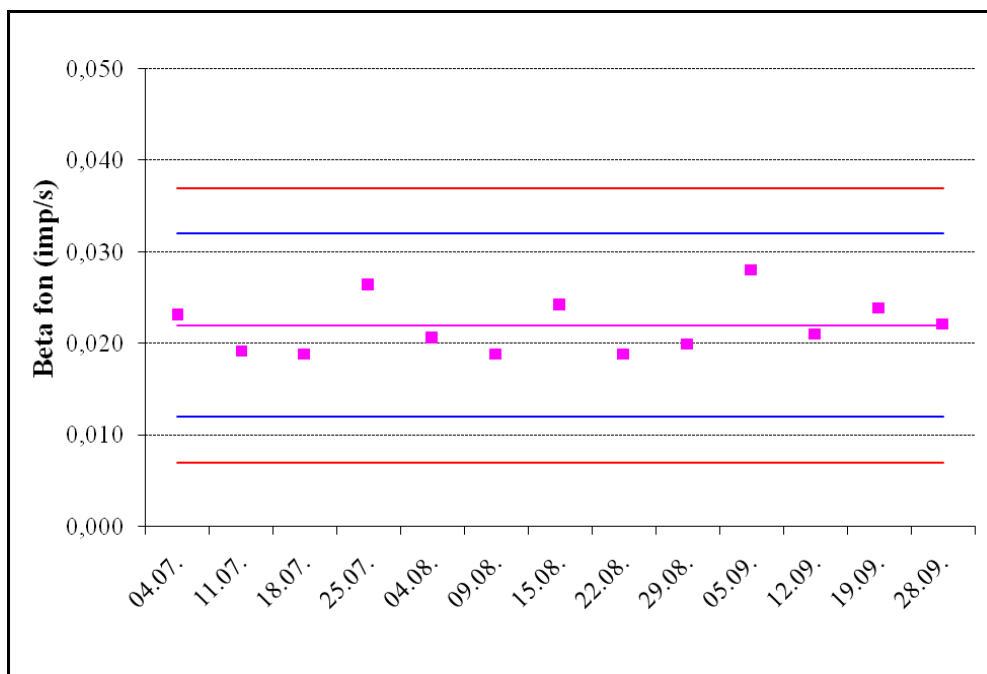
Slika 3.8. Plato α/β gasnog proporcionalnog brojača *Thermo Eberline FHT 770 T*

3.6.1.3.3. Kalibracija detektora

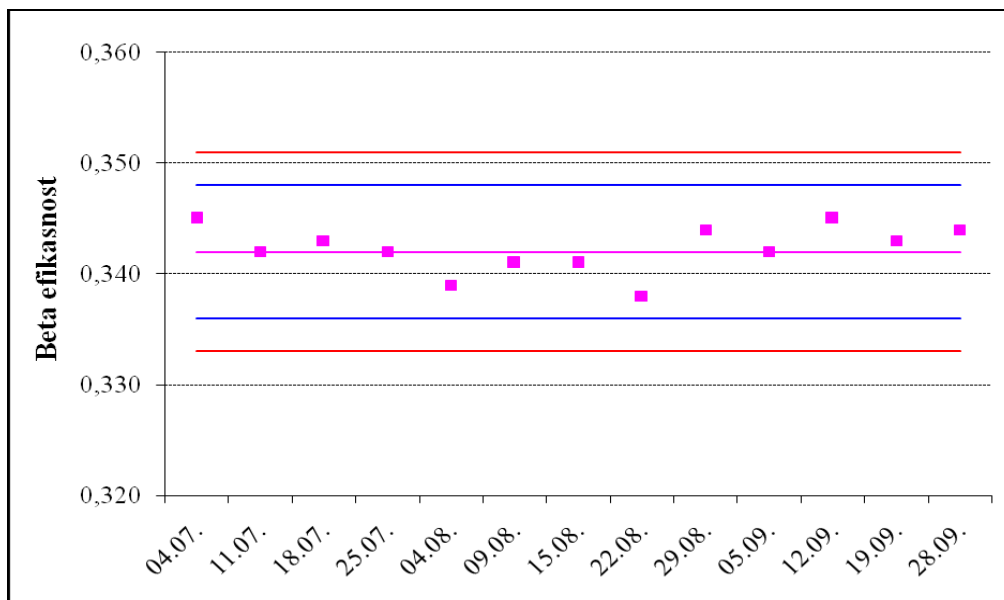
Da bi se odredila efikasnost brojanja potrebno je izvršiti kalibraciju detektora, koja se vrši softverski za svaku mernu poziciju u detektoru, merenjem brzine brojanja kalibracionog izvora i odgovarajućeg fona (pozadinskog zračenja) u istom vremenskom intervalu. Kalibracija detektora za merenje beta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

Tačnost i reproduktivnost mernog uređaja (provera efikasnosti detekcije) se verifikuju jednom nedeljno, pomenutim standardnim kalibracionim izvorom i sastavni su deo procedure kontrole kvaliteta, QC (eng. *quality control*). Praćenje ukupnog odbroja pozadinskog zračenja (eng. *background*) bez kalibracionog izvora, neophodno je kako bi se utvrdilo da nije došlo do kontaminacije detektora radioaktivnim materijalom.

Rezultati dobijeni tokom provere rada uređaja, tj. kontrole kvaliteta, za jedan kvartal u toku 2014. godine, prikazani su grafički na slikama 3.9 i 3.10, u vidu kontrolnih karata.



Slika 3.9. Kontrolna karta provere fona za beta aktivnost



Slika 3.10. Kontrolna karta provere beta efikasnosti

Na x - osama su prikazani datumi ispitivanja, dok su na y - osama prikazane vrednosti fona i efikasnosti za beta aktivnost. Na grafiku su takođe prikazane linije paralelne sa x - osom, koje odgovaraju određenoj vrednosti efikasnosti detekcije beta aktivnosti, kao i vrednosti odstupanja, $\pm 2\sigma$ i $\pm 3\sigma$ (σ - standardna devijacija). Prilikom provere rada detektora, u slučaju da su rezultati između dve i tri standardne devijacije, merenje treba ponoviti. Dozvoljeno je da se ovakav rezultat prihvati ako je jedan od dvadeset slučajeva, a ako se javi u više od 5 % slučajeva, potrebno je izvršiti određene korekcije [94].

3.6.1.3.4. Stabilnost rada detektora

Za proveru stabilnosti detektora najpogodnije je primeniti statistički Chi-Square test [95]. Za seriju merenja standardnog kalibracionog izvora ^{90}Sr na svakoj mernoj poziciji detektora, za određen broj merenja (ponavljanja) očitava se vrednost praga značajnosti (χ_t^2) sa koeficijentom rizika od 5 % iz tabličnih podataka. Za sve merne pozicije može se izračunati vrednost praga značajnosti, kao $\chi_i^2 = \sum (\chi_t - \chi_{\text{sr}})^2 / \chi_{\text{sr}}$. Ukoliko je za sve merne pozicije izračunata vrednost praga značajnosti manja od njene tablične vrednosti sa koeficijentom rizika od 5 %, to znači da instrument radi u stabilnom režimu, a eventualne razlike pri ponovljenim merenjima, sa sigurnošću od 95 %, mogu se pripisati statističkoj prirodi procesa [93].

3.6.1.4. Određivanje specifične aktivnosti ^{90}Sr

Specifična aktivnost ^{90}Sr , koji je u ravnoteži sa potomkom ^{90}Y , za dati uzorak se izračunava pomoću izraza (3.4):

$$A_{\text{Sr-90}} = \frac{(R - R_o) \times e^{\frac{\ln 2}{T_{1/2}} \times \Delta t}}{\varepsilon \times \eta_{\text{Al}} \times \eta_m \times m} \quad (3.4)$$

u kome je:

$A_{\text{Sr-90}}$ - specifična aktivnost ^{90}Sr za dati uzorak (Bq kg^{-1})

R - odbroj za mereni uzorak (s^{-1})

R_o - odbroj osnovnog zračenja - fon (s^{-1})

$T_{1/2}$ - vreme poluraspada ^{90}Y (64,1 h)

Δt - vreme proteklo od trenutka izdvajanja ^{90}Y do merenja (h)

ε - efikasnost mernog uređaja

η_{Al} - hemijski prinos (iskorišćenje) aluminijuma

η_m - prinos metode, koji prema literaturnim podacima iznosi 91,4 % [60]

m - masa uzorka (kg).

Navedeno je da aluminijum služi kao nosač za ^{90}Y , što znači da se izareni talog $^{90}\text{Y}_2\text{O}_3$ adsorbuje („povlači”) na Al_2O_3 . Količina aluminijuma u talogu se izračunava množenjem mase taloga (Al_2O_3) sa gravimetrijskim faktorom (G_F) za aluminijum, koji se izračunava iz izraza (3.5):

$$G_F = \frac{2 \times Ar(Al)}{Mr(Al_2O_3)} \quad (3.5)$$

u kome je:

$Ar(Al)$ - relativna atomska masa aluminijuma

$Mr(Al_2O_3)$ - relativna molekulska masa aluminijum oksida.

Hemijski prinos aluminijuma (za svaki pojedinačni uzorak), izračunava se iz izraza (3.6):

$$\eta_{Al} = \frac{m_{talog} \times G_F}{m_{Al}} \quad (3.6)$$

gde je:

m_{talog} - masa izarenog taloga Al_2O_3 (g)

m_{Al} - masa aluminijum nosača (g).

Minimalna detektovana aktivnost (MDA) se računa pomoću izraza:

$$MDA = \frac{GD}{m} \times e^{\frac{\ln 2}{T_{1/2}} \times \Delta t} \quad (3.7)$$

u kome GD predstavlja granicu detekcije za beta zračenje, koju automatski obračunava softver (s^{-1}).

Kontrola kvaliteta određivanja aktivnosti ^{90}Sr primenom radiohemijske analitičke metode je proverena u okviru međulaboratorijskih poređenja ispitivanja aktivnosti ^{90}Sr u uzorcima iz životne sredine, u organizaciji Međunarodne agencije za atomsku energiju (eng. *International Atomic Energy Agency*, IAEA): IAEA-TEL-2012-03; IAEA-TEL-2013-4 ALMERA; IAEA-TEL-2014-03; IAEA-TEL-2015-03 i IAEA-

TEL-2016-03, čime je potvrđen kvalitet dobijenih rezultata merenja (http://nucleus.iaea.org/rpst/ReferenceProducts/Proficiency_Tests/index.htm).

3.6.1.5. Merna nesigurnost određivanja specifične aktivnosti ^{90}Sr

Merna nesigurnost određivanja specifične aktivnosti ^{90}Sr , određuje se iz izraza (3.8):

$$\left(\frac{\Delta A_{\text{Sr-90}}}{A_{\text{Sr-90}}}\right)^2 = \left(\frac{\sqrt{R}}{R - R_{\text{oz}}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \eta_{\text{Al}}}{\eta_{\text{Al}}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \eta_m}{\eta_m}\right)^2 + \left(\frac{\Delta m}{m}\right)^2 + \left(\frac{0.693 \times \Delta t \times \Delta T_{1/2}}{T_{1/2}^2}\right)^2 \quad (3.8)$$

gde su sa ΔX označene odgovarajuće merne nesigurnosti pojedinačne veličine X . U navedenom izrazu, relativne merne nesigurnosti razlike odbroja merenog uzorka i odbroja osnovnog zračenja, kao i prinosa aluminijuma, mogu se odrediti pomoću izraza (3.9) i (3.10). Kod merenja beta zračenja na niskofonskom α/β brojaču *Thermo Eberline FHT 770 T*, na listi izveštaja merenja je data standardna devijacija u procentima:

$$\sigma = \frac{\sqrt{R}}{R - R_{\text{oz}}} \times 100\% \quad (3.9)$$

na nivou poverenja 95 %, pa se mora podeliti sa 100 kada se stavlja u izraz (3.8).

Mernu nesigurnost prinosa aluminijuma, možemo izračunati pomoću sledećeg izraza:

$$\left(\frac{\Delta \eta_{\text{Al}}}{\eta_{\text{Al}}}\right)^2 = \left(\frac{\Delta m_{\text{ta log}}}{m_{\text{ta log}}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta m_{\text{Al}}}{m_{\text{Al}}}\right)^2 \quad (3.10)$$

pri čemu se merna nesigurnost određivanja gravimetrijskog faktora može zanemariti, jer su relativna atomska i molekulska masa date do četvrtog decimalnog mesta. Merna nesigurnost prinosa metode iznosi 2 % na nivou poverenja 95 %.

3.6.2. Optička emisiona spektrometrija sa induktivno spregnutom plazmom

Za određivanje koncentracija ukupnih stroncijuma i kalcijuma u uzorcima zemljišta i biljnog materijala, primenjena je analitička tehnika, *optička emisiona spektrometrija sa induktivno spregnutom plazmom* (ICP-OES). Pobuđivanje uzoraka kod optičke emisije spektrometrije sa induktivno spregnutom plazmom, ostvaruje se u

plazmi argona, pri čemu se emituje zračenje karakterističnih talasnih dužina. Kvalitativni i kvantitativni podaci se dobijaju na osnovu veoma izražene specifičnosti emitovanog zračenja i njegovog intenziteta. Gas koji koristi ICP-OES je argon, koji služi za formiranje plazme i da se sistem očisti od nečistoća prilikom pokretanja rada aparata. Uzorak se unosi u ICP-OES instrument aspiracijom i mora biti u tečnom stanju, a elementi se određuju simultano [96].

Koncentracije Sr i Ca u uzorcima zemljišta i biljnog materijala su merene na ICP-optičkom emisionom spektrometru *iCAP6500 duo* (Thermo Scientific, Cambridge, United Kingdom). Kalibracija instrumenta je urađena u radijalnom modu, koji je manje osetljiv u odnosu na aksijalni mod, ali daje širi kalibracioni opseg (kalibracione tačke: 2, 5, 10, 50 i 100 ppm).

3.6.2.1. Određivanje koncentracija Sr i Ca

Za određivanje koncentracije Ca korišćena je emisiona linija 317,933 nm (korelacioni faktor $R=0,999$), dok je za određivanje koncentracije Sr korišćena emisiona linija 407,771 nm (korelacioni faktor $R=0,9967$).

Za pripremu radnih standarda, korišćeni su kalibracioni multielementni referentni standardi (AccuStandard, USA), sa sertifikovanim vrednostima koncentracije kalcijuma i stroncijuma 1000 i 1008 $\mu\text{g mL}^{-1}$, redom. Kontrola kvaliteta određivanja koncentracija elemenata je izvršena analizom kontrolnog multielementnog referentnog standarda (AccuStandard, USA), kao i proverom postupka rada u međulaboratorijskim poređenjima.

3.6.3. Jonska hromatografija

Ispitivanje koncentracija neorganskih anjona i katjona u ekstraktu zemljišta je sprovedeno metodom *jonske hromatografije* (IC) [97,98]. Za potrebe hemijske analize anjona i katjona, korišćen je instrument *Dionex* (USA) jonski hromatograf sa konduktometrijskim detektorom. Separaciona kolona za razdvajanje anjona je Dionex IonPack AS 11 4 mm (10-32), sa pretkolonom AG 11 4 mm (10-32) i supresorom Dionex ASRS 300 4mm. Kao mobilna faza za razdvajanje anjona na ovoj koloni,

korišćen je rastvor NaHCO_3 , koncentracije 0,5 mM i Na_2CO_3 , koncentracije 2 mM, pri brzini protoka od $0,9 \text{ mL min}^{-1}$. Separaciona kolona za razdvajanje katjona je Dionex IonPack CS 12 4 mm (10-32), sa pretkolonom CG 12 4 mm (10-32) i supresorom Dionex CSRS 4mm. Rastvor metan sulfonske kiseline, koncentracije 0,02 M, pri brzini protoka od $0,7 \text{ mL min}^{-1}$ je korišćen kao mobilna faza za razdvajanje katjona. Vreme analize je 20 minuta, a injektirana zapremina uzorka je $20 \mu\text{L}$ za pojedinačne probe.

3.6.3.1. Određivanje koncentracija anjona i katjona

Da bi se precizno odredile koncentracije anjona i katjona u rastvoru, konstruisana je kalibraciona kriva, koja prikazuje koncentracije standardnih rastvora anjona, odnosno katjona u odnosu na njihove odgovarajuće površine, a površine se izračunavaju prema hromatografu načinjenom na osnovu njihovih specifičnih provodljivosti ($\mu\text{S cm}^{-1}$). Kontrola kvaliteta određivanja koncentracija anjona i katjona je izvršena analizom multielementnih referentnih standarda (za anjone AccuStandard, USA i za katjone SpexCertiPrep, USA), kao i proverom postupka rada u međulaboratorijskim poređenjima.

3.6.4. Osnovne fizičko-hemijske karakteristike zemljišta

Sposobnost zemljišta da ostvaruje svoje funkcije u granicama ekosistema, odražavajući svoju biološku aktivnost i obezbeđujući životnu okolinu za floru i faunu, definiše se kao kvalitet zemljišta. Produktivna poljoprivredna zemljišta imaju sposobnost da podstiču rast korena biljke; usvajaju, zadržavaju i snabdevaju biljku vodom, povećavaju raspoloživost i omogućavaju kruženje mineralnih materija; dozvoljavaju optimalnu razmenu gasova i podstiču aktivnost biološke faze. Navedene osobine su delom u funkciji fizičkih osobina i procesa u zemljištu. Neke od fizičkih osobina zemljišta su vremenski statične, dok su neke dinamične, a takođe mogu biti i otporne na promene nastale usled upravljanja poljoprivrednim zemljištem.

Mehanički elementi zemljišta³ mineralnog, odnosno neorganskog porekla (feldspati, kvarc, kaolinit, ilit, hidroksidi Si, Al i Fe), obrazuju se procesima fizičkog, hemijskog i biološkog raspadanja stena i minerala. Mehanički elementi zemljišta organskog porekla (humus tj. humusne materije: humične i fulvične kiseline, proteini, celuloza, smole), nastaju biološkim i mikrobiološkim razlaganjem biljnih i životinjskih ostataka. Pri određivanju mehaničkog sastava zemljišta, mehanički elementi su po veličini grupisani u mehaničke frakcije (klasifikacija mehaničkih frakcija), koje čine skelet (kamen i šljunak), pesak i prah (koji se dele na podfrakcije: krupni, srednji i sitni (fini)), kao i glina. Sva zemljišta sadrže pesak, prah i glinu, u različitim količinama, što nije slučaj sa skeletom, koji u većini zemljišta Republike Srbije odsustvuje, jer se uglavnom radi o zemljištu obrazovanom na lesu i glinama [51]. Od savremenih klasifikacija, u Republici Srbiji se najčešće koristi klasifikacija Međunarodnog društva za proučavanje zemljišta (ISSS, od eng. *International Society of Soil Science*), prema kojoj je podela frakcija zasnovana na prečniku čestica [99]:

- kamenje (> 20 mm)
- šljunak (20 - 2 mm)
- pesak (20 - 0,02 mm)
- prah (0,02 - 0,002 mm)
- glina (< 0,002 mm)
- koloidi (< 0,0002 mm).

Na osnovu procentualnog sadržaja zbirne mehaničke frakcije fizičke gline i peska, vrši se klasifikacija zemljišta prema mehaničkom sastavu, odnosno, izdvajanje tzv. teksturnih klasa zemljišta. Tročlana klasifikacija tekture zemljišta Američkog ministarstva za poljoprivredu (USDA, od eng. *United States Department of Agriculture*) je zasnovana na određivanju teksturne klase pomoću trougaonog dijagrama, koristeći frakcije peska, praha i gline [100]. Na stranicama trougla, koje su podeljene na podeoke od 0 - 100 % predstavljene su frakcije peska, praha i gline, dok je unutrašnjost trougla podeljena na polja u koja su upisane odgovarajuće teksturne klase zemljišta prema sadržaju ovih mehaničkih frakcija: pesak, ilovače (zemljišta sa 20 - 50 % fizičke gline) i glinuše.

³Mehanički sastav zemljišta ili tekstura predstavlja sadržaj elementarnih (mehaničkih) čestica različitih dimenzija, odnosno procentualnu zastupljenost mehaničkih elemenata u odnosu na masu čvrste faze zemljišta, koja zauzima najveći deo ukupne zapremine zemljišta.

U trofaznom sistemu zemljišta, tečnu fazu čini voda u tečnom stanju, zajedno sa u njoj rastvorenim materijama (soli, organske materije). Voda je jedan od najznačajnijih faktora obrazovanja zemljišta i njeno prisustvo u zemljištu značajno utiče na tok elementarnih pedogenetskih procesa; ujedno količina vode u zemljištu, kao i njena hemijska aktivnost su veoma značajni faktori za biljke i žive organizme u zemljištu. Pored uticaja na tok mnogih procesa, zemljišna vlaga utiče i na osobine zemljišta: fizičke (strukturu, gustinu, poroznost, fizičko-mehaničke osobine), hemijske (reakcija zemljišnog rastvora i redoks potencijal), biološke, te na hranljivi režim i plodnost zemljišta. Sa ekološkog stanovišta, najznačajnija je činjenica da je voda jedan od najvažnijih faktora plodnosti zemljišta [101]. U zavisnosti od karaktera veze sa čvrstom fazom zemljišta, voda u tečnom stanju može biti: hemijski ili fizički vezana, i slobodna voda. Jako vezana ili higroskopska voda nije dostupna korenovom sistemu biljaka. Higroskopska vlažnost zemljišta zavisi od mehaničkog, mineraloškog i hemijskog sastava zemljišta, kao i stepena njegove humoznosti. Glinovita, humozna zemljišta pokazuju veći stepen higroskopnosti, nego peskovita zemljišta siromašna humusom. Higroskopnost zemljišta pri datim uslovima uglavnom zavisi i od relativne vlažnosti atmosferskog vazduha [51].

Gustina suvog zemljišta⁴ zavisi od njegove rastresitosti ili zbijenosti, procesa bubrenja i skupljanja, vlažnosti, mehaničkog i agregatnog sastava, kao i od mehaničke obrade zemljišta. Ova osobina zemljišta je veoma promenljiva, prostorno i vremenski, naročito u površinskom, oraničnom horizontu. Vrednosti variraju u intervalu od 0,13 g cm⁻³ u nekim tresetnim, do > 1,8 g cm⁻³ u zbijenim iluvijalnim horizontima nekih zemljišta u suvom stanju. U organogenim horizontima vrednosti su znatno manje od 1 g cm⁻³, a u humusnom horizontu 1 - 1,3 g cm⁻³. Peskovita zemljišta karakterišu veće vrednosti gustine nego zemljišta težeg mehaničkog sastava [51]. Gustina suvog zemljišta se povećava od površine ka dubljim slojevima zemljišta, što je posledica manjeg stepena humoznosti dubljih slojeva zemljišta, kao i dugoročnog pritiska gornjih na dublje slojeve zemljišta. Ponekad se ta tendencija narušava usled pedogenetskih procesa. Gustina suvog zemljišta je pokazatelj fizičkog stanja zemljišta i karakteristika njegove plodnosti, odnosno pogodnosti za gajenje poljoprivrednih kultura. Optimalne

⁴Gustina suvog zemljišta predstavlja masu čvrste faze isušenog zemljišta na 105 °C u jedinici ukupne zapremine zemljišta.

vrednosti gustine ilovastih i glinovitih zemljišta za većinu gajenih kultura variraju od 1 do 1,4 g cm⁻³ [51].

Hemijski sastav zemljišta i njegove hemijske osobine se mogu razlikovati u zavisnosti od tipa zemljišta, čak i u raznim horizontima istog zemljišnog profila. Hemijski sastav zemljišta pokazuje jak uticaj na biološke i mnoge fizičke osobine zemljišta, stoga spada među njegove najvažnije karakteristike, a istovremeno i među najvažnije faktore koji utiču na plodnost zemljišta [99].

Hemijska reakcija zemljišta, izražena kao pH vrednost je jedna od najvažnijih hemijskih i fizioloških karakteristika zemljišnog rastvora (tečne faze zemljišta) i pokazatelj je niza agrohemijских svojstava zemljišta; određena je hemijskim svojstvima čvrste i tečne faze zemljišta. Pri određivanju osnovnih hemijskih svojstava zemljišta za potrebe agrohemijских istraživanja, hemijska reakcija zemljišta se, ako su u pitanju ratarski usevi, obično analizira u sloju od 0 - 30 cm dubine. Prema hemijskoj reakciji, zemljišta su podeljena na kisela, neutralna i alkalna. Acidifikacija ili zakišeljavanje zemljišta je proces koji dovodi do povećanja koncentracije H⁺ jona u tečnoj i čvrstoj fazi zemljišta. U zemljištu se razlikuju dve vrste kiselosti: aktivna kiselost (kiselost zemljišnog rastvora) i potencijalna kiselost (kiselost zemljišnog adsorptivnog kompleksa, odnosno čvrste faze zemljišta). Aktivnu kiselost izazivaju slobodni H⁺ joni koji se nalaze u zemljišnom rastvoru. Potencijalna kiselost zemljišta je prouzrokovana H⁺ jonima koji su adsorbovani na površini koloidnih čestica i nisu vezani istom jačinom, tako da jedni prelaze u zemljišni rastvor lakše i vezani su slabijim silama suprotnog naelektrisanja za koloidnu česticu (supstituciona kiselost), a drugi teže i vezani su jačim silama (hidrolitička kiselost). Aktivna kiselost zemljišta se određuje u suspenziji zemljišta sa destilovanom vodom i označava se kao „pH u H₂O”, dok se supstituciona kiselost određuje u suspenziji zemljišta sa 1 M rastvorom KCl i označava se kao „pH u KCl” ili fiziološki aktivna kiselost [101].

Prisustvo ili odsustvo CaCO₃ u zemljištu ukazuje na dinamiku i genezu zemljišta, kao i na nastale promene zemljišta. Jedan od glavnih nosioca Ca u zemljištu, CaCO₃, prilično lako se raspada (razaranjem mineralnim kiselinama) i kako se joni Ca²⁺ slabo vezuju za minerale gline, u uslovima vlažnije klime prilično brzo se ispiraju iz zemljišta. Obzirom na navedeno, veći deo zemljišta u Republici Srbiji ne sadrži CaCO₃ u površinskom horizontu [99]. CaCO₃ povoljno utiče i na pH reakciju zemljišta, tako što

izaziva blago alkalnu reakciju, koja je optimalna za rast i razvoj većine gajenih biljnih kultura, a takođe deluje i kao pufer. Iz tog razloga se jače kiselim zemljištima (pH od 5,1 do 5,5), siromašnim Ca^{2+} jonima, pored kalcijumovih đubriva, dodaju i visoke doze (5 - 6 t ha⁻¹ ili više) CaCO_3 , što predstavlja kalcifikaciju zemljišta. Ovo je važna agromeliorativna mera, koja utiče ne samo na smanjenje kiselosti zemljišta, već i na poboljšanje drugih osobina zemljišta, kao što je plodnost. Proces migracije CaCO_3 u zemljištu je veoma spor i traje više stotina godina, tako da njegov sadržaj u zemljištu ne pokazuje promene sezonskog karaktera [101].

Zemljište se obogaćuje organskom materijom koja potiče od korenja biljaka, pedofaune i od biljnih ostataka koji dolaze na površinu zemljišta, kao i od makroorganizama koji žive u zemljištu. Organski deo zemljišta predstavlja složen sistem materija izrazito dinamičkog karaktera, što je rezultat neprekidnog priliva organskih materija u zemljište i njihove neprekidne transformacije. Jedan deo organskih materija se odmah mineralizuje, dok se drugi deo postepeno transformiše i pretvara u novu specifičnu tvorevinu poznatu kao humus⁵. Humus ima uglavnom kiselinska svojstva, pa kao takav apsorbuje katjone u zemljištu. Količina i sastav humusnih materija u zemljištu ima veliki uticaj na hemijska, fizička i biogena svojstva zemljišta (strukturu, vodni, vazdušni i toplotni režim zemljišta). Humus u zemljištu nije samo važan izvor hranljivih materija za više biljke, već je izvor hrane i za zemljišne mikroorganizme. Govoreći o značaju mineraloškog sastava zemljišta, humus je jedno od svojstava zemljišne sredine koje određuje „stepen njene plodnosti”. Obogaćivanje zemljišta organskim materijama, unošenjem u njih stajnjaka, zatim đubriva dobijenog dekompozicijom biljnih ostataka i gajenjem biljnih smeša u plodoredu, spada među najvažnije mere koje utiču na povećanje plodnosti zemljišta [99].

U sastav humusa ulaze dve grupe organskih jedinjenja: humusne materije nespecifične prirode i specifične, odnosno prave humusne materije, koje se međusobno razlikuju prema načinu obrazovanja, sastavu i osobinama. Organske (humusne) materije nespecifične prirode obuhvataju veliki broj organskih jedinjenja (ugljeni hidrati, aminokiseline, smole, lignin, fermenti, vitamini i dr.), koja nisu rezultat procesa humifikacije. Sadržaj humusnih materija nespecifične prirode u slabo humusnim zemljištima Republike Srbije je mali i u njihovom humusnom horizontu uglavnom ne

⁵Pod humusom u širem smislu se podrazumeva kompleks mrtve organske materije, koja se u zemljištu nalazi u različitim stadijumima transformacije (razlaganja i sinteze).

prelazi 10 - 15 % od ukupne mase organskih materija. Deo ovih humusnih materija služi kao materijal za obrazovanje pravih humusnih materija. Specifične (prave) humusne materije se obrazuju humifikacijom organskih ostataka i obuhvataju tri grupe jedinjenja: humusne kiseline, kao i njihove soli - humate i humine. Iz zemljišta su izdvojene dve grupe humusnih kiselina, tamno obojene - *humične* i svetlo obojene - *fulvične kiseline*. Humične kiseline su visoko molekularna azotna organska jedinjenja, veoma složene građe molekula, posledica čega je njihova velika reakciona sposobnost i visok kapacitet adsorpcije katjona. Humične kiseline i njihove soli (huminati) su prisutne u sastavu humusa svih zemljišta, naročito u karbonatnim zemljištima. Fulvične kiseline su takođe, visokomolekularna azotna organska jedinjenja, ali prostije građe od humičnih kiselina. Fulvične kiseline se prema građi molekula, kao i po uticaju na tok procesa u zemljištu, znatno razlikuju od humičnih kiselina. Ove kiseline, kao i njihove soli (fulvati) su prisutne u humusu svih zemljišta, ali je za razliku od humičnih, njihov udeo najviši u sastavu humusa jako kiselih i slabo baznih zemljišta, u kojima se nalaze uglavnom u formi slobodnih (agresivnih) kiselina. Fulvične kiseline su mnogo jače kiseline od humičnih i pri visokom udelu u zemljištu izazivaju „kiselinsku destrukciju” silikata, minerala gline. Važno je istaći da su u vodi dobro rastvorljive ne samo fulvične kiseline, nego i fulvati Na, K, NH_4 , Ca i Mg. Pored slobodnih fulvičnih kiselina i raznih fulvata, izvestan deo kiselina u zemljištu je vezan sa humičnim kiselinama, što dovodi do njihovog slabijeg nepovoljnog uticaja na zemljište [99].

3.6.4.1. Određivanje osnovnih fizičko-hemijskih karakteristika zemljišta

Od osnovnih fizičkih osobina zemljišta, određene su: mehanički sastav, higroskopska vlažnost i gustina zemljišta. Za određivanje mehaničkog sastava zemljišta korišćena je pipet metoda, odnosno sedimentacija u mirnoj vodi [102]. Higroskopska vlažnost (sadržaj higroskopne vode) je određena gravimetrijskim gubitkom vode iz uzoraka zemljišta, čije su mase izmerene pre sušenja na 105 °C. Gustina ili zapreminska masa, u prirodno-nenarušenom stanju zemljišta je određena cilindrima po Kopecky-om, zapremine 100 cm³ [101].

Od osnovnih hemijskih osobina zemljišta, određene su: pH vrednost (u vodi i kalijum hloridu), sadržaj kalcijum karbonata, sadržaj humusa i sadržaj ukupnog

organskog ugljenika. Aktivna i supstituciona kiselost u zemljištu su određene elektrometrijskom metodom pomoću pH-metra sa dvojnog kombinovanom elektrodom, i to, aktivna kiselost u odnosu zemljišta i destilovane vode 1:2,5, a supstituciona u istom odnosu zemljišta i 1M KCl [103]. Kvantitativni sadržaj CaCO_3 je određen volumetrijski merenjem zapremine oslobođenog CO_2 , pomoću Scheibler-ovog kalcimetra [104]. Sadržaj humusa je određen Tjurin-ovom metodom [105,106]. Sadržaj organskog ugljenika je određen titracijom sa $(\text{NH}_4)_2\text{Fe}(\text{SO}_4)_2 \times 6\text{H}_2\text{O}$, nakon digestije uzoraka rastvorom dihromat sumporne kiseline, zasnovano na Tjurin-ovoj metodi [107].

3.7. Statistička analiza rezultata merenja

Statistička analiza rezultata merenja sprovedena je linearnom korelacionom analizom i analizom varijanse (eng. *ANalysis Of VAriance* - ANOVA), da bi se utvrdilo postojanje značajnih razlika u hemijskom sastavu, kao i aktivnosti ^{90}Sr u zemljištu i biljnim kulturama za pomenute lokalitete. Korekcija na višestruka poređenja urađena je pomoću Tukey HSD testa sa nivoom značajnosti 0,05. Model uzima u obzir sve varijabilitete, kao i njihov međusobni uticaj, što je nemoguće proceniti na drugi način. Polazna hipoteza koja se testira, proverava se izvođenjem F testa. Izračunata F-vrednost se uporedi sa kritičnom vrednošću. Ukoliko je ona veća od kritične vrednosti, polazna (nulta) hipoteza se odbacuje sa nivoom rizika manjim od 5 % ($p < 0,05$) tj. srednje vrednosti se značajno razlikuju, a ako je izračunata vrednost manja od kritične, nulta hipoteza se zadržava sa nivoom rizika većim od 5 % ($p > 0,05$). Utvrđivanje seta rezultata koji uslovljava odstupanja vrši se tako što se srednje vrednosti poređaju u rastući niz i upoređuju razlike susednih vrednosti sa najmanjom značajnom razlikom.

3.8. Parametri radijacione sigurnosti

Translokacije stabilnih i radioaktivnih izotopa iz jedne u drugu kariku ekološkog sistema, kvantitativno i kvalitativno se opisuju preko određenih radioekoloških parametara [33]. Izračunati su sledeći parametri: transfer faktor zemljište - usev, stroncijumova jedinica, koeficijent diskriminacije i koeficijent zaštite. Ovi parametri su izračunati na osnovu određenih specifičnih aktivnosti radioizotopa ^{90}Sr i koncentracija

Ca u zemljištu i usevima i predstavljaju objektivne pokazatelje koji opisuju radijacionu sigurnost nekog ekološkog sistema.

3.8.1. Transfer faktor

Jedan od parametara migracione sposobnosti radionuklida iz zemljišta u korenov sistem, a potom i u ostatak biljne kulture, jeste akumulacioni ili transfer faktor. Ovaj faktor istovremeno predstavlja i kvantifikaciju procesa, tj. kvantitativnu meru transporta i akumulacije određenog radionuklida u sistemu zemljište - biljka. Transportni proces u sistemu zemljište - biljka je prvenstveno uslovljen fizičko-hemijskim karakteristikama radionuklida i tla, biološkim osobinama biljnih kultura i primenjenim agrotehničkim merama u sistemu obrade zemljišta [108]. Usvajanje i akumulacija radionuklida od strane biljnih kultura je složen proces i zavisi od mnogih parametara, naročito od puteva kontaminacije, obzirom na to da se radionuklidi mogu deponovati na lišću i drugim delovima biljke iz vazduha (tzv. folijarna depozicija) ili putem korenovog sistema.

U radioekološkim studijama za procenu doze zračenja koju čovek prima unošenjem radionuklida u organizam, modeli neizostavno koriste transfer faktor kao meru kvantifikacije prelaska radionuklida iz jedne karike lanca ishrane u drugu. Transfer faktor je pogodan za predviđanje i procenu mogućnosti kontaminacije lanca ishrane. Pored procene radijacionog rizika, poznavanje vrednosti ovog faktora može da posluži i za normiranje vrednosti minimalnih detektovanih aktivnosti radioaktivnog zagađivača u poljoprivrednom zemljištu, za formiranje preventivnih mera za akcidentne situacije, kao i za eventualnu dekontaminaciju poljoprivrednog zemljišta uzgajanjem određenih ratarskih kultura. Između ostalog, mogu se dobiti i podaci za osnovu teorijskog objašnjenja različitog usvajanja elemenata, koji ne učestvuju u odvijanju fizioloških i biohemijskih procesa u biljnim kulturama. U ovu grupu, takođe spada i veštački radionuklid ^{90}Sr , u čijoj toksikologiji se prepliću kako radijaciona, tako i hemijska toksičnost, koje zavise od više faktora, što komplikuje i pojačava negativne efekte na ljudsko zdravlje usled izloženosti datom radionuklidu [109,110].

Transfer faktor zemljište - biljka (TF) predstavlja odnos specifične aktivnosti određenog radionuklida u biljnoj kulturi ($A_{\text{Sr-90},B}$) i specifične aktivnosti u odgovarajućem zemljištu ($A_{\text{Sr-90},Z}$), i izračunava se pomoću jednačine (3.11):

$$TF = \frac{A_{Sr-90,B}}{A_{Sr-90,Z}} \quad (3.11)$$

pri čemu su specifične aktivnosti izražene kao Bq kg⁻¹ sveže materije biljne kulture i Bq kg⁻¹ suve materije zemljišta, odakle sledi da je transfer faktor neimenovan broj.

Izračunavanje transfer faktora je predmet mnogih studija [111-120], jer je značajno iz više prethodno navedenih razloga. U domaćoj literaturi, nema podataka za vrednosti ⁹⁰Sr transfer faktora obradivo zemljište - usev, za primenjene različite agrotehničke mere i tehnologije gajenja useva. Prve publikacije tog tipa za sistem obradivo zemljište - usevi u Republici Srbiji je proistekla upravo iz ove doktorske disertacije [121,122].

3.8.2. Broj stroncijumovih jedinica

U karikama ekološkog ciklusa postoji diskriminacija radionuklida ⁹⁰Sr u odnosu na njegov metabolički analog Ca, tako da se nivo aktivnosti ⁹⁰Sr može izraziti i kao odnos aktivnosti ⁹⁰Sr i koncentracije Ca, koji se naziva stroncijumova jedinica (SJ). Broj stroncijumovih jedinica, izražen kao mBq ⁹⁰Sr mg⁻¹ Ca, se izračunava na osnovu izraza [33]:

$$SJ = \frac{A_{Sr-90}}{[Ca]} \quad (3.12)$$

gde su A_{Sr-90} - specifična aktivnost ⁹⁰Sr (mBq kg⁻¹) i $[Ca]$ - koncentracija ukupnog Ca (mg kg⁻¹) u zemljištu ili biljnoj kulturi.

3.8.3. Koeficijent diskriminacije

Da bi se odredio stepen transfera ⁹⁰Sr i Ca iz zemljišta u biljku, izračunava se koeficijent diskriminacije (KD), koji predstavlja odnos broja stroncijumovih jedinica u biljci i zemljištu [33]:

$$KD = \frac{SJ_{biljka}}{SJ_{zemljište}} \quad (3.13)$$

Ovaj koeficijent je bezdimenzioni broj, koji je najčešće približno jednak jedinici [37].

3.8.4. Koeficijent zaštite

Koeficijent zaštite (KZ) se definiše za ^{90}Sr i Ca , kao odnos broja stroncijumovih jedinica u zemljištu i biljci, dakle on je recipročna vrednost koeficijenta diskriminacije [33]:

$$KZ = \frac{1}{KD} \quad (3.14)$$

Koeficijent zaštite je bezdimenzioni broj i za razliku od koeficijenta diskriminacije koji je uglavnom <1 , ovaj je uvek >1 .

3.8.5. K-parametar

U cilju određivanja efekta depozicije radionuklida ^{90}Sr na ispitivanim lokalitetima, izračunava se K-parametar, koji predstavlja odnos specifičnih aktivnosti ^{90}Sr u dva ispitivana sloja zemljišta, 1 i 2:

$$K_{\text{Sr-90}} = \frac{A_{1,\text{Sr-90}}}{A_{2,\text{Sr-90}}} \quad (3.15)$$

pri čemu sloj 1 označava dubinu zemljišta 0-15 cm, a sloj 2 dubinu 15-30 cm. Parametar K je neimenovan broj i ukoliko je >1 , u tom slučaju za ispitivani profil zemljišta postoji opadajući gradijent.

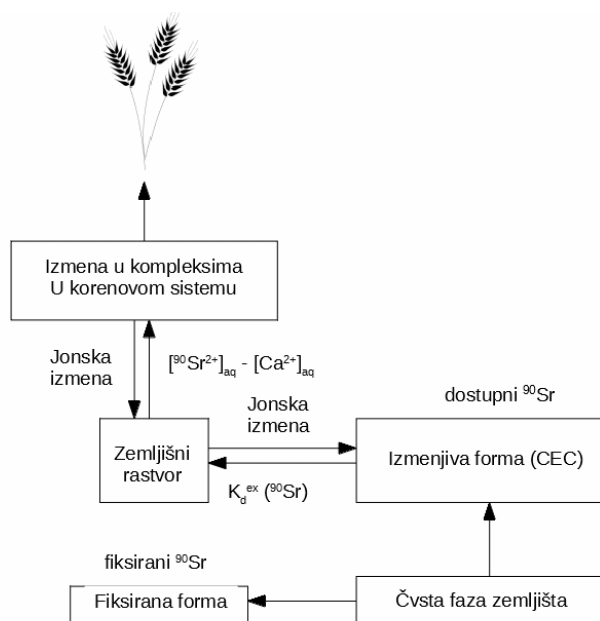
3.9. Matematički model migracije ^{90}Sr u sistemu zemljište - biljka

Složeni proces transfera ^{90}Sr od zemljišta do biljke je određen skupom različitih fizičko-hemijskih i bioloških procesa čija je formalizacija moguća samo u okviru matematičkog modela. Maskalchuk i sar. [123] su dali osnovne pretpostavke matematičkog modela koji simulira transfer ^{90}Sr iz zemljišta u nadzemni deo biljke, pri čemu su pošli od sledećih pretpostavki:

- Radioizotop ^{90}Sr je u dinamičkoj ravnoteži sa dva sistema koji izmenjuju jone, a to su: čvrsta faza zemljišta i izmenjivački kompleks korenovog sistema
- Biljka ^{90}Sr preuzima iz zemljišnog rastvora i njegova koncentracija u biljnoj kulturi je proporcionalna koncentraciji u korenu

- Koncentracija ^{90}Sr u izmenjivačkom kompleksu uglavnom zavisi od koncentracije Ca^{2+} u zemljišnom rastvoru
- Koncentracija ^{90}Sr u zemljišnom rastvoru je obrnuto proporcionalna koeficijentu izmene između čvrste i tečne faze zemljišta (K_d^{ex})
- Koeficijent izmene ^{90}Sr je određen kapacitetom zemljišta za jonsku izmenu (CEC) i koncentracijama katjona u zemljišnom rastvoru (dominantno koncentracijom Ca^{2+})
- Fiksirani oblik ^{90}Sr ne učestvuje u razmeni sa zemljišnim rastvorom.

Shematski prikaz elemenata matematičkog modela migracije ^{90}Sr u sistemu čvrsta faza zemljišta - zemljišni rastvor - biljka, dati su na slici 3.11.



Slika 3.11. Shematski prikaz modela migracije ^{90}Sr u sistemu zemljište - biljka

Prema modelu, pod ravnotežnim uslovima, koncentracija ^{90}Sr u biljnoj kulturi može se odrediti pomoću jednačine:

$$[^{90}\text{Sr}]_{\text{biljka}} = \frac{k \times [^{90}\text{Sr}^{2+}]_{\text{sr}}}{[\text{Ca}^{2+}]_{\text{sr}}} \quad (3.16)$$

gde je:

k - konstanta proporcionalnosti između količine ^{90}Sr preuzete od strane biljke i njegove količine u izmenjivačkom kompleksu korenovog sistema; karakteriše tendenciju biljke za usvajanjem ^{90}Sr

$[^{90}\text{Sr}^{2+}]_{\text{zr}}$ - koncentracija aktivnosti ^{90}Sr u zemljišnom rastvoru (Bq L^{-1})

$[\text{Ca}^{2+}]_{\text{zr}}$ - koncentracija kalcijumovih jona u istom medijumu (cmol L^{-1}).

Zadržavanje i distribucija ^{90}Sr u čvrstoj fazi zemljišta se može opisati izrazima karakterističnim za njegov makro-analog Ca^{2+} , što omogućava određivanje odnosa $[^{90}\text{Sr}^{2+}]_{\text{zr}} / [\text{Ca}^{2+}]_{\text{zr}}$ preko ravnotežne jonske izmene:

$$\frac{[^{90}\text{Sr}^{2+}]_{\text{ex}}}{[^{90}\text{Sr}^{2+}]_{\text{zr}}} = K_c \left(^{90}\text{Sr}^{2+} / \text{Ca}^{2+} \right) \times \frac{[\text{Ca}^{2+}]_{\text{ex}}}{[\text{Ca}^{2+}]_{\text{zr}}} \quad (3.17)$$

gde je:

$[^{90}\text{Sr}^{2+}]_{\text{ex}}$ - koncentracija aktivnosti izmenjivog ^{90}Sr u čvrstoj fazi zemljišta (Bq kg^{-1})

$[\text{Ca}^{2+}]_{\text{ex}}$ - odgovarajuća koncentracija izmenjivog jona kalcijuma u istom medijumu (cmol kg^{-1})

$K_c (^{90}\text{Sr}^{2+} / \text{Ca}^{2+})$ - faktor selektivnosti izmene za katjonski par Sr / Ca u čvrstoj fazi zemljišta.

Kombinacijom dve prethodne jednačine dobija se:

$$[^{90}\text{Sr}]_{\text{biljka}} = \frac{k \times [^{90}\text{Sr}^{2+}]_{\text{ex}}}{K_c \left(^{90}\text{Sr}^{2+} / \text{Ca}^{2+} \right) \times [\text{Ca}^{2+}]_{\text{ex}}} \quad (3.18)$$

Koncentracija aktivnosti izmenjivog ^{90}Sr u zemljištu je proporcionalna ukupnoj koncentraciji aktivnosti ^{90}Sr :

$$[^{90}\text{Sr}^{2+}]_{\text{ex}} = \alpha_{\text{ex}} \times [^{90}\text{Sr}] \quad (3.19)$$

gde je:

α_{ex} - frakcija izmenjivog ^{90}Sr u zemljištu (%)

$[^{90}\text{Sr}]$ - koncentracija aktivnosti ^{90}Sr u čvrstoj fazi zemljišta (Bq kg^{-1}).

Zamenom jednačine (3.19) u jednačinu (3.18) dobija se jednačina:

$$[^{90}\text{Sr}]_{\text{biljka}} = \frac{k \times \alpha_{\text{ex}} \times [^{90}\text{Sr}]}{K_c \left(^{90}\text{Sr}^{2+} / \text{Ca}^{2+} \right) \times [\text{Ca}^{2+}]_{\text{ex}}} \quad (3.20)$$

koja omogućava predviđanje stepena kontaminacije biljnih kultura radionuklidom ^{90}Sr u odnosu na različit nivo stepena kontaminacije zemljišta ovim radionuklidom. Koncentraciju izmenjivog kalcijuma moguće je dobiti pomoću relacije (3.21):

$$[Ca^{2+}]_{ex} = \beta \times CEC \quad (3.21)$$

gde je:

CEC - ukupan kapacitet katjonske izmene (cmol kg^{-1})

β - stepen popunjenosti mesta za katjonsku izmenu kalcijumom.

Pošto je kalcijum dominantni jon u zemljištu, koeficijent β se može aproksimirati jedinicom. Na kraju dobijamo izraz za transfer faktor ^{90}Sr zemljište / biljka:

$$TF = \frac{[^{90}\text{Sr}]_{biljka}}{[^{90}\text{Sr}]} = \frac{k \times \alpha_{ex}}{K_c (^{90}\text{Sr}^{2+} / Ca^{2+}) \times CEC} \quad (3.22)$$

Vrednosti za parametre α_{ex} , $K_c (^{90}\text{Sr}^{2+} / Ca^{2+})$ i CEC za zemljište su dostupni u literaturi. Od eksperimentalnih podataka, kao ulaznih parametara, model zahteva poznavanje odnosa specifičnih aktivnosti ^{90}Sr u nadzemnom delu biljke i korenovom sistemu.

4. REZULTATI I DISKUSIJA

4.1. Rezultati validacije radiohemijske analitičke metode

Validacija nestandardne radiohemijske analitičke metode za određivanje aktivnosti ^{90}Sr u uzorcima iz životne sredine, a koja je primenjena za uzorke obuhvaćene ovom doktorskom disertacijom, publikovana je u studiji [86]. Osnovni parametri validacije metode su određeni korišćenjem uzoraka zemljišta, biljnih kultura i destilovane vode, bez i sa dodatkom sertifikovanog standardnog rastvora ^{90}Sr (№ 3128/34 427), koji ima sledljivost do Laboratorije za metrologiju jonizujućeg zračenja iz Francuske (LMRI, od fra. *Laboratoire de Métrologie des rayonnements Ionisants*), kao i upotrebom IAEA referentnih materijala: matriksa zemljišta i spanaća [124,125].

4.1.1. Evaluacija analitičkih parametara validacije

Obzirom da je metoda za određivanje aktivnosti ^{90}Sr u uzorcima primenjena u ovoj disertaciji modifikacija standardne metode, za njenu validaciju bilo je dovoljno odrediti tri analitička parametra: granicu detekcije, tačnost i preciznost.

Granica detekcije je određena na osnovu više pojedinačnih uzoraka vode, zemljišta, kao i biljnih kultura iz životne sredine, sa niskom aktivnosti ^{90}Sr , blizu očekivane donje granice. Na osnovu dobijenih vrednosti, izračunate su minimalne detektovane aktivnosti (MDA), kao srednje vrednosti tri serije merenja za svaki od 6 detektora-brojača (tabela 4.1).

Tabela 4.1. Izračunate vrednosti minimalnih detektovanih aktivnosti ^{90}Sr , za 6 mernih pozicija gasnog proporcionalnog brojača *Thermo Eberline FHT 770 T*

Merna pozicija	MDA (Bq L^{-1} ili Bq kg^{-1})		
	Voda	Zemljište	Biljna kultura
1	0,004	0,23	0,15
2	0,002	0,21	0,13
3	0,004	0,25	0,12
4	0,004	0,22	0,25
5	0,005	0,25	0,33
6	0,006	0,21	0,31

Na osnovu podataka iz tabele 4.1, za granicu detekcije metode je uzeta najniža vrednost minimalne detektovane aktivnosti i ona za uzorke voda iznosi $0,002 \text{ Bq L}^{-1}$, za uzorke zemljišta $0,21 \text{ Bq kg}^{-1}$ i za uzorke biljnih kultura $0,12 \text{ Bq kg}^{-1}$.

Tačnost je određena na osnovu uzoraka destilovane vode u koje su dodate različite zapremine (u prva dva uzorka po $10 \mu\text{L}$, a u treći $20 \mu\text{L}$) sertifikovanog standardnog rastvora ^{90}Sr , poznate aktivnosti ($4,129 \times 10^5 \text{ Bq g}^{-1}$ na dan 21.01.1985.), kao i upotrebom IAEA referentnih materijala zemljišta i spanaća, sa preporučenim vrednostima specifičnih aktivnosti ^{90}Sr . Rezultati određivanja tačnosti su prikazani u tabelama 4.2 i 4.3, kao srednje vrednosti tri serije merenja.

Tabela 4.2. Referentne (sertifikovane) aktivnosti, A i eksperimentalno dobijene vrednosti aktivnosti ^{90}Sr , A_{eksp} u uzorcima voda

Oznaka uzorka	$A \pm 1\sigma$ (Bq)	$A_{\text{eksp}} \pm 2\sigma$ (Bq)	A_{eksp} / A
1	$11,1 \pm 0,3$	$11,3 \pm 0,6$	1,02
2	$11,1 \pm 0,3$	$10,3 \pm 0,5$	0,93
3	$22,2 \pm 0,7$	$20,8 \pm 1,1$	0,94

Tabela 4.3. Preporučene, A i eksperimentalne vrednosti, A_{eksp} specifične aktivnosti ^{90}Sr u uzorcima zemljišta (IAEA-326) i spanaća (IAEA-330)

Oznaka uzorka	$A \pm 1\sigma$ (Bq kg^{-1})	$A_{\text{eksp}} \pm 2\sigma$ (Bq kg^{-1})	A_{eksp} / A
IAEA-326	$10,2 \pm 0,5$	$9,2 \pm 1,2$	0,90
IAEA-330	$20,1 \pm 2,1$	$19,4 \pm 2,1$	0,97

Na osnovu poređenja rezultata dobijenih eksperimentalnim putem u laboratoriji, sa poznatim izračunatim vrednostima aktivnosti dodatog sertifikovanog standardnog rastvora ili preporučenim vrednostima specifične aktivnosti od strane IAEA, izračunata je tačnost metode, kao odnos eksperimentalno dobijene i sertifikovane, odnosno preporučene aktivnosti, izražen u procentima. Tačnost metode, izražena kao prinos metode, iznosi: 96 % za uzorke voda, 90 % za uzorke zemljišta i 97 % za uzorke biljnih kultura.

Takođe, na osnovu podataka datih u tabelama 4.2 i 4.3, može se zaključiti da su dobijena dobra slaganja između sertifikovanih ili preporučenih i eksperimentalno određenih vrednosti, koja su u granicama merne nesigurnosti.

Preciznost je određena na osnovu merne nesigurnosti, za čije izračunavanje su korišćeni podaci o standardnoj devijaciji: brojanja impulsa osnovnog zračenja, brojanja impulsa uzorka i efikasnosti brojača (kalibracioni podatak). Postupak izračunavanja merne nesigurnosti određivanja specifične aktivnosti ^{90}Sr , naveden je u prethodnom poglavlju.

Na osnovu prikazanih rezultata, izračunata je merna nesigurnost određivanja specifične aktivnosti ^{90}Sr za ispitivane uzorke. Dakle, preciznost metode, izražena kao merna nesigurnost, za uzorke voda iznosi 5 %, dok za uzorke zemljišta i biljnih kultura iznosi 13 i 11 %, redom, na nivou poverenja 95%.

Rezultati validacije radiohemijske analitičke metode su pokazali da su dobijene vrednosti za ispitivane analitičke parametre, prihvatljive u slučaju pomenute metode, odnosno da su zadovoljeni kriterijumi ocene ovih parametara. Takođe, dobijeni rezultati su potvrdili da se validovana radiohemijska analitička metoda može koristiti za određivanje aktivnosti ^{90}Sr u uzorcima iz životne sredine.

4.2. Specifična aktivnost ^{90}Sr u poljoprivrednom zemljištu

Distribucija radionuklida ^{90}Sr u poljoprivrednom zemljištu je praćena u periodu od tri godine, počevši od maja 2013. zaključno sa decembrom 2015., na oglednim poljima „Radmilovac” i „Rimski Šančevi”. Prikazani rezultati merenja, korigovani na datum uzorkovanja, izraženi su kao specifična aktivnost ^{90}Sr sa odgovarajućom mernom nesigurnošću i dati su u Bq kg^{-1} suve materije.

4.2.1. Ogledno polje „Radmilovac”

Rezultati određivanja specifične aktivnosti radionuklida ^{90}Sr , u uzorcima poljoprivrednog zemljišta sakupljenim na 6 lokacija oglednog polja Radmilovac, koji su uzorkovani u dva sloja (0-15 cm i 15-30 cm) u proleće/leto (sezona I) i jesen (sezona II) tokom godina ispitivanja, prikazani su u tabelama 4.4 - 4.6.

Tabela 4.4. Specifične aktivnosti ^{90}Sr u uzorcima zemljišta na lokalitetu Radmilovac u dve sezone uzorkovanja tokom 2013.

Oznaka lokacije	Dubina zemljišta (cm)	$A_{\text{Sr-90}}$ (Bq kg^{-1})	
		Sezona I	Sezona II
R1	0-15	$2,98 \pm 0,59$	$2,46 \pm 0,42$
	15-30	$3,11 \pm 0,65$	$2,61 \pm 0,56$
R2	0-15	$2,68 \pm 0,54$	$2,21 \pm 0,44$
	15-30	$3,12 \pm 0,65$	$2,54 \pm 0,51$
R3	0-15	$2,49 \pm 0,51$	$1,93 \pm 0,39$
	15-30	$3,35 \pm 0,67$	$2,38 \pm 0,48$
R4	0-15	$3,74 \pm 0,73$	$2,78 \pm 0,51$
	15-30	$3,36 \pm 0,56$	$2,65 \pm 0,35$
R5	0-15	$3,63 \pm 0,76$	$2,83 \pm 0,58$
	15-30	$3,41 \pm 0,71$	$2,61 \pm 0,56$
R6	0-15	$3,51 \pm 0,71$	$2,93 \pm 0,61$
	15-30	$3,36 \pm 0,69$	$2,61 \pm 0,51$

Tabela 4.5. Specifične aktivnosti ^{90}Sr u uzorcima zemljišta na lokalitetu Radmilovac u dve sezone uzorkovanja tokom 2014.

Oznaka lokacije	Dubina zemljišta (cm)	$A_{\text{Sr-90}}$ (Bq kg^{-1})	
		Sezona I	Sezona II
R1	0-15	$3,16 \pm 0,62$	$2,27 \pm 0,49$
	15-30	$2,64 \pm 0,55$	$2,54 \pm 0,52$
R2	0-15	$2,67 \pm 0,56$	$2,47 \pm 0,48$
	15-30	$2,57 \pm 0,52$	$2,28 \pm 0,44$
R3	0-15	$2,73 \pm 0,56$	$2,43 \pm 0,26$
	15-30	$2,56 \pm 0,53$	$2,23 \pm 0,41$
R4	0-15	$2,48 \pm 0,47$	$2,41 \pm 0,51$
	15-30	$2,32 \pm 0,45$	$2,02 \pm 0,43$
R5	0-15	$3,14 \pm 0,64$	$2,51 \pm 0,54$
	15-30	$3,37 \pm 0,66$	$2,78 \pm 0,58$
R6	0-15	$2,75 \pm 0,58$	$2,29 \pm 0,44$
	15-30	$2,91 \pm 0,59$	$2,41 \pm 0,48$

Tabela 4.6. Specifične aktivnosti ^{90}Sr u uzorcima zemljišta na lokalitetu Radmilovac u dve sezone uzorkovanja tokom 2015.

Oznaka lokacije	Dubina zemljišta (cm)	$A_{\text{Sr-90}}$ (Bq kg^{-1})	
		Sezona I	Sezona II
R1	0-15	$1,81 \pm 0,37$	$1,70 \pm 0,33$
	15-30	$2,32 \pm 0,44$	$2,18 \pm 0,42$
R2	0-15	$2,19 \pm 0,45$	$1,73 \pm 0,32$
	15-30	$1,42 \pm 0,35$	$1,26 \pm 0,23$
R3	0-15	$1,97 \pm 0,41$	$1,42 \pm 0,27$
	15-30	$1,85 \pm 0,37$	$1,28 \pm 0,24$
R4	0-15	$1,92 \pm 0,35$	$1,61 \pm 0,31$
	15-30	$1,77 \pm 0,34$	$1,13 \pm 0,19$
R5	0-15	$2,36 \pm 0,48$	$1,72 \pm 0,33$
	15-30	$1,56 \pm 0,33$	$1,18 \pm 0,22$
R6	0-15	$2,09 \pm 0,42$	$1,47 \pm 0,29$
	15-30	$1,77 \pm 0,37$	$0,99 \pm 0,18$

Na osnovu vrednosti specifičnih aktivnosti ^{90}Sr za prvu godinu ispitivanja na oglednom polju Radmilovac (tabela 4.4), uočava se da su na lokacijama R1-3 (organska proizvodnja) vrednosti bile više za dublji sloj zemljišta, dok su na lokacijama R4-6 (sistem održive poljoprivrede) one bile više u prvom sloju zemljišta. Ova raspodela je uniformna za obe sezone uzorkovanja u toku 2013. godine. Osim toga, u prvoj sezoni uzorkovanja su dobijene niže vrednosti na lokacijama kontrolnih tretmana (R3 i R6) bez primene đubrenja.

U toku druge godine ispitivanja (tabela 4.5), u obe sezone uzorkovanja na lokacijama R2-4, vrednosti specifičnih aktivnosti ^{90}Sr su bile veće u prvom sloju zemljišta, dok su na lokacijama R5 i R6, bile veće u dubljem sloju. Na lokaciji R1, u letnjoj sezoni je aktivnost bila veća u površinskom sloju, a u jesenjoj u dubljem sloju zemljišta.

U toku treće godine ispitivanja (tabela 4.6), na svim lokacijama je postojala uniformna raspodela aktivnosti ^{90}Sr u zemljištu, tako što je veća aktivnost bila u prvom sloju, osim na lokaciji R1, gde je i u prolećnoj i u zimskoj sezoni, veća aktivnost bila na većoj dubini zemljišta.

Samo u prvoj godini ispitivanja primećeno je značajnije odstupanje vrednosti aktivnosti ^{90}Sr u zemljištu kontrolnih varijanti (bez đubrenja) oba sistema poljoprivredne proizvodnje. Stoga se ne može doneti zaključak da li se radi o mogućem

uticaju tipa i doziranja đubrenja na distribuciju aktivnosti ^{90}Sr u ispitivanom zemljištu. Prisutna nehomogenost u distribuciji radionuklida ^{90}Sr u poljoprivrednom zemljištu oglednog polja Radmilovac, najverovatnije je posledica sistema obrade zemljišta, prilikom koje može doći do godišnjih mešanja (rotiranja) slojeva zemljišta.

Vrednosti specifičnih aktivnosti ^{90}Sr u uzorcima zemljišta oglednog polja Radmilovac, u slojevima 0-15 i 15-30 cm (tabele 4.4 - 4.6), analizirane su deskriptivnom statistikom. Deskriptivna statistika (tabela 4.7) je data za pojedinačne godine ispitivanja i obuhvata: minimalnu i maksimalnu vrednost, opseg⁶, srednju vrednost, mernu nesigurnost, medijanu⁷, koeficijent asimetrije i koeficijent zaobljenosti⁸.

Tabela 4.7. Deskriptivna statistika specifične aktivnosti ^{90}Sr u zemljištu oglednog polja Radmilovac (sloj 1 - dubina 0-15 cm, sloj 2 - dubina 15-30 cm)

Parametar	Sloj (cm)	$A_{\text{Sr-90}}$ (Bq kg ⁻¹)		
		2013.	2014.	2015.
Minimalna vrednost	1	1,93	2,27	1,42
	2	2,38	2,02	0,99
Maksimalna vrednost	1	3,74	3,16	2,36
	2	3,41	3,37	2,32
Opseg	1	1,81	0,89	0,94
	2	1,03	1,35	1,33
Srednja vrednost	1	2,85	2,61	1,83
	2	2,95	2,55	1,56
Standardna devijacija	1	0,56	0,30	0,28
	2	0,39	0,36	0,42
Medijana	1	2,80	2,50	1,77
	2	2,88	2,55	1,49
Koeficijent asimetrije	1	-0,61	0,10	-0,48
	2	-1,97	1,53	-0,77
Koeficijent zaobljenosti	1	0,22	0,98	0,37
	2	0,06	0,93	0,51

⁶Razlika između maksimalne i minimalne vrednosti.

⁷Vrednost promenljive koja deli skup u kome su podaci uređeni po veličini, na dva jednaka dela.

⁸Ovi koeficijenti ukazuju na veličinu odstupanja od normalne raspodele.

Iz podataka tabele 4.7, vidi se da je minimalna vrednost specifične aktivnosti ^{90}Sr u zemljištu oglednog polja Radmilovac iznosila $0,99 \text{ Bq kg}^{-1}$, a maksimalna $3,74 \text{ Bq kg}^{-1}$.

Na osnovu podataka prikazanih u tabelama 4.4 - 4.6, može se zaključiti da nema značajnih varijacija u vrednostima specifičnih aktivnosti ^{90}Sr u ispitivanom zemljištu i da se sve vrednosti preklapaju u okviru granice merne nesigurnosti. Pored toga, uočen je trend opadanja srednje aktivnosti ovog radionuklida u zemljištu lokaliteta Radmilovac tokom godina ispitivanja. Ovo bi moglo biti posledica kontinuiranog usvajanja ^{90}Sr od strane biljnih kultura.

4.2.2. Ogledno polje „Rimski Šančevi”

Rezultati određivanja specifične aktivnosti radionuklida ^{90}Sr , u uzorcima poljoprivrednog zemljišta sakupljenim na oglednom polju Rimski Šančevi, koji su uzorkovani u dva sloja (0-15 cm i 15-30 cm) u proleće/leto i jesen tokom godina ispitivanja, prikazani su u tabelama 4.8 - 4.10.

U toku 2013. godine, u zemljištu oglednog polja Rimski Šančevi, vrednosti specifične aktivnosti ^{90}Sr prikazane u tabeli 4.8, su bile više u površinskom sloju zemljišta gotovo na svim lokacijama, osim na parcelama sa monokulturom pšenice (NS1) i kukuruza (NS2). Na tropolju đubrenom stajnjakom (NS8) i azotom (NS10), aktivnosti ^{90}Sr su u prvoj sezoni bile veće na većoj dubini, dok su u drugoj sezoni bile veće u prvom sloju zemljišta, što je verovatno posledica rotiranja zemljišta prilikom obrade na ovim lokacijama.

Tabela 4.8. Specifične aktivnosti ^{90}Sr u uzorcima zemljišta na lokalitetu Rimski Šančevi u dve sezone uzorkovanja tokom 2013.

Oznaka lokacije	Dubina zemljišta (cm)	$A_{\text{Sr-90}}$ (Bq kg^{-1})	
		Sezona I	Sezona II
NS1	0-15	$2,25 \pm 0,45$	$1,74 \pm 0,33$
	15-30	$2,79 \pm 0,55$	$2,47 \pm 0,49$
NS2	0-15	$2,13 \pm 0,41$	$1,84 \pm 0,36$
	15-30	$2,34 \pm 0,45$	$1,99 \pm 0,39$
NS3	0-15	$2,56 \pm 0,53$	$2,08 \pm 0,38$
	15-30	$2,23 \pm 0,43$	$1,99 \pm 0,39$
NS4	0-15	$3,17 \pm 0,61$	$2,81 \pm 0,55$
	15-30	$2,98 \pm 0,53$	$2,62 \pm 0,52$
NS5	0-15	$2,83 \pm 0,54$	$2,35 \pm 0,45$
	15-30	$2,65 \pm 0,53$	$2,19 \pm 0,43$
NS6	0-15	$3,01 \pm 0,59$	$2,81 \pm 0,56$
	15-30	$2,87 \pm 0,63$	$2,41 \pm 0,48$
NS7	0-15	$2,45 \pm 0,49$	$2,01 \pm 0,39$
	15-30	$2,21 \pm 0,42$	$1,81 \pm 0,35$
NS8	0-15	$2,32 \pm 0,44$	$2,17 \pm 0,42$
	15-30	$2,41 \pm 0,47$	$1,96 \pm 0,38$
NS9	0-15	$2,69 \pm 0,54$	$2,41 \pm 0,45$
	15-30	$2,48 \pm 0,48$	$2,19 \pm 0,41$
NS10	0-15	$2,29 \pm 0,43$	$2,06 \pm 0,39$
	15-30	$2,71 \pm 0,53$	$1,92 \pm 0,37$

Iz tabele 4.9 se vidi da je tokom 2014. godine, trend nižih vrednosti specifične aktivnosti ^{90}Sr na većoj dubini zadržan na istim lokacijama (NS3-6 i NS9), dok je na lokacijama NS7, NS8 i NS10 obrnuta situacija. Na parcelama sa monokulturom pšenice i kukuruza (NS1 i NS2) u prvoj sezoni trend je zadržan, ali je u drugoj sezoni veća aktivnost bila u prvom sloju zemljišta.

Tabela 4.9. Specifične aktivnosti ^{90}Sr u uzorcima zemljišta na lokalitetu Rimski Šančevi u dve sezone uzorkovanja tokom 2014.

Oznaka lokacije	Dubina zemljišta (cm)	$A_{\text{Sr-90}}$ (Bq kg^{-1})	
		Sezona I	Sezona II
NS1	0-15	$1,88 \pm 0,38$	$1,87 \pm 0,33$
	15-30	$1,97 \pm 0,39$	$1,71 \pm 0,31$
NS2	0-15	$1,55 \pm 0,32$	$1,37 \pm 0,25$
	15-30	$1,61 \pm 0,31$	$1,22 \pm 0,23$
NS3	0-15	$1,78 \pm 0,39$	$1,56 \pm 0,22$
	15-30	$1,66 \pm 0,32$	$1,45 \pm 0,22$
NS4	0-15	$2,72 \pm 0,53$	$2,42 \pm 0,44$
	15-30	$2,59 \pm 0,49$	$2,31 \pm 0,42$
NS5	0-15	$1,99 \pm 0,39$	$1,56 \pm 0,25$
	15-30	$1,84 \pm 0,36$	$1,21 \pm 0,23$
NS6	0-15	$2,45 \pm 0,47$	$2,28 \pm 0,42$
	15-30	$2,03 \pm 0,39$	$1,91 \pm 0,37$
NS7	0-15	$1,64 \pm 0,33$	$1,46 \pm 0,28$
	15-30	$1,87 \pm 0,36$	$1,68 \pm 0,33$
NS8	0-15	$1,87 \pm 0,37$	$1,59 \pm 0,28$
	15-30	$1,92 \pm 0,39$	$1,63 \pm 0,24$
NS9	0-15	$2,25 \pm 0,43$	$2,11 \pm 0,41$
	15-30	$2,04 \pm 0,41$	$1,92 \pm 0,38$
NS10	0-15	$1,42 \pm 0,27$	$1,11 \pm 0,19$
	15-30	$1,34 \pm 0,26$	$1,21 \pm 0,22$

Na osnovu podataka prikazanih u tabeli 4.10, može se videti da je u 2015. godini na svim ispitivanim lokacijama aktivnost ^{90}Sr bila veća u prvom sloju zemljišta (0-15 cm), osim na lokacijama NS7 i NS8 u prvoj sezoni uzorkovanja.

U toku sve tri godine određivanja aktivnosti ^{90}Sr u zemljištu oglednog polja Rimski Šančevi, primećuje se da su nešto više vrednosti aktivnosti na neđubrenom dvopolju, odnosno tropolju, u odnosu na varijante sa đubrenjem. Razlog tome bi mogao biti da neđubreno zemljište ima manji kapacitet za vezivanje stroncijuma u rastvorljive komplekse, što za posledicu ima zaostajanje ^{90}Sr u oraničnom horizontu.

Tabela 4.10. Specifične aktivnosti ^{90}Sr u uzorcima zemljišta na lokalitetu Rimski Šančevi u dve sezone uzorkovanja tokom 2015.

Oznaka lokacije	Dubina zemljišta (cm)	$A_{\text{Sr-90}}$ (Bq kg^{-1})	
		Sezona I	Sezona II
NS1	0-15	$1,72 \pm 0,33$	$1,39 \pm 0,28$
	15-30	$1,21 \pm 0,23$	$0,97 \pm 0,19$
NS2	0-15	$1,48 \pm 0,29$	$1,31 \pm 0,26$
	15-30	$1,26 \pm 0,26$	$1,05 \pm 0,21$
NS3	0-15	$1,64 \pm 0,32$	$1,34 \pm 0,26$
	15-30	$1,32 \pm 0,26$	$1,12 \pm 0,24$
NS4	0-15	$2,67 \pm 0,58$	$2,11 \pm 0,45$
	15-30	$2,23 \pm 0,44$	$1,89 \pm 0,42$
NS5	0-15	$1,67 \pm 0,32$	$1,46 \pm 0,31$
	15-30	$1,42 \pm 0,28$	$1,24 \pm 0,26$
NS6	0-15	$2,09 \pm 0,42$	$1,78 \pm 0,37$
	15-30	$1,51 \pm 0,31$	$1,32 \pm 0,25$
NS7	0-15	$1,54 \pm 0,32$	$1,31 \pm 0,26$
	15-30	$1,68 \pm 0,32$	$1,22 \pm 0,24$
NS8	0-15	$1,27 \pm 0,26$	$1,17 \pm 0,21$
	15-30	$1,39 \pm 0,28$	$1,02 \pm 0,21$
NS9	0-15	$1,98 \pm 0,41$	$1,68 \pm 0,34$
	15-30	$1,75 \pm 0,35$	$1,52 \pm 0,31$
NS10	0-15	$1,24 \pm 0,25$	$0,93 \pm 0,18$
	15-30	$0,94 \pm 0,19$	$0,85 \pm 0,17$

U tabeli 4.11 je prikazana deskriptivna statistika vrednosti specifične aktivnosti ^{90}Sr u zemljištu oglednog polja Rimski Šančevi, u slojevima 0-15 i 15-30 cm za tri godine ispitivanja. Iz podataka tabele 4.11 se vidi da je minimalna vrednost specifične aktivnosti ^{90}Sr u zemljištu oglednog polja Rimski Šančevi iznosila $0,93 \text{ Bq kg}^{-1}$ (oko 6 % niže nego na oglednom polju Radmilovac), a maksimalna $3,17 \text{ Bq kg}^{-1}$, što je oko 15 % niža vrednost nego na oglednom polju Radmilovac. Niže vrednosti aktivnosti ^{90}Sr u zemljištu oglednog polja Rimski Šančevi, ukazuju na to da je u ovom zemljištu nivo kontaminacije ovim radionuklidom manji, što bi se moglo objasniti različitim geohemijskim faktorima zemljišta i klimatskim pojavama, koji mogu da uslove razliku u kumulativnom depou ^{90}Sr u zemljištu i za faktor 10 u istom intervalu geografskih širina [37].

Tabela 4.11. Deskriptivna statistika vrednosti specifične aktivnosti ^{90}Sr u zemljištu oglednog polja Rimski Šančevi (sloj 1 - dubina 0-15 cm, sloj 2 - dubina 15-30 cm)

Parametar	Sloj (cm)	$A_{\text{Sr-90}}$ (Bq kg^{-1})		
		2013.	2014.	2015.
Minimalna vrednost	1	1,74	1,11	0,93
	2	1,81	1,21	0,85
Maksimalna vrednost	1	3,17	2,72	2,67
	2	2,98	2,59	2,23
Opseg	1	1,43	1,61	1,74
	2	1,17	1,38	1,38
Srednja vrednost	1	2,40	1,84	1,59
	2	2,36	1,76	1,34
Standardna devijacija	1	0,39	0,42	0,40
	2	0,34	0,36	0,34
Medijana	1	2,34	1,82	1,51
	2	2,38	1,78	1,29
Koeficijent asimetrije	1	-0,62	-0,49	1,52
	2	-0,91	0,17	0,87
Koeficijent zaobljenosti	1	0,30	0,41	1,00
	2	0,15	0,28	0,92

4.2.3. Neobradivo zemljište

Uz svaku seriju uzoraka za oba ogledna polja, ispitana je aktivnost ^{90}Sr i u kontrolnim uzorcima neobradivog zemljišta. Rezultati određivanja specifične aktivnosti radionuklida ^{90}Sr , u uzorcima neobradivog zemljišta sakupljenim na oglednim poljima „Radmilovac” i „Rimski Šančevi”, uzorkovanim u dva sloja (0-15 cm i 15-30 cm) tokom godina ispitivanja, prikazani su u tabeli 4.12.

Iz tabele 4.12 je evidentno da je ^{90}Sr u neobradivom zemljištu na oba lokaliteta migrirao u dublji sloj (15-30 cm). Migracija veštačkih radionuklida u zemljištu zavisi od mnogobrojnih faktora i ekoloških činilaca. Uzrok migracije ^{90}Sr u dublje slojeve zemljišta može biti slaba adsorpcija katjona ^{90}Sr na česticama tla i reverzibilne jonoizmenjivačke reakcije, koje su glavna karakteristika ovog radionuklida [126].

Tabela 4.12. Specifične aktivnosti ^{90}Sr u uzorcima neobradivog zemljišta

Ogledno polje	Dubina zemljišta (cm)	$A_{\text{Sr-90}}$ (Bq kg^{-1})		
		2013.	2014.	2015.
Radmilovac	0-15	$2,94 \pm 0,58$	$2,42 \pm 0,58$	$1,94 \pm 0,39$
	15-30	$2,26 \pm 0,45$	$2,18 \pm 0,44$	$1,17 \pm 0,23$
Rimski Šančevi	0-15	$2,05 \pm 0,39$	$1,78 \pm 0,34$	$1,38 \pm 0,28$
	15-30	$1,68 \pm 0,34$	$1,33 \pm 0,25$	$1,14 \pm 0,22$

Na osnovu ispitivanja obradivog i neobradivog zemljišta na oba lokaliteta, može se zaključiti da nema varijacija u vrednostima aktivnosti ^{90}Sr . Pored toga, kao i u obradivom, aktivnosti su niže i u neobradivom zemljištu na lokalitetu Rimski Šančevi. Takođe je evidentno da postoji trend smanjenja aktivnosti ovog radionuklida tokom godina ispitivanja, kako u obradivom, tako i u neobradivom zemljištu ispitivanih lokaliteta. Srednje vrednosti specifičnih aktivnosti ^{90}Sr u zemljištu prikazane u ovoj studiji su uporedive sa vrednostima dobijenim u studijama [19,20,113,119].

4.3. Specifična aktivnost ^{90}Sr u usevima

Distribucija radionuklida ^{90}Sr u usevima je praćena u periodu od maja 2013. do avgusta 2015. na ispitivanim oglednim poljima. Rezultati merenja su korigovani na datum uzorkovanja i izraženi kao specifična aktivnost ^{90}Sr , data u Bq kg^{-1} sveže materije sa odgovarajućom mernom nesigurnošću.

4.3.1. Ogledno polje „Radmilovac”

Rezultati određivanja specifične aktivnosti radionuklida ^{90}Sr , u uzorcima useva sakupljenim na oglednom polju Radmilovac, tokom godina ispitivanja su prikazani u tabeli 4.13. U uzorcima pšenice (2013. i 2015. godina), aktivnost ^{90}Sr je određena u korenu i ostatku biljke, dok je za uzorke kukuruza (2014. godina) aktivnost određena u pojedinačnim delovima biljke: korenu, stablu, listu i plodu.

Na osnovu podataka iz tabele 4.13, izračunate su srednje vrednosti specifičnih aktivnosti ^{90}Sr u korenu i ostatku pšenice, koje su iznosile $1,26 \text{ Bq kg}^{-1}$ sveže materije za koren i $0,39 \text{ Bq kg}^{-1}$ sveže materije za ostatak pšenice (stablo+list+plod). Ukoliko se

posmatraju vrednosti po godinama uzorkovanja, one su iznosile: 1,40 i 1,13 Bq kg⁻¹ za koren i 0,48 i 0,30 Bq kg⁻¹ za ostatak pšenice u 2013. i 2015. godini, redom. Iz ovih vrednosti sledi da je aktivnost u pšenici niža u drugoj godini uzorkovanja pšenice, što je u skladu sa trendom opadanja aktivnosti ⁹⁰Sr tokom godina ispitivanja u zemljištu. Ukoliko se pak posmatraju srednje vrednosti specifične aktivnosti ⁹⁰Sr u pšenici pri različitim tehnologijama poljoprivredne proizvodnje, u sistemu organske poljoprivrede, vrednosti su 1,53 Bq kg⁻¹ za koren i 0,47 Bq kg⁻¹ za ostatak, dok su u sistemu održive poljoprivrede 1,26 Bq kg⁻¹ za koren i 0,49 Bq kg⁻¹ za ostatak. Srednje vrednosti specifičnih aktivnosti ⁹⁰Sr u kukuruзу su bile sledeće: 1,36 Bq kg⁻¹ u korenu, 0,35 Bq kg⁻¹ u stablu, 0,64 Bq kg⁻¹ u listu i 0,30 Bq kg⁻¹ u plodu. U okviru organske proizvodnje, srednja aktivnost ⁹⁰Sr u korenu kukuruза je 1,21 Bq kg⁻¹, u stablu 0,31 Bq kg⁻¹, u listu 0,63 Bq kg⁻¹ i 0,27 Bq kg⁻¹ u plodu, dok su u sistemu održive poljoprivrede ove vrednosti bile nešto više: 1,51 Bq kg⁻¹ u korenu, 0,39 Bq kg⁻¹ u stablu, 0,65 Bq kg⁻¹ u listu i 0,32 Bq kg⁻¹ u plodu kukuruза.

Tabela 4.13. Specifične aktivnosti ⁹⁰Sr u pšenici i kukuruзу na oglednom polju Radmilovac u periodu 2013 - 2015.

Deo biljke	A _{Sr-90} (Bq kg ⁻¹)					
	Oznaka lokacije					
	R1	R2	R3	R4	R5	R6
Pšenica	2013.					
Koren	1,72±0,26	1,50±0,23	1,37±0,21	1,60±0,24	1,05±0,16	1,13±0,17
Ostatak	0,51±0,07	0,46±0,07	0,45±0,07	0,53±0,08	0,46±0,07	0,49±0,07
Kukuruz	2014.					
Koren	1,38±0,22	1,32±0,21	0,93±0,14	1,67±0,25	1,38±0,22	1,48±0,22
Stablo	0,36±0,05	0,29±0,04	0,27±0,04	0,44±0,06	0,34±0,05	0,38±0,06
List	0,68±0,11	0,64±0,09	0,58±0,08	0,80±0,12	0,54±0,07	0,60±0,09
Plod	0,30±0,04	0,27±0,04	0,25±0,04	0,35±0,05	0,29±0,04	0,31±0,04
Pšenica	2015.					
Koren	1,37±0,21	1,24±0,19	1,14±0,17	1,47±0,22	0,77±0,11	0,79±0,15
Ostatak	0,33±0,05	0,31±0,05	0,28±0,04	0,36±0,06	0,26±0,04	0,28±0,05

Na osnovu rezultata određivanja specifičnih aktivnosti u usevima na oglednom polju Radmilovac, prikazanih u tabeli 4.13, može se zaključiti da postoji određena raspodela specifične aktivnosti ⁹⁰Sr u usevima. U pšenici se najveći deo aktivnosti

zadržava u korenu, a znatno manji deo se translocira u ostatak biljke. U kukuruzu je takođe najveći deo aktivnosti zadržan u korenu, sa preraspodelom u pojedinim biljnim organima, i to sledećim redosledom: koren>list>stablo>plod.

4.3.2. Ogledno polje „Rimski Šančevi”

Rezultati određivanja specifične aktivnosti radionuklida ^{90}Sr , u uzorcima useva sakupljenim na oglednom polju Rimski Šančevi, tokom godina ispitivanja su prikazani u tabeli 4.14. U uzorcima pšenice i uljane repice, aktivnost ^{90}Sr je određena u korenu i ostatku biljke, dok je za uzorke kukuruza i soje, aktivnost određena u pojedinačnim biljnim organima: korenu, stablu, listu i plodu.

Na osnovu podataka iz tabele 4.14, izračunate su srednje vrednosti specifičnih aktivnosti ^{90}Sr , izražene na svežu materiju koje: u korenu i ostatku (stablo+list+plod) pšenice iznose $0,81 \text{ Bq kg}^{-1}$ i $0,35 \text{ Bq kg}^{-1}$; u korenu, stablu, listu i plodu kukuruza iznose $1,12 \text{ Bq kg}^{-1}$, $0,15 \text{ Bq kg}^{-1}$, $0,87 \text{ Bq kg}^{-1}$ i $< 0,08 \text{ Bq kg}^{-1}$, redom; u korenu, stablu, listu i plodu soje iznose $1,17 \text{ Bq kg}^{-1}$, $0,71 \text{ Bq kg}^{-1}$, $0,98 \text{ Bq kg}^{-1}$ i $0,29 \text{ Bq kg}^{-1}$, redom; u korenu i ostatku (stablo+list+plod) uljane repice iznose $0,49 \text{ Bq kg}^{-1}$ i $0,22 \text{ Bq kg}^{-1}$.

Na osnovu rezultata određivanja specifičnih aktivnosti u usevima na oglednom polju Rimski Šančevi, koji su prikazani u tabeli 4.14, može se zaključiti da i u ovim usevima postoji određena preraspodela specifične aktivnosti ^{90}Sr . U pšenici i uljanoj repici se najveći deo aktivnosti zadržava u korenu, a znatno manji deo se translocira u ostatak biljke. Takođe, pšenica usvaja više ^{90}Sr nego uljana repica. U kukuruzu i soji je takođe najveći deo aktivnosti ^{90}Sr zadržan u korenu, sa preraspodelom u pojedinim biljnim organima, i to sledećim redosledom: koren>list>stablo>plod, s tim što su aktivnosti u plodu kukuruza manje od minimalne detektabilne aktivnosti. Poređenjem aktivnosti ^{90}Sr u kukuruzu i soji, dolazi se do zaključka da je usvajanje ovog radionuklida veće kod soje nego kod kukuruza. To se može objasniti činjenicom da leguminoze, zbog specifičnog mehanizma usvajanja azota i obogaćivanja zemljišta nitratima obezbeđuju retenciju stroncijuma u zemljišnom rastvoru.

Ukoliko uporedimo specifične aktivnosti ^{90}Sr u istim usevima na oba ogledna polja, evidentno je da je put translokacije aktivnosti u biljnim organima isti, ali su

srednje vrednosti nešto više i u pšenici i u kukuruzu oglednog polja Radmilovac, gde su više i aktivnosti ovog radionuklida u zemljištu.

Tabela 4.14. Specifične aktivnosti ^{90}Sr u pšenici (*p*), uljanoj repici (*ur*), kukuruzu (*k*) i soji (*s*) na oglednom polju Rimski Šančevi u periodu 2013 - 2015.

		$A_{\text{Sr-90}} (\text{Bq kg}^{-1})$				
		Oznaka lokacije				
Godina	2013.					
Deo biljke	NS1 ^p	NS4 ^p	NS5 ^p	NS9 ^p	NS10 ^{ur}	
Koren	0,74 ± 0,11	0,96 ± 0,14	0,84 ± 0,12	0,93 ± 0,14	0,52 ± 0,08	
Ostatak	0,39 ± 0,06	0,45 ± 0,06	0,41 ± 0,06	0,43 ± 0,07	0,23 ± 0,03	
	NS2 ^k	NS3 ^s	NS6 ^s	NS7 ^s	NS8 ^s	
Koren	1,15 ± 0,18	1,24 ± 0,18	1,31 ± 0,21	1,03 ± 0,15	1,17 ± 0,18	
Stablo	0,21 ± 0,03	0,82 ± 0,12	0,64 ± 0,09	0,57 ± 0,09	0,72 ± 0,11	
List	0,95 ± 0,14	0,98 ± 0,14	1,17 ± 0,18	0,89 ± 0,13	0,93 ± 0,14	
Plod	< 0,14	0,27 ± 0,04	0,38 ± 0,06	0,31 ± 0,05	0,24 ± 0,04	
Godina	2014.					
Deo biljke	NS1 ^p	NS6 ^p	NS7 ^p	NS8 ^p	NS10 ^{ur}	
Koren	0,74 ± 0,11	0,79 ± 0,12	0,86 ± 0,13	0,81 ± 0,11	0,48 ± 0,07	
Ostatak	0,35 ± 0,05	0,36 ± 0,05	0,42 ± 0,06	0,37 ± 0,05	0,23 ± 0,03	
	NS2 ^k	NS3 ^s	NS4 ^k	NS5 ^k	NS9 ^s	
Koren	1,17 ± 0,18	1,20 ± 0,18	1,13 ± 0,17	1,07 ± 0,16	1,27 ± 0,19	
Stablo	0,19 ± 0,03	0,75 ± 0,11	0,19 ± 0,03	0,19 ± 0,03	0,66 ± 0,09	
List	0,82 ± 0,12	0,94 ± 0,14	0,81 ± 0,12	0,91 ± 0,14	1,12 ± 0,17	
Plod	< 0,10	0,22 ± 0,03	< 0,11	< 0,08	0,20 ± 0,03	
Godina	2015.					
Deo biljke	NS1 ^p	NS4 ^p	NS5 ^p	NS9 ^p	NS10 ^{ur}	
Koren	0,65 ± 0,09	0,88 ± 0,13	0,75 ± 0,11	0,81 ± 0,11	0,47 ± 0,07	
Ostatak	0,26 ± 0,04	0,32 ± 0,05	0,25 ± 0,04	0,21 ± 0,03	0,19 ± 0,03	
	NS2 ^k	NS3 ^s	NS6 ^k	NS7 ^k	NS8 ^k	
Koren	1,15 ± 0,17	0,95 ± 0,14	1,08 ± 0,16	1,18 ± 0,17	1,03 ± 0,15	
Stablo	0,13 ± 0,02	0,78 ± 0,12	0,06 ± 0,01	0,08 ± 0,01	0,14 ± 0,02	
List	1,07 ± 0,16	0,84 ± 0,13	0,83 ± 0,12	0,82 ± 0,12	0,78 ± 0,12	
Plod	< 0,11	0,41 ± 0,08	< 0,05	< 0,06	< 0,03	

4.4. Poređenje određivanja aktivnosti ^{90}Sr u uzorcima poljoprivrednog zemljišta i useva primenom različitih metoda

U okviru bilateralnih naučnih projekata (2016-2017.) između Republike Srbije i Republike Slovenije (№ 29, Ministarstvo za prosvetu, nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije (MPNTR)) i između Republike Srbije i Republike Hrvatske (№ 38, MPNTR), izvršeno je poređenje metoda za određivanje aktivnosti ^{90}Sr u uzorcima poljoprivrednog zemljišta i useva, koji su bili predmet ispitivanja u ovoj disertaciji. Pored primene validovane radiohemijske analitičke metode (Laboratorija za zaštitu od zračenja i zaštitu životne sredine Instituta za nuklearne nauke „Vinča” u Beogradu - *INNV*), određivanje specifične aktivnosti ^{90}Sr je izvršeno primenom još dve metode: klasične radiohemijske analitičke metode sa koncentrovanom (dimećom) HNO_3 (Departman za znanost o okolju Instituta „Jožef Stefan” u Ljubljani - *IJS*) i separacionom metodom na bazi jono-izmenjivačkih smola (Laboratorija za radioekologiju Instituta „Ruđer Bošković” u Zagrebu - *IRB*). Cilj primene tri različite metode je bio da se proveri međusobno slaganje rezultata merenja. Opis primenjenih metoda i načina merenja su prikazani u studiji Sarap i sar. [127].

Rezultati određivanja specifične aktivnosti ^{90}Sr u uzorcima poljoprivrednog zemljišta i useva primenom tri različite metode su prikazani u tabelama 4.15 i 4.16, pri čemu su rezultati za biljne kulture izraženi na svežu materiju. Prikazani rezultati merenja su dati sa odgovarajućom mernom nesigurnošću.

Rezultati određivanja specifičnih aktivnosti ^{90}Sr u zemljištu koji su prikazani u tabeli 4.15, pokazuju odlično međusobno slaganje primenom dve metode određivanja, ali i kada su primenjene sve tri metode. Takođe su i rezultati specifičnih aktivnosti ^{90}Sr u biljnom materijalu prikazani u tabeli 4.16, pokazali odlično međusobno slaganje u okviru prikazane merne nesigurnosti. Evaluacija rezultata metodološkog poređenja određivanja aktivnosti ^{90}Sr u ispitivanim uzorcima je zasnovana na upotrebi srednje vrednosti dobijenih rezultata kao referentne vrednosti i prikazana je u poglavlju 4.4.1.

Tabela 4.15. Poređenje rezultata određivanja specifične aktivnosti ^{90}Sr ($A_{\text{Sr-90}}$) u uzorcima zemljišta primenom različitih metoda

Oznaka uzorka	Dubina zemljišta (cm)	$A_{\text{Sr-90}}$ (Bq kg^{-1})		
		INNV	IJS	IRB
NS10 II sezona 2014.	0-15	$1,11 \pm 0,19$	$1,16 \pm 0,19$	$0,98 \pm 0,21$
	15-30	$1,21 \pm 0,22$	$1,25 \pm 0,22$	$1,24 \pm 0,25$
NS3 II sezona 2014.	0-15	$1,56 \pm 0,22$	$1,58 \pm 0,21$	/
	15-30	$1,45 \pm 0,22$	$1,47 \pm 0,21$	/
NS8 II sezona 2014.	0-15	$1,59 \pm 0,28$	$1,60 \pm 0,26$	/
	15-30	$1,63 \pm 0,24$	$1,65 \pm 0,22$	/
R6 I sezona 2015.	0-15	$2,09 \pm 0,42$	$2,11 \pm 0,26$	$1,86 \pm 0,29$
	15-30	$1,77 \pm 0,37$	$2,06 \pm 0,25$	$1,75 \pm 0,26$
NS1 I sezona 2015.	0-15	$1,72 \pm 0,33$	/	$1,75 \pm 0,35$
	15-30	$1,21 \pm 0,23$	/	$1,28 \pm 0,26$
NS9 I sezona 2015.	0-15	$1,98 \pm 0,41$	/	$1,66 \pm 0,33$
	15-30	$1,75 \pm 0,35$	/	$1,52 \pm 0,31$

Tabela 4.16. Poređenje rezultata određivanja specifične aktivnosti ^{90}Sr ($A_{\text{Sr-90}}$) u uzorcima useva primenom različitih metoda

Oznaka uzorka	Deo biljke	$A_{\text{Sr-90}}$ (Bq kg^{-1})		
		INNV	IJS	IRB
R6 Pšenica, 2015.	Koren	$0,79 \pm 0,15$	$0,81 \pm 0,23$	$0,76 \pm 0,17$
	Ostatak	$0,28 \pm 0,05$	$0,26 \pm 0,03$	$0,26 \pm 0,06$
NS1 Pšenica, 2015.	Koren	$0,65 \pm 0,09$	/	$0,61 \pm 0,11$
	Ostatak	$0,26 \pm 0,04$	/	$0,22 \pm 0,05$
NS3 Soja, 2015.	List	$0,84 \pm 0,13$	$0,82 \pm 0,14$	/
	Plod	$0,41 \pm 0,08$	$0,39 \pm 0,05$	/
NS5 Pšenica, 2015.	Koren	$0,75 \pm 0,11$	$0,70 \pm 0,13$	$0,71 \pm 0,13$
	Ostatak	$0,25 \pm 0,04$	$0,21 \pm 0,03$	$0,22 \pm 0,06$
NS8 Kukuruz, 2015.	List	$0,78 \pm 0,12$	$0,78 \pm 0,11$	/
	Plod	$< 0,03$	$< 0,04$	/
NS9 Pšenica, 2015.	Koren	$0,81 \pm 0,11$	/	$0,78 \pm 0,13$
	Ostatak	$0,21 \pm 0,03$	/	$0,17 \pm 0,04$

4.4.1. Evaluacija rezultata metodološkog poređenja

Evaluacija rezultata određivanja specifične aktivnosti ^{90}Sr u uzorcima zemljišta i biljnih kultura analiziranih primenom tri različite metode, izvršena je statističkom obradom rezultata merenja, pri čemu su izračunati parametri na osnovu kojih je ocenjeno poređenje rezultata merenja [128]. Rezultati merenja se transformišu u sledeće statističke veličine, radi njihove lakše interpretacije i merenja odstupanja pojedinačnih primenjenih metoda:

z-vrednost

Osnovna ideja *z-vrednosti* je da omogući poređenje rezultata dobijenih primenom pojedinačnih primenjenih metoda, bez obzira na princip koji se nalazi u osnovi merenja i prirodu predmeta ispitivanja. Izračunava se pomoću jednačine

$$z - \text{vrednost} = \frac{A_{lab} - A_{ref}}{u_{lab}} \quad (4.1)$$

gde je:

A_{lab} - rezultat dobijen određenom metodom

A_{ref} - referentna vrednost

u_{lab} - merna nesigurnost rezultata.

Predznak *z-vrednosti* ($-/+$) ukazuje na negativno ili pozitivno odstupanje u odnosu na referentnu vrednost. Ukoliko je:

- $|z\text{-vrednost}| \leq 2$, *z*-rezultati se smatraju prihvatljivim
- $|z\text{-vrednost}| \geq 3$, *z*-rezultati se smatraju neprihvatljivim
- $2 \leq |z\text{-vrednost}| \leq 3$, *z*-rezultati se smatraju diskutabilnim.

u-test

Vrednost parametra *u* predstavlja tačnost rezultata merenja i određuje se na osnovu jednačine

$$u = \frac{|A_{ref} - A_{lab}|}{\sqrt{u_{ref}^2 + u_{lab}^2}} \quad (4.2)$$

gde je:

A_{ref} , A_{lab} i u_{lab} - isto značenje kao u jednačini (4.1)

u_{ref} - merna nesigurnost referentne vrednosti.

Ukoliko je:

- u-vrednost $\leq 2,58$, rezultati se smatraju prihvatljivim
- u-vrednost $> 2,58$, rezultati se smatraju neprihvatljivim.

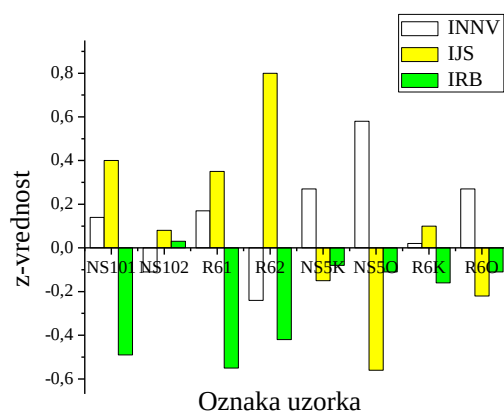
$bias_{rel}$ (relativni bias)

Relativno odstupanje između rezultata pojedinačnih metoda i referentne vrednosti naziva se procena *biasa*. Procena *relativnog biasa* određuje se pomoću jednačine (4.3):

$$bias_{rel} = \frac{A_{lab} - A_{ref}}{A_{ref}} \times 100\% \quad (4.3)$$

Na osnovu podataka u tabelama 4.15 i 4.16, izračunati su navedeni statistički parametri za uzorke u kojima je aktivnost ^{90}Sr određena primenom sve tri metode, kako bi se ustanovila tačnost određivanja primenom ovih metoda. Rezultati izračunavanja su prikazani grafički i to *z-vrednosti* na slici 4.1, *u-test* vrednosti na slici 4.2 i vrednosti $bias_{rel}$ na slici 4.3. Oznake uzoraka na graphicima odgovaraju oznakama u tabelama 4.15 i 4.16, sa dodatkom 1 i 2 za dubinu zemljišta 0-15 i 15-30 cm, redom, kao i K i O, koje označavaju koren i ostatak biljke na određenim lokacijama.

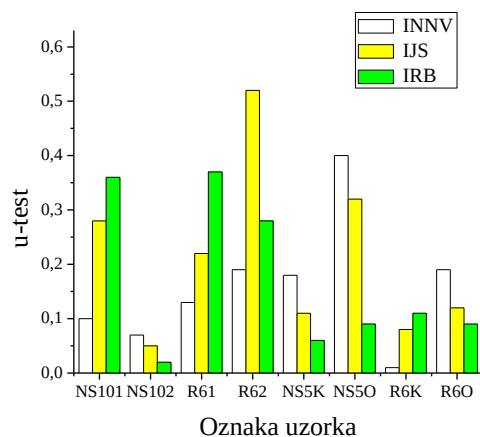
Izračunate vrednosti *z*-parametra (slika 4.1) su u intervalu od -0,56 do 0,80. Obzirom da su ove vrednosti niže od granične preporučene vrednosti koja iznosi 2, one ukazuju na to da su rezultati dobijeni primenom tri različite metode prihvatljivi.



Slika 4.1. Grafički prikaz *z*-vrednosti

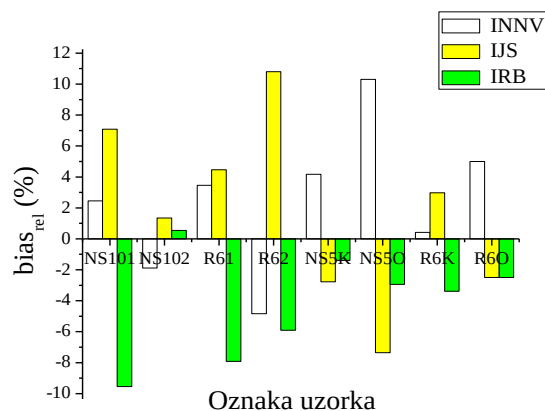
Izračunate vrednosti *u*-test parametra (slika 4.2) su u intervalu od 0,01 do 0,52. Obzirom da su ove vrednosti $< 2,58$, tj. niže od granične preporučene vrednosti, one

ukazuju na to da su rezultati dobijeni primenom tri različite metode prihvatljivi u pogledu tačnosti.



Slika 4.2. Grafički prikaz u-test vrednosti

Izračunate vrednosti bias_{rel} parametra (slika 4.3) su u intervalu od -9,54 % do 10,8 %. Vrednosti ovog parametra ukazuju na relativno odstupanje rezultata dobijenih pojedinačnim primenjenim metodama u odnosu na referentnu vrednost.



Slika 4.3. Grafički prikaz vrednosti bias_{rel}

Na osnovu izračunatih statističkih parametara, može se zaključiti da su rezultati za tačnost prihvatljivi za sve tri primenjene metode. Time je potvrđena visoka reproduktivnost rezultata određivanja specifične aktivnosti ^{90}Sr u ispitivanim

matriksima, kada se koriste različite metode, različiti spektrometri, a merenja vrše različiti ispitivači u različitim institucijama. Na osnovu navedenog sledi da se sve tri metode mogu primeniti na određenom nivou poverenja za određivanje aktivnosti ^{90}Sr u uzorcima zemljišta i biljnog materijala.

4.5. Koncentracije Sr i Ca u poljoprivrednom zemljištu

Distribucija koncentracija ukupnih Sr i Ca u poljoprivrednom zemljištu je praćena na oglednim poljima „Radmilovac” i „Rimski Šančevi” u periodu od 2013. do 2015. godine. Rezultati merenja koncentracija Sr i Ca su izraženi u mg kg^{-1} (ppm - od eng. *parts per million*) suve materije.

4.5.1. Ogledno polje „Radmilovac”

Rezultati određivanja koncentracija Sr i Ca, u uzorcima poljoprivrednog zemljišta sakupljenim na 6 lokacija oglednog polja Radmilovac, koji su uzorkovani u dva sloja (0-15 cm i 15-30 cm) u proleće/leto i jesen tokom godina ispitivanja, prikazani su u tabelama 4.17 - 4.19.

Tabela 4.17. Koncentracije Sr i Ca u uzorcima zemljišta na lokalitetu Radmilovac u dve sezone uzorkovanja tokom 2013.

Oznaka lokacije	Dubina zemljišta (cm)	[Sr] (mg kg^{-1})		[Ca] (mg kg^{-1})	
		Sezona I	Sezona II	Sezona I	Sezona II
R1	0-15	8,7	21,3	3772	4521
	15-30	9,6	14,4	3299	4496
R2	0-15	11,6	20,1	5345	7124
	15-30	14,7	14,6	4898	5678
R3	0-15	16,5	29,6	15574	18172
	15-30	17,4	22,3	12578	17269
R4	0-15	19,9	27,6	7591	10447
	15-30	14,8	16,6	9488	9739
R5	0-15	12,6	17,7	9824	4770
	15-30	13,2	11,9	8457	4692
R6	0-15	10,9	21,9	5623	7234
	15-30	11,7	15,9	6013	7210

Tabela 4.18. Koncentracije Sr i Ca u uzorcima zemljišta na lokalitetu Radmilovac u dve sezone uzorkovanja tokom 2014.

Oznaka lokacije	Dubina zemljišta (cm)	[Sr] (mg kg ⁻¹)		[Ca] (mg kg ⁻¹)	
		Sezona I	Sezona II	Sezona I	Sezona II
R1	0-15	20,1	14,4	17915	4948
	15-30	24,2	18,6	17540	5169
R2	0-15	18,2	23,8	6249	5070
	15-30	18,5	16,7	6288	4682
R3	0-15	28,6	19,9	10755	5314
	15-30	20,4	15,1	13522	5201
R4	0-15	17,8	15,8	7584	9844
	15-30	18,5	16,4	8503	10118
R5	0-15	25,5	17,3	7672	12600
	15-30	21,1	21,9	7027	11212
R6	0-15	17,0	18,6	5956	8760
	15-30	19,1	21,8	6243	9066

Tabela 4.19. Koncentracije Sr i Ca u uzorcima zemljišta na lokalitetu Radmilovac u dve sezone uzorkovanja tokom 2015.

Oznaka lokacije	Dubina zemljišta (cm)	[Sr] (mg kg ⁻¹)		[Ca] (mg kg ⁻¹)	
		Sezona I	Sezona II	Sezona I	Sezona II
R1	0-15	15,8	20,3	5729	6375
	15-30	17,9	18,1	5722	6039
R2	0-15	19,8	18,5	5566	8303
	15-30	15,5	17,6	4848	7247
R3	0-15	20,9	20,5	5687	7791
	15-30	14,8	19,8	5086	6713
R4	0-15	20,4	18,3	12824	8172
	15-30	17,4	29,6	12332	9182
R5	0-15	26,9	18,9	15667	8119
	15-30	18,4	32,4	14811	9454
R6	0-15	19,7	16,8	18668	8566
	15-30	20,0	17,0	20058	8728

U toku 2013. na osnovu vrednosti koncentracija Sr i Ca koje su prikazane u tabeli 4.17, može se videti da distribucija koncentracije Sr i Ca u zemljištu nije uniformna u prolećnoj sezoni uzorkovanja; na lokacijama na kojima je koncentracija Sr veća u drugom sloju zemljišta, koncentracija Ca je manja, i obrnuto. Za razliku od prolećne sezone, u jesenjoj sezoni je distribucija potpuno uniformna, sadržaj Sr prati Ca

i koncentracije oba elementa su veće u sloju zemljišta 0-15 cm dubine. U okviru sistema organske poljoprivrede, najniže koncentracije oba elementa su određene u zemljištu tretmana mikrobiološkim đubrivom, dok su u sistemu održive poljoprivrede na lokaciji kontrolnog tretmana. Prikazani rezultati ukazuju na veće koncentracije Sr i Ca u jesenjoj sezoni uzorkovanja.

U toku 2014. (tabela 4.18) u obe sezone uzorkovanja koncentracije Sr i Ca su bile uglavnom veće u drugom sloju zemljišta. Najniže vrednosti koncentracije u letnjoj sezoni su određene na lokaciji R6 (kontrolni tretman), dok su u jesenjoj na lokaciji tretmana mikrobiološkim đubrivom. U ovoj godini su koncentracije oba elementa bile niže u jesenjoj nego u letnjoj sezoni.

U toku 2015. (tabela 4.19) raspodela koncentracija po dubini zemljišta za oba ispitana elementa je imala isti trend. Koncentracije Sr su bile neznatno veće u jesenjoj sezoni, dok su koncentracije Ca bile veće u sistemu organske poljoprivrede, a u održivoj su bile znatno manje u jesenjoj sezoni, nego u prolećnoj. Na osnovu prikazanih rezultata (tabele 4.17 - 4.19) može se zaključiti da su koncentracije Sr i Ca u ispitivanom zemljištu stabilne i da ne postoje varijacije u sadržaju ovih elemenata.

U tabeli 4.20 je prikazana deskriptivna statistika vrednosti koncentracija Sr i Ca u zemljištu oglednog polja Radmilovac, u slojevima 0-15 i 15-30 cm za tri godine ispitivanja.

Minimalne vrednosti (tabela 4.20) koncentracija Sr i Ca u zemljištu oglednog polja Radmilovac iznose 8,7 i 3299 mg kg⁻¹, dok su maksimalne koncentracije 32,4 i 20058 mg kg⁻¹, redom. Takođe se može videti da ne postoje izražene razlike u vrednostima koncentracija ovih elemenata u zemljištu tokom godina ispitivanja, kao i da je Ca prisutan u 300 - 500 puta većoj koncentraciji od stroncijuma.

Tabela 4.20. Deskriptivna statistika vrednosti koncentracija Sr i Ca u zemljištu oglednog polja Radmilovac (sloj 1 - dubina 0-15 cm, sloj 2 - dubina 15-30 cm)

Parametar	Sloj (cm)	[Sr] (mg kg ⁻¹)			[Ca] (mg kg ⁻¹)		
		2013.	2014.	2015.	2013.	2014.	2015.
Minimalna vrednost	1	8,7	14,4	15,8	3772	4948	5566
	2	9,6	15,1	14,8	3299	4682	4848
Maksimalna vrednost	1	29,6	28,6	26,9	18172	17915	18668
	2	22,3	24,2	32,4	17269	17540	20058
Opseg	1	20,9	14,2	11,1	14400	12967	13102
	2	12,7	9,1	17,6	13970	12858	15210
Srednja vrednost	1	18,2	19,8	19,7	8333	8556	9289
	2	14,8	19,4	19,9	7818	8714	9185
Standardna devijacija	1	6,5	4,2	2,7	4507	3813	4216
	2	3,2	2,6	5,4	4009	3878	4547
Medijana	1	18,8	18,4	19,8	7179	7628	8146
	2	14,7	18,8	18,0	6612	7765	7988
Koeficijent asimetrije	1	-0,67	0,40	4,28	0,96	2,28	1,03
	2	1,94	-0,43	2,23	1,60	1,05	1,87
Koeficijent zaobljenosti	1	0,27	1,02	1,48	1,31	1,46	1,39
	2	0,84	0,16	1,77	1,29	1,18	1,45

4.5.2. Ogledno polje „Rimski Šančevi”

Rezultati određivanja koncentracija Sr i Ca, u uzorcima poljoprivrednog zemljišta sakupljenim na oglednom polju Rimski Šančevi, koji su uzorkovani u dva sloja (0-15 cm i 15-30 cm) u proleće/leto i jesen tokom godina ispitivanja, prikazani su u tabelama 4.21 - 4.23.

U toku 2013. godine, u zemljištu oglednog polja Rimski Šančevi, koncentracije Sr prikazane u tabeli 4.21, su uglavnom bile veće u sloju zemljišta 15-30 cm, osim na parcelama sa monokulturom pšenice (NS1) i neđubrenog tropolja (NS6). Koncentracije Ca su bile podjednako zastupljene u oba sloja zemljišta. U obe sezone, najveće koncentracije Sr su određene u zemljištu tretmana stajskim đubrivom (NS8), a kalcijuma na neđubrenom dvopolju (NS4). Evidentna je veća koncentracija Sr u zemljištu u jesenjoj sezoni, dok je za Ca bila veća na 7 od 10 lokacija. Ovo bi moglo biti posledica zaostajanja korena i prizemnog dela stabla useva, koji nakon mehaničke obrade zemljišta dospevaju u niže slojeve zemljišta.

Tabela 4.21. Koncentracije Sr i Ca u uzorcima zemljišta na lokalitetu Rimski Šančevi u dve sezone uzorkovanja tokom 2013.

Oznaka lokacije	Dubina zemljišta (cm)	[Sr] (mg kg ⁻¹)		[Ca] (mg kg ⁻¹)	
		Sezona I	Sezona II	Sezona I	Sezona II
NS1	0-15	13,7	22,9	8365	11061
	15-30	11,3	15,5	9042	8872
NS2	0-15	14,8	23,4	9875	10818
	15-30	15,3	25,8	8456	10338
NS3	0-15	15,6	32,7	12882	15656
	15-30	18,0	37,8	11204	14250
NS4	0-15	21,7	28,9	29619	27961
	15-30	22,8	31,2	31233	27992
NS5	0-15	12,1	16,6	7632	8570
	15-30	15,3	19,9	8334	8504
NS6	0-15	16,1	23,3	8370	6971
	15-30	13,2	17,7	7371	7156
NS7	0-15	16,5	35,6	10293	21204
	15-30	18,9	41,9	12016	21551
NS8	0-15	26,5	46,2	11755	26033
	15-30	33,3	47,1	14116	25836
NS9	0-15	14,4	25,6	17212	13256
	15-30	16,7	35,6	16173	14657
NS10	0-15	10,9	26,2	6534	11210
	15-30	14,8	31,8	6761	10585

Kao što se vidi iz tabele 4.22, u prvoj sezoni uzorkovanja 2014. godine, koncentracije Sr i Ca u zemljištu su uglavnom bile veće na većoj dubini, dok su u jesenjoj sezoni bile veće na toj dubini na svim lokacijama, osim na onoj na kojoj se uzgaja uljana repica (NS10). U odnosu na prethodnu godinu, koncentracije oba elementa su bile uvećane.

Tabela 4.22. Koncentracije Sr i Ca u uzorcima zemljišta na lokalitetu Rimski Šančevi u dve sezone uzorkovanja tokom 2014.

Oznaka lokacije	Dubina zemljišta (cm)	[Sr] (mg kg ⁻¹)		[Ca] (mg kg ⁻¹)	
		Sezona I	Sezona II	Sezona I	Sezona II
NS1	0-15	23,9	19,5	10711	10170
	15-30	22,0	25,4	11047	10355
NS2	0-15	21,7	20,4	7466	7288
	15-30	31,8	38,1	7881	8308
NS3	0-15	31,0	31,7	16532	19172
	15-30	53,9	39,9	34912	20230
NS4	0-15	41,8	41,3	31865	40684
	15-30	37,5	43,7	31819	43420
NS5	0-15	22,6	17,8	7502	8729
	15-30	21,9	22,5	7704	13845
NS6	0-15	17,6	20,3	7592	11230
	15-30	20,8	28,6	9362	11257
NS7	0-15	31,5	26,7	23173	14861
	15-30	33,9	28,2	24593	16600
NS8	0-15	35,1	44,2	19874	29338
	15-30	34,7	47,9	19564	30409
NS9	0-15	35,6	36,8	23568	36376
	15-30	40,4	42,5	24403	39716
NS10	0-15	54,6	32,1	42505	12860
	15-30	56,3	23,7	47187	12248

U trećoj godini uzorkovanja, u prvoj sezoni su koncentracije Sr i Ca uglavnom bile veće u prvom sloju zemljišta (tabela 4.23), dok je u drugoj sezoni situacija bila obrnuta. Vrednosti su bile slične kao i prethodne godine i neznatno veće u drugoj sezoni u odnosu na prvu sezonu uzorkovanja.

Tabela 4.23. Koncentracije Sr i Ca u uzorcima zemljišta na lokalitetu Rimski Šančevi u dve sezone uzorkovanja tokom 2015.

Oznaka lokacije	Dubina zemljišta (cm)	[Sr] (mg kg ⁻¹)		[Ca] (mg kg ⁻¹)	
		Sezona I	Sezona II	Sezona I	Sezona II
NS1	0-15	22,5	24,6	10841	16826
	15-30	24,7	12,6	11868	9138
NS2	0-15	23,8	23,3	17903	17368
	15-30	22,0	25,0	14852	17962
NS3	0-15	37,6	37,3	23881	29611
	15-30	35,2	36,3	27165	29039
NS4	0-15	46,9	56,9	44834	68518
	15-30	35,7	64,9	42337	75508
NS5	0-15	22,1	38,9	9948	44361
	15-30	24,2	41,7	11091	50657
NS6	0-15	22,6	32,2	12240	20511
	15-30	22,9	29,8	11066	21575
NS7	0-15	22,0	41,1	11475	31851
	15-30	20,8	41,6	10800	32163
NS8	0-15	54,3	54,3	50411	43048
	15-30	55,2	51,4	54182	45418
NS9	0-15	26,9	42,8	16748	49264
	15-30	28,5	51,4	19547	50219
NS10	0-15	26,4	18,9	11791	8819
	15-30	32,4	21,7	11058	8902

U tabeli 4.24 je prikazana deskriptivna statistika vrednosti koncentracija Sr i Ca u zemljištu oglednog polja Rimski Šančevi, u slojevima 0-15 i 15-30 cm za tri godine ispitivanja. Iz podataka tabele 4.24 se vidi da je minimalna vrednost koncentracije Sr u zemljištu oglednog polja Rimski Šančevi iznosila 10,9 mg kg⁻¹ (oko 25 % više nego na oglednom polju Radmilovac), a maksimalna 64,9 mg kg⁻¹, što je duplo veća vrednost nego na oglednom polju Radmilovac. Minimalna koncentracija Ca iznosi 6534 mg kg⁻¹, što je skoro duplo veća vrednost nego u zemljištu oglednog polja Radmilovac, a maksimalna 75508 mg kg⁻¹, što je skoro četverostruko veća vrednost nego u zemljištu oglednog polja Radmilovac. Ove vrednosti koncentracija Sr i Ca ukazuju na to da je zemljište oglednog polja Rimski Šančevi bogatije pomenutim elementima od zemljišta oglednog polja Radmilovac.

Tabela 4.24. Deskriptivna statistika vrednosti koncentracija Sr i Ca u zemljištu oglednog polja Rimski Šančevi (sloj 1 - dubina 0-15 cm, sloj 2 - dubina 15-30 cm)

Parametar	Sloj (cm)	[Sr] (mg kg ⁻¹)			[Ca] (mg kg ⁻¹)		
		2013.	2014.	2015.	2013.	2014.	2015.
Minimalna vrednost	1	10,9	17,6	18,9	6534	7288	8819
	2	11,3	20,8	12,6	6761	7704	8902
Maksimalna vrednost	1	46,2	54,6	56,9	29619	42505	68518
	2	47,1	56,3	64,9	31233	47187	75508
Opseg	1	35,3	37,0	38,0	23085	35217	59699
	2	35,8	35,5	52,3	24472	39483	66606
Srednja vrednost	1	22,8	30,3	33,8	13764	19075	27012
	2	23,5	34,7	33,9	13736	21243	27727
Standardna devijacija	1	9,4	10,1	12,3	7072	11567	17295
	2	10,3	10,7	13,6	7319	12698	19193
Medijana	1	22,3	31,2	29,6	11136	15696	19207
	2	19,4	34,3	31,1	10894	18082	20561
Koeficijent asimetrije	1	0,44	-0,03	-0,92	0,47	-0,52	-0,12
	2	-0,13	-0,64	-0,05	0,74	-0,69	0,21
Koeficijent zaobljenosti	1	0,94	0,66	0,64	1,26	0,83	0,91
	2	0,90	0,46	0,74	1,32	0,74	0,99

Zemljište se sastoji od različitih komponenti, čiji sastav prvenstveno zavisi od hemijskog sastava stena i minerala na kojima je zemljište formirano. Osnovni sastav zemljišta se može promeniti razvojem industrije, poljoprivrednom proizvodnjom, povećanom upotrebom hemijskih sredstava u poljoprivredi, kao i drugih agrotehničkih mera, što takođe dovodi i do povećane koncentracije metala u zemljištu. Pored navedenog, sastav se može promeniti i usled prirodnih biogeochemijskih procesa. Na ponašanje i dinamiku metala u zemljištu utiču mnogobrojni faktori, naročito fizičke i hemijske osobine zemljišta, koji ujedno imaju uticaj na pokretljivost metala u zemljištu, a samim tim i pristupačnost za biljke. Navedeno može biti razlog većeg sadržaja Sr i Ca u zemljištu oglednog polja Rimski Šančevi. Nehomogenosti u pogledu akumulacije metala u zemljištu mogu doprineti i različite agrotehničke mere: đubrenje mineralnim i ostalim đubrivima, popravka zemljišta (kalcifikacija, gipsovanje), navodnjavanje.

4.5.3. Neobradivo zemljište

Uz svaku seriju uzoraka za oba ogledna polja, ispitan je sadržaj Sr i Ca i u kontrolnim uzorcima neobradivog zemljišta. Rezultati određivanja koncentracija Sr i Ca u uzorcima neobradivog zemljišta sakupljenim na oglednim poljima Radmilovac i Rimski Šančevi, uzorkovanim u dva sloja (0-15 cm i 15-30 cm) tokom godina ispitivanja, prikazani su u tabeli 4.25.

Tabela 4.25. Koncentracije Sr i Ca u uzorcima neobradivog zemljišta na lokalitetima Radmilovac i Rimski Šančevi

Ogledno polje	Dubina zemljišta (cm)	[Sr] (mg kg ⁻¹)			[Ca] (mg kg ⁻¹)		
		2013.	2014.	2015.	2013.	2014.	2015.
Radmilovac	0-15	32,1	27,3	35,5	26973	25962	12492
	15-30	31,2	23,4	25,3	25126	23714	10400
Rimski Šančevi	0-15	42,1	54,8	51,8	44477	34151	19875
	15-30	39,5	43,9	49,7	43782	17019	18342

Iz tabele 4.25 je evidentno da su Sr i Ca i u neobradivom zemljištu prisutni u oba ispitana sloja zemljišta, ali u većim koncentracijama u gornjem sloju zemljišta (0-15 cm). Primetne su značajne razlike u koncentracijama Sr i Ca u neobradivom zemljištu oglednih polja. Kao i u obradivom, koncentracije su veće i u neobradivom zemljištu na lokalitetu Rimski Šančevi. U neobradivom zemljištu, kalcijum pokazuje tendenciju opadanja tokom vremena.

Kalcijum je jedan od metala sa najvećim sadržajem u zemljištu, dok se stroncijum nalazi u znatno nižim koncentracijama, što je i potvrđeno rezultatima analize sadržaja ovih metala u zemljištu. Srednje vrednosti koncentracija Sr i Ca u zemljištu koje su prikazane u ovoj studiji su uporedive sa vrednostima dobijenim u studijama [129-131].

4.6. Koncentracije Sr i Ca u usevima

Distribucija koncentracije Sr i Ca u usevima je praćena u periodu od tri godine, na oglednim poljima „Radmilovac” i „Rimski Šančevi”. Rezultati su izraženi u mg kg^{-1} sveže materije.

4.6.1. Ogledno polje „Radmilovac”

Rezultati određivanja koncentracija Sr i Ca u vegetativnim i generativnim organima useva na oglednom polju Radmilovac, tokom godina ispitivanja, prikazani su u tabelama 4.26 i 4.27. U uzorcima pšenice (2013. i 2015. godina) koncentracije Sr i Ca su određene u korenu i ostatku biljke (stablo+list+plod), dok su za uzorke kukuruza (2014. godina) određene u pojedinačnim biljnim organima: korenu, stablu, listu i plodu.

Tabela 4.26. Koncentracije Sr u pšenici i kukuruzu na oglednom polju Radmilovac u periodu 2013 - 2015.

Deo biljke	[Sr] (mg kg^{-1})					
	Oznaka lokacije					
	R1	R2	R3	R4	R5	R6
Pšenica	2013.					
Koren	2,13	2,28	2,42	2,45	2,83	3,21
Ostatak	1,68	1,76	1,82	1,28	1,45	1,68
Kukuruz	2014.					
Koren	1,49	1,64	1,80	1,94	2,26	2,68
Stablo	0,33	0,29	0,28	0,43	0,32	0,39
List	0,47	0,72	1,02	0,82	1,05	1,27
Plod	0,06	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Pšenica	2015.					
Koren	1,96	2,18	2,26	2,40	2,67	3,07
Ostatak	1,47	1,53	1,66	0,72	0,89	1,07

Iz tabele 4.26 se vidi da su najveće koncentracije Sr u korenu i ostatku pšenice u okviru kontrolnih tretmana (R3 i R6) oba sistema poljoprivrede. Ukoliko uporedimo vrednosti koncentracija Sr u pšenici tokom dve godine ispitivanja, zaključuje se da su

vrednosti nešto niže u 2015. u odnosu na 2013. godinu. Translokacija Sr iz korena u ostatak pšenice ukazuje da je raspodela ukupnog Sr u pšenici analogna raspodeli ^{90}Sr .

Poređenjem vrednosti koncentracija Sr u kukuruзу u okviru dva sistema tehnologije gajenja useva, uočene su više vrednosti u sistemu održive poljoprivrede. Međusobnim poređenjem vrednosti koncentracija ukupnog Sr u vegetativnim i generativnim organima kukuruза, može se zaključiti da je raspodela ukupnog Sr u biljnim organima kukuruза analogna raspodeli ^{90}Sr .

Na osnovu rezultata određivanja koncentracije ukupnog Sr u usevima na oglednom polju Radmilovac (tabela 4.26), može se zaključiti da postoji određena raspodela koncentracije Sr u usevima. U pšenici se najveći deo zadržava u korenu, a znatno manji deo translocira u ostatak biljke. U kukuruзу je takođe najveći deo zadržan u korenu, sa preraspodelom u pojedinim biljnim organima, i to sledećim redosledom: koren>list>stablo>plod.

Tabela 4.27. Koncentracije Ca u pšenici i kukuruзу na oglednom polju Radmilovac u periodu 2013 - 2015.

	[Ca] (mg kg ⁻¹)					
	Oznaka lokacije					
Deo biljke	R1	R2	R3	R4	R5	R6
Pšenica	2013.					
Koren	887	952	987	1698	1756	1925
Ostatak	549	693	718	524	625	666
Kukuruz	2014.					
Koren	466	507	606	617	680	698
Stablo	320	255	284	384	291	353
List	805	936	1156	1270	1305	1402
Plod	51,5	55,5	66,1	48,6	58	58,8
Pšenica	2015.					
Koren	850	934	967	1411	1595	1803
Ostatak	536	622	672	379	456	560

Na osnovu prikazanih koncentracija Ca u pšenici (tabela 4.27) može se uočiti isti trend varijacije koncentracija u korenu i ostatku pšenice tokom dve godine ispitivanja, pri čemu su kao i za ukupni Sr, najveće koncentracije dobijene u ovom usevu u okviru kontrolnih tretmana oba sistema poljoprivrede. Generalno, vrednosti su bile nešto niže u

drugoj godini ispitivanja ovog useva. Ukoliko se uporede vrednosti koncentracija Ca u korenu i ostatku pšenice, može se zaključiti da su koncentracije, kao i za ukupni Sr, veće u korenu nego u ostatku biljke, što znači da se najviše Ca zadržava u korenu.

Vrednosti koncentracija Ca u kukuruzu (tabela 4.27) ukazuju na veću akumulaciju ovog elementa u biljnim organima u okviru sistema održive poljoprivrede. Međusobnim poređenjem vrednosti koncentracija Ca u vegetativnim i generativnim organima kukuruza, može se zaključiti da je preraspodeljen u pojedinim biljnim organima sledećim redosledom: list>koren>stablo>plod.

U tabeli 4.28 je prikazana deskriptivna statistika vrednosti koncentracija Sr i Ca u usevima oglednog polja Radmilovac za tri godine ispitivanja.

Tabela 4.28. Deskriptivna statistika vrednosti koncentracija Sr i Ca u pšenici (P) i kukuruzu (K) oglednog polja Radmilovac

Parametar	Biljni organ	[Sr] (mg kg ⁻¹)		[Ca] (mg kg ⁻¹)	
		P	K	P	K
Minimalna vrednost	Koren	1,96	0,94	850	466
	Stablo	0,72	0,28	379	255
	List		0,47		805
	Plod		0,05		48,6
Maksimalna vrednost	Koren	3,21	1,80	1925	698
	Stablo	1,82	0,43	718	384
	List		1,27		1402
	Plod		0,06		66,1
Opseg	Koren	1,25	0,86	1075	232
	Stablo	1,10	0,15	339	129
	List		0,80		597
	Plod		0,01		17,5
Srednja vrednost	Koren	2,49	1,97	1314	596
	Stablo	1,42	0,34	583	314
	List		0,82		1146
	Plod		0,05		56,4
Standardna devijacija	Koren	0,39	0,44	420	92
	Stablo	0,36	0,06	102	48
	List		0,28		231
	Plod		/		6,1
Medijana	Koren	2,41	1,87	1199	612
	Stablo	1,50	0,32	591	306
	List		0,92		1213
	Plod		0,05		56,8

Srednje vrednosti koncentracija Sr i Ca u korenu pšenice iznose 2,49 i 1314 mg kg⁻¹, dok u ostatku (stablo+list+plod) pšenice iznose 1,42 i 583 mg kg⁻¹, redom. Srednje vrednosti koncentracija Sr i Ca za kukuruz su sledeće: 1,97 i 596 mg kg⁻¹ u korenu, 0,34 i 314 mg kg⁻¹ u stablu, 0,82 i 1146 mg kg⁻¹ u listu, 0,05 i 56,4 mg kg⁻¹ u plodu.

4.6.2. Ogledno polje „Rimski Šančevi”

Rezultati određivanja koncentracija Sr i Ca u vegetativnim i generativnim organima useva na oglednom polju Rimski Šančevi, tokom godina ispitivanja, prikazani su u tabelama 4.29 i 4.30. U uzorcima pšenice i uljane repice, koncentracije Sr i Ca su određene u korenu i ostatku biljke (stablo+list+plod), dok su za uzorke kukuruza i soje određene u pojedinačnim biljnim organima: korenu, stablu, listu i plodu.

Na osnovu rezultata određivanja koncentracija Sr i Ca u usevima na oglednom polju Rimski Šančevi (tabele 4.29 i 4.30), može se zaključiti da u usevima postoji određena preraspodela ovih elemenata. U pšenici i uljanoj repici je veći sadržaj Sr u korenu nego u ostatku biljke. Takođe, zaključuje se da pšenica usvaja više Sr nego uljana repica, jer je faktor razlike koncentracija 3 - 5 puta u korist pšenice. Raspodela koncentracije Sr u vegetativnim i generativnim organima kukuruza je sledeća: list>koren>stablo>plod, dok je za soju raspodela koren>plod>list>stablo. Poređenjem vrednosti koncentracija Sr u kukuruza i soji, dolazi se do zaključka da je usvajanje ovog elementa veće kod soje nego kod kukuruza, iako su koncentracije Sr u listu kukuruza veće nego u listu soje. Koncentracija Ca je veća u korenu nego u ostatku pšenice, dok je u uljanoj repici obrnuto, veća je koncentracija Ca u ostatku nego u korenu biljke. Rezultati određivanja koncentracije Ca pokazuju da uljana repica sadrži više Ca od soje. Raspodela koncentracija Ca u biljnim organima kukuruza je ista kao i za Sr. U soji je najveći sadržaj Ca u listu, zatim u stablu i korenu, a najmanji sadržaj Ca je u plodu soje.

Tabela 4.29. Koncentracije Sr u pšenici (*p*), uljanoj repici (*ur*), kukuruzu (*k*) i soji (*s*) na oglednom polju Rimski Šančevi u periodu 2013 - 2015.

	[Sr] (mg kg ⁻¹)				
	Oznaka lokacije				
	2013.				
Godina	2013.				
Deo biljke	NS1 ^p	NS4 ^p	NS5 ^p	NS9 ^p	NS10 ^{ur}
Koren	3,64	3,52	1,99	5,43	0,94
Ostatak	2,77	1,36	1,86	2,59	0,91
	NS2 ^k	NS3 ^s	NS6 ^s	NS7 ^s	NS8 ^s
Koren	3,71	5,71	3,26	4,18	4,78
Stablo	2,79	1,85	0,64	1,65	1,56
List	4,66	2,92	1,83	2,97	2,21
Plod	0,06	3,18	2,26	3,01	3,31
Godina	2014.				
Deo biljke	NS1 ^p	NS6 ^p	NS7 ^p	NS8 ^p	NS10 ^{ur}
Koren	3,34	5,76	4,08	5,96	1,38
Ostatak	2,30	4,21	2,82	4,30	0,94
	NS2 ^k	NS3 ^s	NS4 ^k	NS5 ^k	NS9 ^s
Koren	1,68	4,53	1,39	1,16	4,04
Stablo	0,93	0,74	0,89	0,79	1,29
List	2,77	1,86	2,95	3,15	1,77
Plod	0,04	1,90	0,06	0,04	1,89
Godina	2015.				
Deo biljke	NS1 ^p	NS4 ^p	NS5 ^p	NS9 ^p	NS10 ^{ur}
Koren	4,79	6,37	4,26	5,29	1,20
Ostatak	2,65	0,84	1,86	1,47	0,97
	NS2 ^k	NS3 ^s	NS6 ^k	NS7 ^k	NS8 ^k
Koren	2,69	6,34	1,60	2,76	4,04
Stablo	1,16	2,29	0,82	0,95	1,58
List	8,63	2,70	5,46	7,61	13,2
Plod	0,08	4,29	0,07	0,08	0,09

Tabela 4.30. Koncentracije Ca u u pšenici (*p*), uljanoj repici (*ur*), kukuruzu (*k*) i soji (*s*) na oglednom polju Rimski Šančevi u periodu 2013 - 2015.

	[Ca] (mg kg ⁻¹)				
	Oznaka lokacije				
Godina	2013.				
Deo biljke	NS1 ^p	NS4 ^p	NS5 ^p	NS9 ^p	NS10 ^{ur}
Koren	1605	2928	890	2955	1576
Ostatak	869	1086	760	959	2680
	NS2 ^k	NS3 ^s	NS6 ^s	NS7 ^s	NS8 ^s
Koren	1597	1781	1534	1928	2315
Stablo	952	2012	3970	2564	3214
List	2812	6254	7210	8115	7659
Plod	27,8	1008	1318	963	1156
Godina	2014.				
Deo biljke	NS1 ^p	NS6 ^p	NS7 ^p	NS8 ^p	NS10 ^{ur}
Koren	1789	2120	1456	2340	1730
Ostatak	853	1163	711	1881	2845
	NS2 ^k	NS3 ^s	NS4 ^k	NS5 ^k	NS9 ^s
Koren	567	1591	1238	493	1920
Stablo	426	2154	452	260	1942
List	1992	6326	1834	2092	6348
Plod	23,8	901	25,5	25,4	958
Godina	2015.				
Deo biljke	NS1 ^p	NS4 ^p	NS5 ^p	NS9 ^p	NS10 ^{ur}
Koren	2717	5258	1913	3009	2164
Ostatak	1227	422	789	603	2342
	NS2 ^k	NS3 ^s	NS6 ^k	NS7 ^k	NS8 ^k
Koren	1252	2320	763	1210	3190
Stablo	615	4122	382	421	561
List	5831	12365	2947	4899	8530
Plod	33,8	1523	27,2	26,8	10,7

Rezultati ove studije ukazuju ne samo na razlike u pogledu usvajanja različitih elemenata, već i u njihovoj distribuciji u biljkama. Retranslokacija pojedinih elemenata može pokazati značajne razlike. Kalcijum je jedan od elemenata koji se odlikuje naročito slabom retranslokacijom [132]. Ovaj element se u biljkama kreće akropetalno ksilemskim provodnim sudovima, a iz listova se ne translocira u druge niže organe floemom, što je najverovatnije i razlog njegove veće koncentracije u listu kukuruza i soje.

Vrednosti koncentracija Sr i Ca u usevima oglednog polja Rimski Šančevi su analizirane deskriptivnom statistikom, koja je prikazana u tabeli 4.31.

Tabela 4.31. Deskriptivna statistika vrednosti koncentracija Sr i Ca u pšenici (P), kukuruzu (K), soji (S) i uljanoj repici (UR) oglednog polja Rimski Šančevi

Parametar	Biljni organ	[Sr] (mg kg ⁻¹)				[Ca] (mg kg ⁻¹)			
		P	K	S	UR	P	K	S	UR
Minimalna vrednost	Koren	1,99	1,16	3,26	0,94	890	493	1534	1576
	Stablo	0,84	0,79	0,64	0,91	422	260	1942	2342
	List		2,77	1,77			1834	6254	
	Plod		0,04	1,89			10,7	901	
Maksimalna vrednost	Koren	6,37	4,04	6,34	1,38	5258	3190	2320	2164
	Stablo	4,30	2,79	2,29	0,97	1881	952	4122	2845
	List		13,2	2,97			8530	12365	
	Plod		0,09	4,29			33,8	1523	
Opseg	Koren	4,38	2,88	3,08	0,44	4368	2697	786	588
	Stablo	3,46	2,00	1,65	0,06	1459	692	2180	503
	List		10,43	1,20			6696	6111	
	Plod		0,05	2,40			23,1	622	
Srednja vrednost	Koren	4,54	2,38	4,69	1,17	2415	1289	1913	1823
	Stablo	2,42	1,24	1,43	0,94	944	509	2854	2622
	List		6,05	2,32			3867	7754	
	Plod		0,06	2,83			25,1	1118	
Standardna devijacija	Koren	1,29	1,09	1,04	0,22	1117	858	314	305
	Stablo	1,06	0,68	0,59	0,03	374	209	922	256
	List		3,61	0,53			2373	2159	
	Plod		0,02	0,87			6,54	229	
Medijana	Koren	4,52	2,18	4,53	1,20	2230	1224	1920	1730
	Stablo	2,44	0,94	1,56	0,94	861	439	2564	2680
	List		5,06	2,21			2880	7210	
	Plod		0,06	3,01			26,2	1008	

Srednje vrednosti koncentracija Sr, izražene na svežu materiju, u korenu i ostatku (stablo+list+plod) pšenice iznose 4,54 i 2,42 mg kg⁻¹; u korenu, stablu, listu i plodu kukuruza iznose 2,38, 1,24, 6,05 i 0,06 mg kg⁻¹, redom; u korenu, stablu, listu i plodu soje iznose 4,69, 1,43, 2,32 i 2,83 mg kg⁻¹, redom; u korenu i ostatku (stablo+list+plod) uljane repice iznose 1,17 i 0,94 mg kg⁻¹. Vrednosti koncentracija Sr i Ca u usevima ispitanim u ovoj studiji su u skladu sa vrednostima u studijama [130,131,133].

4.7. Određivanje karakteristika poljoprivrednog zemljišta

Fizičko-hemijske karakteristike zemljišta mogu uticati na adsorpciju i migraciju radionuklida u zemljištu [134]. Stoga su ove karakteristike određene za zemljište oglednih polja „Radmilovac” i „Rimski Šančevi”, u uzorcima sakupljenim u prolećnoj sezoni 2015. godine.

4.7.1. Fizičke karakteristike zemljišta oglednih polja

U ispitivanju fizičkih osobina zemljišta, pažnja je posvećena određivanju mehaničkog sastava zemljišta, zatim higroskopske vlažnosti, kao i gustine suvog zemljišta. Rezultati ispitivanja osnovnih fizičkih osobina poljoprivrednog zemljišta na oglednim poljima „Radmilovac” (R1-6) i „Rimski Šančevi” (NS1-10), prikazani su u tabeli 4.32. Opis oglednih polja je dat u prethodnom poglavlju.

Rezultati ispitivanja mehaničkih frakcija zemljišta na oglednim poljima Radmilovac i Rimski Šančevi su pokazali da zbirna frakcija peska varira od 6 % (zemljište iz sistema organske poljoprivrede - kontrolni tretman, R3) do 63,93 % (neđubreno tropolje, NS6); frakcija praha od 9,04 % (NS6) do 63,42 % (zemljište iz sistema organske poljoprivrede - tretman sa organskim đubrivom, R2); frakcija gline od 26,89 % (đubreno dvanaestopolje, NS9) do 37,54 % (đubreno tropolje, uljana repica, NS10). Najpovoljnijim se smatra sadržaj peska u iznosu 40 - 70 % od mase zemljišta. Sa stanovišta uticaja frakcije praha na druge fizičke osobine zemljišta i uspevanje useva, poželjno je da zemljište sadrži najmanje 30 - 40 % frakcije praha i 20 % gline. U pogledu uticaja na plodnost zemljišta, nepovoljno se odražava ne samo suviše nizak, već i suviše visok sadržaj gline, jer u tom slučaju zemljišta slabo propuštaju vodu i imaju veoma izraženu kapilarnost [51]. Zemljište lokacije neđubrenog tropolja, NS6, jedino ima optimalan sadržaj peska, dok ostale lokacije na oglednom polju Rimski Šančevi karakteriše sadržaj peska u proseku od oko 30 %. Sadržaj praha i gline zadovoljava pomenute optimalne vrednosti, osim za zemljište lokacije NS6, koje karakteriše izuzetno nizak sadržaj frakcije praha. Na lokalitetu Radmilovac, zemljište oglednog polja karakteriše nizak sadržaj peska, izuzetno visok, ali povoljan sadržaj praha, kao i gline.

Tabela 4.32. Fizičke osobine zemljišta

Oznaka lokacije	Mehanički sastav zemljišta (%)				Tekstura [100]	Higroskopska vlažnost (%)	Gustina zemljišta (g cm ⁻³)
	Krupni pesak	Sitni pesak	Prah	Glina			
R1	3,73	2,95	62,26	31,06	PrGI*	2,55	1,29
R2	4,12	3,27	63,42	29,19	PrGI	2,62	1,33
R3	2,87	3,13	61,25	32,75	PrGI	2,42	1,31
R4	9,23	7,11	56,31	27,35	PrGI	2,84	1,30
R5	8,41	5,02	53,83	32,74	PrGI	2,37	1,27
R6	7,97	6,28	52,48	33,27	PrGI	2,22	1,25
Srednja vrednost	6,06	4,63	58,26	31,06	/	2,50	1,29
NS1	12,99	16,59	33,47	36,95	GI**	3,07	1,33
NS2	8,56	21,60	32,84	37,00	GI	3,15	1,30
NS3	15,46	15,84	35,08	33,62	GI	3,20	1,31
NS4	12,68	24,53	34,85	27,95	PrGI	2,65	1,35
NS5	12,01	20,45	33,42	34,12	GI	2,94	1,32
NS6	10,04	53,89	9,04	27,05	PeGI***	3,17	1,39
NS7	9,57	20,34	34,23	35,86	GI	3,10	1,36
NS8	8,32	22,22	34,93	34,56	GI	3,07	1,37
NS9	11,42	25,54	36,15	26,89	GI	2,71	1,34
NS10	11,49	6,88	44,09	37,54	PrGI	3,15	1,38
Srednja vrednost	11,25	22,79	32,81	33,15	/	3,02	1,34

*PrGI - Praškasto glinovita ilovača

**GI - Glinovita ilovača

***PeGI - Peskovito glinovita ilovača

Na osnovu mehaničkog sastava zemljišta, odnosno mehaničkih frakcija, u tabeli 4.32 je prikazana i klasifikacija zemljišta prema tročlanoj teksturnoj klasifikaciji zemljišta [100]. Rezultati ispitivanja su pokazali da zemljište na navedenim oglednim poljima, po teksturi spada u ilovače. Pored toga, prema dvočlanoj klasifikaciji Kačinskog [135] koja uzima u obzir dve mehaničke frakcije, zbirnu frakciju fizičkog peska i fizičke gline, ispitivana zemljišta spadaju u zemljište stepskog tipa, i to: zemljište na oglednom polju Radmilovac je černozeoliko zemljište, tj. izluženi černozeol, dok je zemljište na oglednom polju Rimski Šančevi, černozeol. S ekološkog stanovišta, samo lake (20 - 30 % gline) i srednje (30 - 40 % gline) ilovače, što je slučaj sa ispitivanim zemljištem, obezbeđuju optimalne uslove za gajenje poljoprivrednih kultura, zbog približno jednakog odnosa mikro- i makropora koji im omogućava dobro

upijanje, proceđivanje i zadržavanje vode, kao i dobru aeraciju ili provetravanje zemljišta (proces razmene vazduha i gasova između zemljišta i prizemnog sloja atmosfere). Ilovače su veoma povoljne za razvoj korena svih vrsta biljnih kultura, i njihova obrada je laka [51].

Higroskopska vlažnost je veoma važan pokazatelj, čije određivanje prethodi svakoj analizi zemljišta. Ova fizička osobina zemljišta daje predstavu o mehaničkom sastavu zemljišta i njegovoj diferenciranosti po dubini profila. Dobijene vrednosti za higroskopsku vlažnost na lokalitetu Radmilovac su između 2,22 i 2,84 %, dok su vrednosti za lokalitet Rimski Šančevi u intervalu od 2,65 do 3,20 %. Higroskopska vlažnost zemljišta različitog mehaničkog sastava iznosi: < 1 % (peskovi), 1 - 2 % (peskuše), 2 - 5 % (ilovače), > 5 % (glinuše) i > 10 % za monmorionitsku glinu [51]. Dobijene vrednosti higroskopske vlažnosti ispitivanog zemljišta (2,22 - 3,20 %) potvrđuju da je to zemljište koje po mehaničkom sastavu odgovara ilovači.

Određene vrednosti gustine suvog zemljišta na lokalitetu Radmilovac su između 1,25 i 1,33 g cm⁻³, dok su vrednosti gustine suvog zemljišta na lokalitetu Rimski Šančevi u intervalu od 1,30 do 1,39 g cm⁻³. Na osnovu podele zemljišta u odnosu na vrednosti gustine, zemljište sa ispitivanih lokaliteta spada u malo sabijenu oranicu (1,1 - 1,3 g cm⁻³) i jače sabijenu oranicu (1,3 - 1,4 g cm⁻³) [135]. Obzirom da je ispitivano zemljište po teksturi glinovita ilovača, ili praškasto i peskovito-glinovita ilovača, dobijene vrednosti predstavljaju optimalne vrednosti za gajenje useva na ovom tipu zemljišta i u skladu su sa literaturnim podacima [51].

4.7.2. Hemijske karakteristike zemljišta oglednih polja

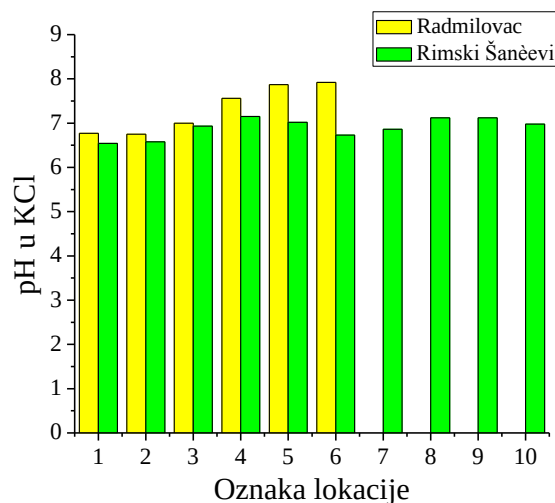
U ispitivanju hemijskih osobina zemljišta, pažnja je posvećena određivanju pH vrednosti zemljišta (u vodi i kalijum hloridu), zatim sadržaja kalcijum karbonata, sadržaja humusa, kao i sadržaja ukupnog organskog ugljenika. U okviru određivanja sadržaja organske materije, određen je i sastav humusa, i to udeo specifičnih (pravih) humusnih materija. Rezultati analize osnovnih hemijskih osobina poljoprivrednog zemljišta na izabranim lokalitetima, „Radmilovac” (R1-6) i „Rimski Šančevi” (NS1-10), prikazani su u tabeli 4.33.

Tabela 4.33. Hemijske osobine zemljišta

Oznaka lokacije	pH u H ₂ O	pH u KCl	CaCO ₃ (%)
R1	6,23	6,77	1,40
R2	6,38	6,75	1,28
R3	6,56	7,00	1,52
R4	7,00	7,56	1,20
R5	7,12	7,87	1,35
R6	7,35	7,92	1,64
Srednja vrednost	6,77	7,31	1,40
NS1	7,61	6,54	0,70
NS2	7,43	6,58	/
NS3	7,80	6,93	2,52
NS4	7,76	7,15	4,21
NS5	7,80	7,02	0,24
NS6	7,58	6,73	/
NS7	7,68	6,86	1,26
NS8	7,99	7,12	3,93
NS9	7,67	7,12	6,88
NS10	7,69	6,98	1,26
Srednja vrednost	7,70	6,90	2,10

Rezultati ispitivanja aktivne kiselosti zemljišta na oglednom polju Radmilovac su pokazali da su vrednosti pH u H₂O od 6,23 do 7,25. Na osnovu Američke klasifikacije zemljišta prema hemijskoj reakciji [100], može se zaključiti da je hemijska reakcija zemljišta iz organske poljoprivrede (R1-3) slabo kisela, dok je za zemljište iz održive poljoprivrede (R4-6) neutralna. U postupku određivanja supstitucione kiselosti, odnosno pH u KCl-u, odgovarajuće hemijske reakcije zemljišta su bliže neutralnoj i slabo alkalnoj hemijskoj reakciji (pH od 6,75 do 7,92). Generalno, niže pH vrednosti su dobijene za zemljište iz organske poljoprivrede (R1-3). Dobijene vrednosti određivanja aktivne kiselosti zemljišta na oglednom polju Rimski Šančevi, odnosno vrednosti pH u H₂O su iznosile od 7,43 do 7,99. Dakle, na ovom oglednom polju, hemijska reakcija zemljišta je slabo do umereno alkalna. Na osnovu postupka određivanja pH u KCl, hemijska reakcija zemljišta na ovom oglednom polju je neutralna (pH od 6,54 do 7,15). Vrednosti pH u KCl za černozem (Rimski Šančevi) su bile niže u odnosu na pH u H₂O, za razliku od izluženog černozema (Radmilovac), gde su vrednosti pH u KCl bile više u

odnosu na pH u H₂O. Razlike u vrednostima pH u KCl između dva tipa zemljišta, prikazane su grafički (slika 4.4).



Slika 4.4. Bar-dijagram vrednosti pH u KCl za izluženi černoze i černoze

Hemijska reakcija zemljišnog rastvora spada među najvažnije faktore plodnosti zemljišta, pokazujući jak uticaj na visinu i kvalitet prinosa. U poljoprivrednoj proizvodnji od velikog značaja je poznavanje optimalnih pH vrednosti za pojedine vrste gajenih biljaka. Većina useva, među kojima pšenica, kukuruz, soja, ječam, šećerna repa i druge, optimalne uslove za razvoj i visoke prinose nalaze pri slabo kiseloj do slabo alkalnoj reakciji, u intervalu pH od 6 do 7,5 [99]. Ova reakcija je upravo i ona pri kojoj su optimalno izraženi procesi mobilizacije elemenata biljnih hraniva, tj. prevođenje istih u oblike dostupne biljkama. Utvrđeno je da za istu vrstu biljaka optimalna vrednost pH zemljišta nije ista na svim zemljištima i u svim klimatskim uslovima [99]. Organske kiseline, naročito fulvične se javljaju kao izvor povećane koncentracije H⁺ jona u zemljišnom rastvoru. Procesima raspadanja mineralnog i organskog dela zemljišta stvaraju se mineralne i organske kiseline, koje takođe utiču na zakišeljavanje zemljišne sredine. Duža upotreba fiziološki kiselih đubriva je takođe jedan od izvora povećanja H⁺ jona, što može znatno da zakiseli zemljišni rastvor [101].

Minimalna vrednost sadržaja CaCO₃ u analiziranom zemljištu, na oglednom polju Radmilovac je iznosila 1,20 %, a maksimalna vrednost 1,64 %. Prema klasifikaciji zemljišta na osnovu sadržaja CaCO₃ [100], ispitivano zemljište iz organske, kao i iz

održive poljoprivrede spada u slabo karbonatno zemljište (0,1 - 2 % CaCO_3). Na oglednom polju Rimski Šančevi, razlike u pogledu sadržaja CaCO_3 u analiziranom zemljištu sa različitih oglednih parcela su bile izraženije, od nekarbonatnog (lokacije NS2 - monokultura kukuruza i NS6 - neđubreno tropolje) bez CaCO_3 , slabo karbonatnog (lokacije NS1 - monokultura pšenice, NS5 - đubreno dvopolje, NS7 - tropolje sa đubrenjem tipa 1 i NS - tropolje sa đubrenjem tipa 3), srednje karbonatnog sa 2 - 5 % CaCO_3 (lokacije NS3 - monokultura soje, NS4 - neđubreno dvopolje i NS8 - tropolje sa đubrenjem tipa 2), pa do karbonatnog sa 5 - 10 % CaCO_3 (lokacija NS9 - đubreno dvanaestopolje).

Kreč u černozemu potiče od matičnog supstrata - lesa u kojem ga može biti do 30 %, pa i 40 %. Kalcijum karbonat povoljno utiče na strukturu černozema, tako što Ca^{2+} jon vrši koagulaciju koloida i sa humičnim kiselinama gradi Ca-humate, koji su najvažnija cementna materija u zemljištu. Povoljan uticaj, CaCO_3 ostvaruje na pH reakciju zemljišta, tako što izaziva blago alkalnu reakciju, koja je optimalna za rast i razvoj mnogih gajenih biljaka, a takode ima i puferno dejstvo [101]. Prethodno navedeno je u skladu sa podacima iz tabele 4.33, odakle se vidi da su najniže vrednosti pH upravo za nekarbonatni černozem.

Rezultati ispitivanja sadržaja humusa, ukupnog organskog ugljenika (UOC), sadržaja organskog ugljenika u humičnim (OCH) i fulvičnim kiselinama (OCF), kao i njegovog odnosa u humičnim i fulvičnim kiselinama, prikazani su u tabeli 4.34.

Vrednosti sadržaja humusa za ispitivano zemljište na oglednom polju Radmilovac, kreću se od 2,01 % do 2,63 %. Prema klasifikaciji zemljišta na osnovu sadržaja humusa [136], koja se pokazala prikladna za zemljišta Republike Srbije, ispitivano zemljište iz organske, kao i iz održive poljoprivrede pripada klasi slabo humusnog zemljišta (1 - 3 % humusa). Rezultati ispitivanja sadržaja humusa u zemljištu na oglednom polju Rimski Šančevi su pokazali da i ovaj tip zemljišta spada u slabo humusno zemljište, sa sadržajem organske materije od 2,29 do 3,03 %. Sadržaj humusa u površinskom horizontu zemljišta Republike Srbije, na dubini 0-20 cm, varira u veoma širokom intervalu, od vrednosti manjih od 1 % u slabo razvijenim i jako erodiranim zemljištima, do preko 50 % u tresetnim zemljištima [99]. U oraničnom horizontu njivskih zemljišta, sadržaj humusa je mahom između 2 i 5 %, što su analize zemljišta sa ispitivanih lokaliteta i pokazale. Organska materija i minerali gline poseduju

adsorpciona svojstva. Kako je organska materija sposobna da adsorbuje više hraniva od iste količine gline, povećavanje sadržaja organske materije je od velikog značaja.

Tabela 4.34. Sadržaj humusa i ekstrahovanog organskog ugljenika u zemljištu

Oznaka lokacije	Humus (%)	UOC (%)	OCH (%)	OCF (%)	OCH / OCF
R1	2,01	0,42	0,24	0,18	1,33
R2	2,37	0,38	0,22	0,16	1,38
R3	2,47	0,34	0,20	0,14	1,43
R4	2,08	0,40	0,27	0,13	2,08
R5	2,12	0,26	0,18	0,08	2,25
R6	2,63	0,23	0,14	0,09	1,56
Srednja vrednost	2,28	0,34	0,21	0,13	1,67
NS1	3,03	0,25	0,13	0,12	1,08
NS2	2,80	0,26	0,15	0,11	1,36
NS3	2,86	0,24	0,18	0,06	3,00
NS4	2,29	0,18	0,05	0,13	0,38
NS5	2,66	0,28	0,14	0,14	1,00
NS6	2,93	0,24	0,11	0,13	0,85
NS7	2,97	0,33	0,11	0,22	0,50
NS8	2,93	0,31	0,17	0,14	1,21
NS9	2,52	0,26	0,19	0,07	2,71
NS10	2,36	0,25	0,12	0,13	0,92
Srednja vrednost	2,74	0,26	0,14	0,12	1,30

U sastav humusa ulaze svi organogeni elementi: kiseonik, vodonik, ugljenik (oko 58 %), azot (oko 5 %) i elementi pepela. Poznavanje elementarnog sastava humusa je neophodno za izračunavanje njegove količine u zemljištu, pošto se izračunava indirektno preko srednjeg sadržaja ugljenika [101].

Sadržaj ukupnog organskog ugljenika u ispitivanom zemljištu lokaliteta Radmilovac je varirao od 0,23 do 0,42 %, a u zemljištu na lokalitetu Rimski Šančevi od 0,18 do 0,33 %. Iz tabele 4.34 može se videti da je na lokalitetu Radmilovac veći sadržaj organskog ugljenika u humičnim kiselinama zemljišta (0,14 do 0,27 %), nego u fulvičnim (0,08 do 0,18 %), za sve ispitivane parcele. Na lokalitetu Rimski Šančevi, sadržaj organskog ugljenika u humičnim kiselinama zemljišta je veći nego u fulvičnim kiselinama, na parcelama sa monokulturom (NS1-3), kao i na parcelama tropolja sa đubrenjem tipa 2 (NS8) i đubrenog dvanaestopolja (NS9). Sadržaj organskog ugljenika je jednak u obe kiseline na parceli đubrenog dvopolja (NS5), dok je na preostalim parcelama veći u fulvičnim kiselinama nego u humičnim.

4.8. Koncentracije anjona i katjona u poljoprivrednom zemljištu

U ekstraktu uzoraka zemljišta oglednih polja „Radmilovac” i „Rimski Šančevi”, određene su koncentracije anjona i katjona koje su izražene u mg L⁻¹.

4.8.1. Ogledno polje „Radmilovac”

Koncentracije anjona i katjona u ekstraktu uzoraka zemljišta sakupljenih u letnjoj sezoni 2014. na oglednom polju „Radmilovac”, prikazane su u tabeli 4.35.

Tabela 4.35. Koncentracije anjona i katjona u ekstraktu uzoraka zemljišta oglednog polja Radmilovac, za dve dubine uzorkovanja (nd - nije detektovano)

Oznaka lokacije	Koncentracija anjona (mg L ⁻¹)									
	F ⁻		Cl ⁻		NO ₃ ⁻ - N		SO ₄ ²⁻		PO ₄ ³⁻ - P	
Dubina (cm)	0-15	15-30	0-15	15-30	0-15	15-30	0-15	15-30	0-15	15-30
R1	1,15	1,08	1,17	0,63	0,12	nd	5,30	2,81	nd	nd
R2	2,96	2,85	1,83	1,17	0,12	0,12	15,36	13,18	nd	nd
R3	1,19	1,09	1,49	0,53	0,23	0,12	4,55	3,57	nd	nd
R4	5,03	8,12	1,15	nd	0,17	0,10	11,11	10,19	2,61	2,86
R5	4,13	3,25	1,46	0,89	0,15	0,10	12,74	9,27	2,30	nd
R6	3,34	2,94	1,31	0,92	0,10	0,11	9,79	8,05	nd	nd

Oznaka lokacije	Koncentracija katjona (mg L ⁻¹)									
	Na ⁺		K ⁺		NH ₄ ⁺		Mg ²⁺		Ca ²⁺	
Dubina (cm)	0-15	15-30	0-15	15-30	0-15	15-30	0-15	15-30	0-15	15-30
R1	5,80	3,75	4,36	2,82	0,62	0,63	1,88	1,51	101,40	71,52
R2	10,92	9,03	8,09	6,79	0,04	nd	7,05	5,21	120,00	101,69
R3	8,09	5,42	6,08	4,00	1,10	0,31	2,73	1,78	72,34	85,26
R4	10,29	9,74	7,74	7,32	0,59	nd	2,70	2,62	109,19	107,44
R5	13,82	11,09	10,32	8,30	nd	nd	5,49	5,72	95,65	101,15
R6	12,38	9,69	9,27	7,23	0,11	0,23	6,95	5,44	88,79	74,81

Na osnovu prikazanih rezultata u tabeli 4.35, može se videti da su koncentracije fluorida i nitrata (izražene kao NO₃⁻ - N) u ekstraktu zemljišta varirale od 1,08 do 8,12 mg L⁻¹ i od 0,10 do 0,23 mg L⁻¹ redom, i uglavnom su bile niže za dubinu zemljišta od 15-30 cm. Sadržaj hlorida je bio od 0,53 do 1,83 mg L⁻¹, dok je sadržaj sulfata iznosio od 2,81 do 15,36 mg L⁻¹, pri čemu su koncentracije hlorida i sulfata na svim ispitanim lokacijama bile niže na većoj dubini zemljišta. Fosfati, izraženi kao PO₄³⁻ - P su

detektovani samo na lokaciji R4 u koncentracijama 2,61 i 2,86 mg L⁻¹, kao i na lokaciji R3 na dubini zemljišta od 0-15 cm (2,30 mg L⁻¹).

Srednje koncentracije anjona u ekstraktu oba sloja zemljišta oglednog polja Radmilovac iznose za: fluoride 3,09 mg L⁻¹, hloride 1,14 mg L⁻¹, nitrate 0,13 mg L⁻¹, sulfate 8,83 mg L⁻¹ i fosfate 2,59 mg L⁻¹. Generalno, ekstrakt zemljišta na oglednom polju Radmilovac u najvećoj koncentraciji sadrži sulfate.

Katjoni u ekstraktu zemljišta su zastupljeni u sledećim koncentracijama: 3,75 - 13,82 mg L⁻¹ za Na⁺, 2,82 - 10,32 mg L⁻¹ za K⁺, 0,04 - 0,63 mg L⁻¹ za NH₄⁺ (na lokaciji R5 nije detektovan), 1,51 - 7,05 mg L⁻¹ za Mg²⁺ i od 71,52 do 120 mg L⁻¹ za Ca²⁺. Zemljište na većoj dubini (15-30 cm) sadrži uglavnom niže koncentracije ispitanih katjona. Srednje koncentracije katjona u ekstraktu oba sloja zemljišta oglednog polja Radmilovac iznose za: Na⁺ 9,17 mg L⁻¹, K⁺ 6,86 mg L⁻¹, NH₄⁺ 0,45 mg L⁻¹, Mg²⁺ 4,09 mg L⁻¹ i Ca²⁺ 94,1 mg L⁻¹. Pri tome, ovo zemljište sadrži najviše jona kalcijuma, i to u daleko većoj koncentraciji u odnosu na druge katjone.

Koncentracije anjona i katjona su određene i u kontrolnom uzorku neobradivog zemljišta na lokalitetu Radmilovac. Rezultati ispitivanja sadržaja anjona i katjona u ekstraktu uzorka neobradivog zemljišta, uzorkovanog na dve dubine su prikazani u tabeli 4.36.

Tabela 4.36. Koncentracije anjona i katjona u ekstraktu uzorka neobradivog zemljišta sa lokaliteta Radmilovac (nd - nije detektovano)

Koncentracija anjona (mg L ⁻¹)					
Dubina (cm)	F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻ - N	SO ₄ ²⁻	PO ₄ ³⁻ - P
0-15	2,64	1,60	0,16	6,84	nd
15-30	1,21	1,05	0,11	4,17	nd
Koncentracija katjona (mg L ⁻¹)					
Dubina (cm)	Na ⁺	K ⁺	NH ₄ ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
0-15	5,33	4,01	0,54	3,11	100,13
15-30	2,59	1,95	1,15	2,80	71,08

Iz tabele 4.36 se može videti da su koncentracije anjona i katjona i u neobradivom zemljištu lokaliteta Radmilovac, manje na većoj dubini, osim za NH₄⁺, a i

da fosfati nisu detektovani. Takođe, i neobradivo zemljište sadrži sulfate i Ca^{2+} jone u najvećoj koncentraciji.

4.8.2. Ogledno polje „Rimski Šančevi”

Rezultati određivanja koncentracije anjona i katjona u ekstraktu uzoraka zemljišta za dve različite dubine, sakupljenih u letnjoj sezoni 2014. na oglednom polju „Rimski Šančevi”, prikazani su u tabeli 4.37.

Tabela 4.37. Koncentracije anjona i katjona u ekstraktu uzoraka zemljišta oglednog polja Rimski Šančevi, za dve dubine uzorkovanja (nd - nije detektovano)

Oznaka lokacije	Koncentracija anjona (mg L^{-1})									
	F^{-}		Cl^{-}		$\text{NO}_3^{-} - \text{N}$		SO_4^{2-}		$\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$	
Dubina (cm)	0-15	15-30	0-15	15-30	0-15	15-30	0-15	15-30	0-15	15-30
NS1	2,74	1,37	0,56	0,45	0,16	0,11	3,59	4,60	nd	nd
NS2	1,27	1,13	0,70	0,35	0,12	0,10	3,61	2,17	nd	nd
NS3	0,79	1,83	0,69	1,04	nd	0,09	2,42	10,07	nd	nd
NS4	1,59	1,02	0,52	0,55	0,12	0,09	4,45	2,55	2,10	nd
NS5	1,58	1,77	0,39	0,51	0,10	0,12	5,64	4,44	nd	nd
NS6	1,82	1,24	nd	0,35	0,12	nd	4,90	5,09	nd	nd
NS7	1,13	1,52	0,62	0,69	0,09	0,11	3,94	4,76	nd	nd
NS8	1,11	1,09	2,11	3,09	nd	0,19	11,64	4,74	nd	nd
NS9	3,31	2,19	0,74	0,84	0,11	0,11	6,66	7,74	nd	nd
NS10	0,72	0,69	5,89	2,13	0,12	0,12	19,59	8,38	nd	nd
Oznaka lokacije	Koncentracija katjona (mg L^{-1})									
	Na^{+}		K^{+}		NH_4^{+}		Mg^{2+}		Ca^{2+}	
Dubina (cm)	0-15	15-30	0-15	15-30	0-15	15-30	0-15	15-30	0-15	15-30
NS1	6,46	3,16	4,86	2,30	2,45	1,34	6,09	5,54	93,34	83,76
NS2	2,18	2,10	1,64	1,58	0,42	0,59	10,65	8,92	73,77	51,72
NS3	11,32	12,37	8,51	10,05	1,83	1,09	6,69	9,65	80,24	116,27
NS4	2,61	2,15	1,96	1,62	0,66	2,68	4,20	3,79	95,80	63,51
NS5	4,43	7,21	3,33	5,41	1,00	1,28	6,97	7,61	94,47	97,61
NS6	3,26	4,84	2,45	3,64	1,21	2,23	11,28	10,21	89,31	69,99
NS7	9,68	6,69	7,28	5,03	1,75	2,83	5,24	4,75	97,37	88,84
NS8	21,36	20,87	16,06	15,69	2,02	2,43	8,77	8,45	106,32	65,82
NS9	4,08	3,46	3,01	2,60	0,15	0,97	5,22	4,73	102,24	103,32
NS10	5,58	4,52	5,04	3,40	1,94	1,78	8,09	7,34	53,26	40,83

Rezultati određivanja sadržaja anjona su pokazali da su u ekstraktu zemljišta na oglednom polju Rimski Šančevi, anjoni zastupljeni u sledećim koncentracijama: od 0,69 do 3,31 mg L⁻¹ za F⁻, 0,35 - 5,89 mg L⁻¹ za Cl⁻, 2,17 - 19,59 mg L⁻¹ za SO₄²⁻ i uglavnom su bile niže na većoj dubini, dok je koncentracija NO₃⁻ - N bila gotovo izjednačena na obe ispitivane dubine zemljišta i iznosila od 0,09 do 0,19 mg L⁻¹. Fosfati su detektovani samo na lokaciji NS4 i to na dubini od 0-15 cm (2,10 mg L⁻¹). Srednje koncentracije anjona u ekstraktu oba sloja zemljišta oglednog polja Rimski Šančevi iznose za: fluoride 1,50 mg L⁻¹, hloride 1,11 mg L⁻¹, nitrate 0,10 mg L⁻¹, sulfate 6,05 mg L⁻¹.

Koncentracije katjona u zemljištu su: 2,10 - 21,36 mg L⁻¹ za Na⁺, 1,58 - 16,06 mg L⁻¹ za K⁺, 0,15 - 2,83 mg L⁻¹ za NH₄⁺, 3,79 - 11,28 mg L⁻¹ za Mg²⁺ i od 40,83 do 116,27 mg L⁻¹ za Ca²⁺. Zemljište na većoj dubini (15-30 cm) uglavnom sadrži niže koncentracije ispitanih katjona. Srednje koncentracije katjona u ekstraktu oba sloja zemljišta oglednog polja Rimski Šančevi iznose za: Na⁺ 6,92 mg L⁻¹, K⁺ 5,27 mg L⁻¹, NH₄⁺ 1,52 mg L⁻¹, Mg²⁺ 7,20 mg L⁻¹ i Ca²⁺ 83,4 mg L⁻¹. Takođe i ovo zemljište sadrži najviše jona kalcijuma, i to u daleko većoj koncentraciji u odnosu na druge katjone.

Koncentracije anjona i katjona su određene i u kontrolnom uzorku neobradivog zemljišta na ovom lokalitetu. Rezultati ispitivanja koncentracije anjona i katjona u ekstraktu uzorka neobradivog zemljišta, uzorkovanog na dve dubine su prikazani u tabeli 4.38.

Tabela 4.38. Koncentracije anjona i katjona u ekstraktu uzorka neobradivog zemljišta sa lokaliteta Rimski Šančevi (nd - nije detektovano)

Koncentracija anjona (mg L ⁻¹)					
Dubina (cm)	F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻ - N	SO ₄ ²⁻	PO ₄ ³⁻ - P
0-15	0,79	1,66	nd	4,25	nd
15-30	2,39	0,70	nd	14,75	nd
Koncentracija katjona (mg L ⁻¹)					
Dubina (cm)	Na ⁺	K ⁺	NH ₄ ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
0-15	28,59	21,50	10,93	7,44	79,40
15-30	13,43	10,10	6,65	6,04	109,89

Rezultati određivanja koncentracija anjona i katjona u neobradivom zemljištu (tabela 4.38) ukazuju da su koncentracije Cl⁻, Na⁺, K⁺, NH₄⁺ i Mg²⁺ niže u sloju

zemljišta 15-30 cm, dok su koncentracije F^- , SO_4^{2-} i Ca^{2+} niže u sloju zemljišta 0-15 cm. Nitrati i fosfati nisu detektovani u neobradivom zemljištu ovog lokaliteta.

Na osnovu rezultata ispitivanja ekstrakta zemljišta na oba ogledna polja, bilo da je reč o obradivom ili neobradivom zemljištu, zaključuje se da od anjona zemljište najviše sadrži sulfate, dok od katjona najviše sadrži Ca^{2+} .

4.9. Korelaciona analiza

Rezultati linearne korelacione analize za ogledna polja „Radmilovac” i „Rimski Šančevi” su prikazani u tablicama korelacija (Prilog I). Korelaciona analiza je urađena između specifične aktivnosti ^{90}Sr u zemljištu i usevima, koncentracije Sr i Ca u zemljištu i usevima i fizičko-hemijskih osobina zemljišta. U tablicama korelacija predstavljenih u Prilogu I, prikazane su samo korelacije sa nivoom značajnosti manjim od 0,001; 0,01 i 0,05.

Za zemljište oglednog polja Radmilovac dobijene su značajne pozitivne korelacije ($p < 0,05$) između aktivnosti ^{90}Sr u zemljištu u prvoj i drugoj sezoni ispitivanja tokom godine za sloj zemljišta 15-30 cm, kao i između aktivnosti ^{90}Sr u korenu useva i zemljištu na dubini 0-15 cm, tj. oko korenovog sistema. Aktivnost ^{90}Sr u korenu useva je pokazala značajnu korelaciju sa njegovom aktivnošću u ostalim biljnim organima, što ukazuje na akropetalnu translokaciju ovog radionuklida u ispitanim usevima, ali i sa sadržajem ukupnog Sr u korenu. Osim toga, značajna korelacija je dobijena između sadržaja ukupnog Sr i Ca u usevima. Uticaj karakteristika zemljišta na varijacije aktivnosti ^{90}Sr u zemljištu i usevima je ukazao na značajnu zavisnost između aktivnosti ^{90}Sr u usevima i fizičkih osobina zemljišta, tj. mehaničkih frakcija (krupnog i sitnog peska, kao i gline), zatim vlažnosti zemljišta i hemijskih osobina zemljišta (sadržaja humusa i ukupnog organskog ugljenika, kao i njegovog sadržaja u humičnim i fulvičnim kiselinama). Koncentracije ukupnih Sr i Ca su pokazale značajne korelacije sa frakcijama zemljišta fine strukture - praha i gline, kao i sa pH vrednosti zemljišta.

Za zemljište oglednog polja Rimski Šančevi dobijene su značajne korelacije ($p < 0,001$) između aktivnosti ^{90}Sr u zemljištu u prvoj i drugoj sezoni ispitivanja tokom godine, aktivnosti ^{90}Sr u zemljištu i usevima, kao i koncentracije ukupnih Sr i Ca u zemljištu i usevima. Značajne korelacije su utvrđene između aktivnosti ^{90}Sr , ukupnih Sr

i Ca u zemljištu i fizičko-hemijskih karakteristika zemljišta: sadržaja gline, vlažnosti, gustine, sadržaja humusa i organskog ugljenika. Aktivnost ovog radionuklida, kao i koncentracija ukupnih Sr i Ca u usevima su pokazali takođe značajne korelacije sa fizičko-hemijskim karakteristikama zemljišta: frakcijama sitnog peska, praha i gline, vlažnosti i gustom, sadržajem humusa i pH vrednosti u KCl.

Na osnovu prikazanih korelacija može se zaključiti da fizičko-hemijske karakteristike zemljišta imaju uticaj na ponašanje radionuklida ^{90}Sr u terestričkom ekosistemu. Mera uticaja zavisi od kompleksnosti interakcija usled brojnih procesa u zemljištu koji se dešavaju istovremeno, kao i od celokupnih uslova životne sredine. Takođe je utvrđeno da je u zemljištu tipa černozem mnogo veći uticaj fizičko-hemijskih karakteristika zemljišta na translokaciju radionuklida ^{90}Sr u zemljištu i usevima, na šta naročito utiče sadržaj gline i humusa, kao i vlažnost zemljišta i pH vrednost. Ponašanje ovog radionuklida u zemljišnim profilima je zavisno od relativnog odnosa frakcija peska i gline u zemljištu, što je potvrđeno različitom teksturom zemljišta oglednih polja; na Radmilovcu zemljište je po teksturi praškasto glinovita ilovača, dok je na Rimskim Šančevima pretežno glinovita ilovača. U glinovitom zemljištu na brzinu migracije ^{90}Sr može uticati brzina infiltriranja u slojevima gline, jer ova frakcija zemljišta najviše adsorbuje radionuklide [2,51]. Pored sadržaja gline, veliki uticaj na ponašanje ^{90}Sr u zemljištu ima vlažnost zemljišta i sadržaj humusa, što je potvrđeno statistički značajnom korelacijom. Ovo je u skladu sa literaturnim podacima da huminske materije u glinovitom zemljištu olakšavaju interakcije između rastvorljivih oblika antropogenih radionuklida i čestica zemljišta, što omogućava njihovu pokretljivost u terestričkim ekosistemima [137]. Povezanost ^{90}Sr sa varijacijom vlažnosti zemljišta, tj. sadržajem higroskopske vlage bi mogla biti indirektno veza sa sastavom gline, s obzirom da negativni naboj većine minerala gline privlači molekule vode i na taj način stvara na svojoj površini higroskopsku vlagu [2].

Analiziran je, između ostalog, i uticaj osobina zemljišta na varijacije koncentracija anjona i katjona po dubini zemljišta. U analizu nisu bili uključeni fosfati, jer su oni detektovani u ekstraktu zemljišta samo na nekoliko lokacija oba ogledna polja.

Na oglednom polju Radmilovac, ni jedan od katjona (K^+ , Na^+ , NH_4^+ , Ca^{2+} i Mg^{2+}) nije bio u korelaciji sa fizičko-hemijskim osobinama zemljišta. Od analiziranih

anjona (nitrati, sulfati, hloridi i fluoridi) u oba sloja zemljišta, samo su fluoridi bili u korelaciji sa fizičkim osobinama, i to mehaničkim frakcijama zemljišta: krupnim peskom ($p < 0,01$, korelacioni koeficijent, $r = 0,92$ za sloj 0-15 cm; $p < 0,05$, $r = 0,77$ za sloj 15-30 cm) i sitnim peskom ($p < 0,05$, $r = 0,85$).

Na oglednom polju Rimski Šančevi, za sloj zemljišta 0-15 cm, katjoni su pokazali sledeće korelacije sa fizičko-hemijskim osobinama zemljišta: K^+ sa vlažnošću zemljišta ($p < 0,01$, $r = 0,92$) i sadržajem humusa ($p < 0,001$, $r = 0,99$), Na^+ sa sadržajem krupnog peska ($p < 0,05$, $r = -0,81$), NH_4^+ sa sadržajem gline ($p < 0,01$, $r = 0,91$), vlažnošću zemljišta i sadržajem humusa ($p < 0,05$, $r = 0,87$ i $r = 0,86$), Ca^{2+} sa sadržajem sitnog peska ($p < 0,05$, $r = 0,93$) i praha ($p < 0,05$, $r = -0,91$), Mg^{2+} sa vlažnošću zemljišta ($p < 0,05$, $r = 0,81$). Od anjona, sulfati su pokazali negativnu korelaciju sa sadržajem krupnog peska u zemljištu ($p < 0,001$, $r = -0,99$), fluoridi sa sadržajem organskog ugljenika u fulvičnim kiselinama ($p < 0,05$, $r = -0,89$) i hloridi sa sadržajem praha u zemljištu ($p < 0,05$, $r = 0,83$) i sadržajem organskog ugljenika u fulvičnim kiselinama ($p < 0,001$, $r = -0,96$). Za sloj zemljišta 15-30 cm, ni jedan od katjona (K^+ , Na^+ , NH_4^+ , Ca^{2+} i Mg^{2+}) nije bio u korelaciji sa fizičko-hemijskim osobinama zemljišta. Od anjona, sulfati su pokazali korelaciju sa sadržajem organskog ugljenika u humičnim i fulvičnim kiselinama ($p < 0,01$, $r = 0,94$ i $p < 0,05$, $r = -0,88$, redom), fluoridi sa sadržajem krupnog peska ($p < 0,05$, $r = -0,89$) i sadržajem organskog ugljenika u fulvičnim kiselinama ($p < 0,01$, $r = 0,95$) i hloridi sa sadržajem gline u zemljištu ($p < 0,05$, $r = -0,79$).

Na osnovu navedenih podataka korelacija sadržaja anjona i katjona i fizičko-hemijskih osobina zemljišta oglednih polja, nije uočena statistički značajna korelacija između sadržaja katjona u ekstrahovanom izluženom černozeu i fizičko-hemijskih karakteristika ispitivanog zemljišta, dok su za zemljište tipa černoze postojale određene korelacije. Neki od anjona su pokazali značajnu korelaciju sa ovim karakteristikama oba tipa zemljišta. Može se zaključiti da na varijaciju koncentracije anjona sa dubinom zemljišta najveći uticaj imaju mehaničke frakcije zemljišta.

4.9.1. Jednofaktorska analiza varijanse

Jednofaktorska analiza varijanse (ANOVA test) je primenjena za utvrđivanje postojanja razlika koje bi ukazale na eventualni uticaj primenjenih tehnologija u uzgajanju pšenice, useva koji je zastupljen na oba ogledna polja tokom godina ispitivanja. Za ispitivane parametre nivo značajnosti dobijen ANOVA analizom je prikazan u tabeli 4.39.

Primena jednofaktorske analize varijanse je ukazala na postojanje značajne razlike (nivo značajnosti manji od 0,001; 0,01 i 0,05) u aktivnostima ^{90}Sr , zatim koncentracijama Sr i Ca u zemljištu i pšenici, usevu koji se uzgaja na oba ogledna polja. Pomenute razlike mogu poticati od različitosti u tipu zemljišta i njihovih karakteristika, a osim toga bitna je i tehnologija gajenja useva, kao i primenjene agrotehničke mere. Rezultati ukazuju na to da bi se putem određenih parametara mogao pratiti i kontrolisati uticaj primene odgovarajućih agrotehničkih mera u okviru oglednih polja.

Tabela 4.39. Analiza varijanse pšenice u zavisnosti od oglednog polja

Parametar	p-vrednost
^{90}Sr (sloj 0-15 cm, sezona 1)	< 0,01
^{90}Sr (sloj 0-15 cm, sezona 2)	< 0,01
^{90}Sr (sloj 15-30 cm, sezona 1)	< 0,001
^{90}Sr (sloj 15-30 cm, sezona 2)	< 0,01
Sr (sloj 0-15 cm, sezona 2)	< 0,01
Sr (sloj 15-30 cm, sezona 2)	< 0,05
Ca (sloj 0-15 cm, sezona 2)	< 0,01
Ca (sloj 15-30 cm, sezona 2)	< 0,01
^{90}Sr u korenu	< 0,01
^{90}Sr u ostatku	< 0,01
Sr u korenu	< 0,01
Sr u ostatku	< 0,01
Ca u korenu	< 0,05
Ca u ostatku	< 0,05

4.10. Rezultati izračunavanja parametara radijacione sigurnosti

4.10.1. Transfer faktor obradivo zemljište - usev

Na osnovu rezultata specifičnih aktivnosti ^{90}Sr u usevima i poljoprivrednom zemljištu oglednih polja „Radmilovac” i „Rimski Šančevi”, upotrebom jednačine (3.11) izračunate su vrednosti transfer faktora zemljište - usev (TF) za radioizotop ^{90}Sr , koje su prikazane u tabelama 4.40 i 4.41. Za potrebe računanja vrednosti transfer faktora, korišćene su specifične aktivnosti ^{90}Sr za sloj zemljišta 0-15 cm, tj. zemljište oko korena biljke, uzorkovanog u sezoni kada se istovremeno uzorkuje i biljni materijal.

Tabela 4.40. Transfer faktor (TF) zemljište - usev za ^{90}Sr na oglednom polju Radmilovac

	TF					
	Oznaka lokacije					
Deo biljke	R1	R2	R3	R4	R5	R6
Pšenica	2013.					
Koren	0,577	0,560	0,550	0,428	0,289	0,322
Ostatak	0,171	0,172	0,181	0,142	0,127	0,140
Kukuruz	2014.					
Koren	0,437	0,494	0,341	0,673	0,439	0,538
Stablo	0,114	0,109	0,099	0,177	0,108	0,138
List	0,215	0,240	0,212	0,322	0,172	0,218
Plod	0,095	0,101	0,092	0,141	0,092	0,113
Pšenica	2015.					
Koren	0,757	0,566	0,579	0,766	0,326	0,378
Ostatak	0,182	0,142	0,142	0,188	0,110	0,134

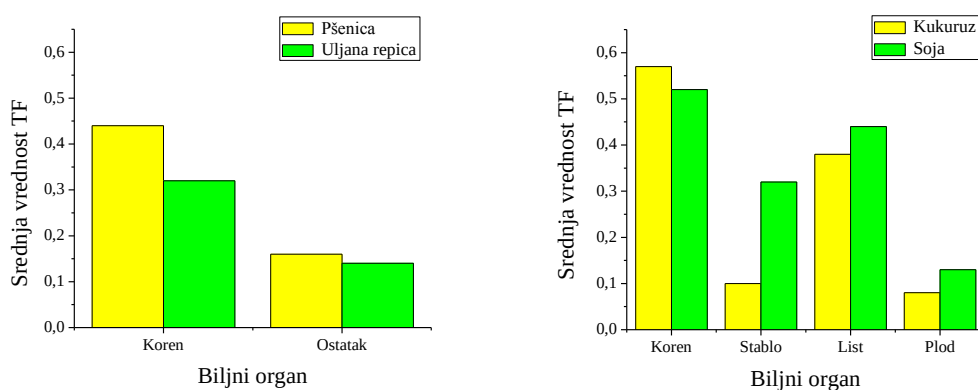
Rezultati prikazani u tabeli 4.40 za ogledno polje Radmilovac pokazuju da su vrednosti transfer faktora zemljište - usev za radionuklid ^{90}Sr u intervalu od 0,289 do 0,766 za koren pšenice i od 0,110 do 0,188 za ostatak (stablo+list+plod) pšenice. Za vegetativne i generativne organe kukuruza, vrednosti izračunatog faktora su u intervalu: od 0,341 do 0,673 za koren, 0,099 do 0,177 za stablo, 0,172 do 0,322 za list i 0,092 do 0,141 za plod.

Tabela 4.41. Transfer faktor (*TF*) zemljište - usev za ^{90}Sr na oglednom polju Rimski Šančevi (pšenica (*p*), kukuruz (*k*), soja (*s*), uljana repica (*ur*))

	TF				
	Oznaka lokacije				
Godina	2013.				
Deo biljke	NS1^p	NS4^p	NS5^p	NS9^p	NS10^{ur}
Koren	0,329	0,303	0,297	0,346	0,227
Ostatak	0,173	0,142	0,145	0,160	0,100
	NS2^k	NS3^s	NS6^s	NS7^s	NS8^s
Koren	0,540	0,484	0,435	0,420	0,504
Stablo	0,098	0,320	0,213	0,233	0,310
List	0,446	0,383	0,389	0,363	0,401
Plod	/	0,105	0,126	0,126	0,103
Godina	2014.				
Deo biljke	NS1^p	NS6^p	NS7^p	NS8^p	NS10^{ur}
Koren	0,394	0,322	0,524	0,433	0,338
Ostatak	0,186	0,147	0,256	0,198	0,162
	NS2^k	NS3^s	NS4^k	NS5^k	NS9^s
Koren	0,755	0,674	0,415	0,538	0,564
Stablo	0,122	0,421	0,070	0,095	0,293
List	0,529	0,528	0,298	0,457	0,498
Plod	/	0,124	/	/	0,089
Godina	2015.				
Deo biljke	NS1^p	NS4^p	NS5^p	NS9^p	NS10^{ur}
Koren	0,378	0,330	0,449	0,409	0,379
Ostatak	0,151	0,120	0,150	0,106	0,153
	NS2^k	NS3^s	NS6^k	NS7^k	NS8^k
Koren	0,777	0,579	0,517	0,766	0,811
Stablo	0,088	0,476	0,029	0,052	0,110
List	0,723	0,512	0,397	0,532	0,614
Plod	/	0,250	/	/	/

Rezultati prikazani u tabeli 4.41 za ogledno polje Rimski Šančevi pokazuju da su vrednosti transfer faktora zemljište - usev za radionuklid ^{90}Sr u intervalu: od 0,297 do 0,524 za koren pšenice i od 0,106 do 0,256 za ostatak (stablo+list+plod) pšenice; 0,415 - 0,811 za koren kukuruza, 0,029 - 0,122 za stablo kukuruza i 0,298 - 0,723 za list kukuruza; 0,420 - 0,674 za koren soje, 0,213 - 0,476 za stablo soje, 0,363 - 0,528 za list soje i 0,089 - 0,250 za plod soje; 0,227 - 0,379 za koren uljane repice i 0,100 - 0,162 za ostatak uljane repice. Obzirom da je specifična aktivnost ^{90}Sr u plodu svih ispitanih uzoraka kukuruza na oglednom polju Rimski Šančevi manja od vrednosti minimalne

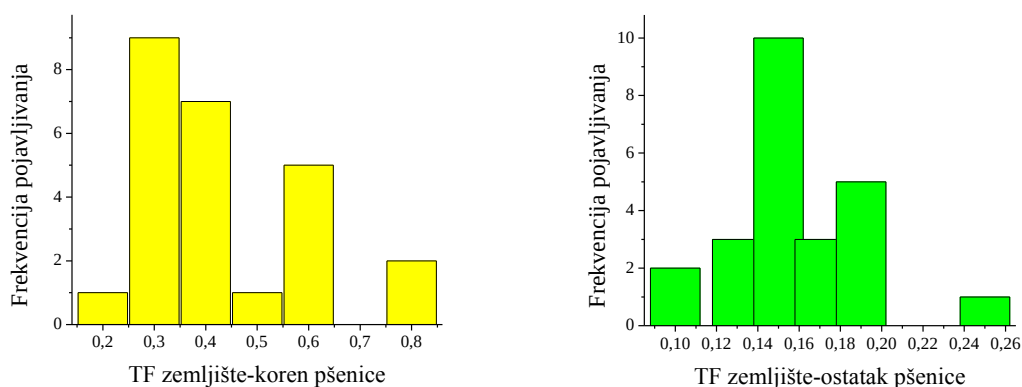
detektabilne aktivnosti, transfer faktor radionuklida ^{90}Sr nije izračunat za ovaj deo biljke. Srednje vrednosti transfer faktora zemljište - biljni organ useva za radionuklid ^{90}Sr , uzimajući u obzir oba ogledna polja su predstavljene grafički na slici 4.5. Najviše vrednosti ovog parametra su dobijene za soju (osim za koren), koja pripada leguminozama, te se može reći da leguminoze pokazuju veći afinitet za usvajanje ^{90}Sr iz zemljišta od žitarica i industrijskog bilja.



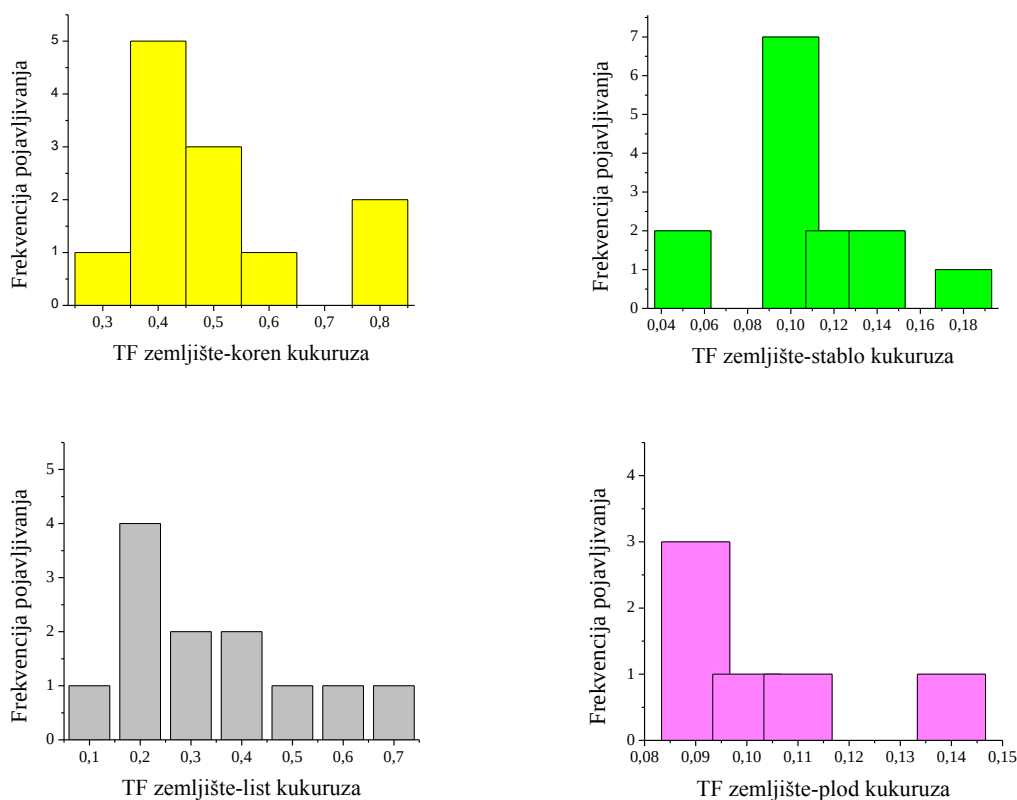
Slika 4.5. Bar-dijagram srednjih vrednosti transfer faktora zemljište - biljni organ useva za ^{90}Sr

Poređenjem vrednosti transfer faktora za pšenicu i kukuruz, useve koji su analizirani na oba ogledna polja, može se posmatrati frekvencija pojavljivanja određenog rezultata transfer faktora za analizirane biljne organe, koja je prikazana na slici 4.6 za pšenicu i slici 4.7 za kukuruz.

Ukoliko se posmatraju frekvencije pojavljivanja određenog rezultata transfer faktora za analizirane biljne organe pšenice i kukuruza (slike 4.6 i 4.7), uočava se pojavljivanje izraženog maksimuma za određenu vrednost, koja odgovara vrednosti za transfer faktor tog biljnog organa za najveći broj analiziranih uzoraka. Relativna frekvencija maksimalne vrednosti transfer faktora iznosi oko 40 % za biljne organe oba useva. Rezultati frekvencije pojavljivanja određene vrednosti transfer faktora zemljište - usev za radionuklid ^{90}Sr ukazuju na to da se oko 35 % ovog radionuklida apsorbira u korenu pšenice i oko 15 % u ostatku (stablo+list+plod), dok biljni organi kukuruza apsorbiraju ^{90}Sr u iznosu: oko 40 % koren, oko 10 % stablo, oko 20 % list i oko 9 % plod.



Slika 4.6. Frekvencija vrednosti transfer faktora zemljište - pšenica



Slika 4.7. Frekvencija vrednosti transfer faktora zemljište - kukuruz

Prikazani rezultati transfer faktora zemljište - usev za radionuklid ^{90}Sr ukazuju na to da se najveći deo aktivnosti akumulira u korenu useva, a manji deo translocira u ostale biljne organe, što je u skladu sa literaturnim podacima [114,117,119]. Ovo potvrđuje činjenicu da je glavni mehanizam akumulacije dugoživećih radionuklida u

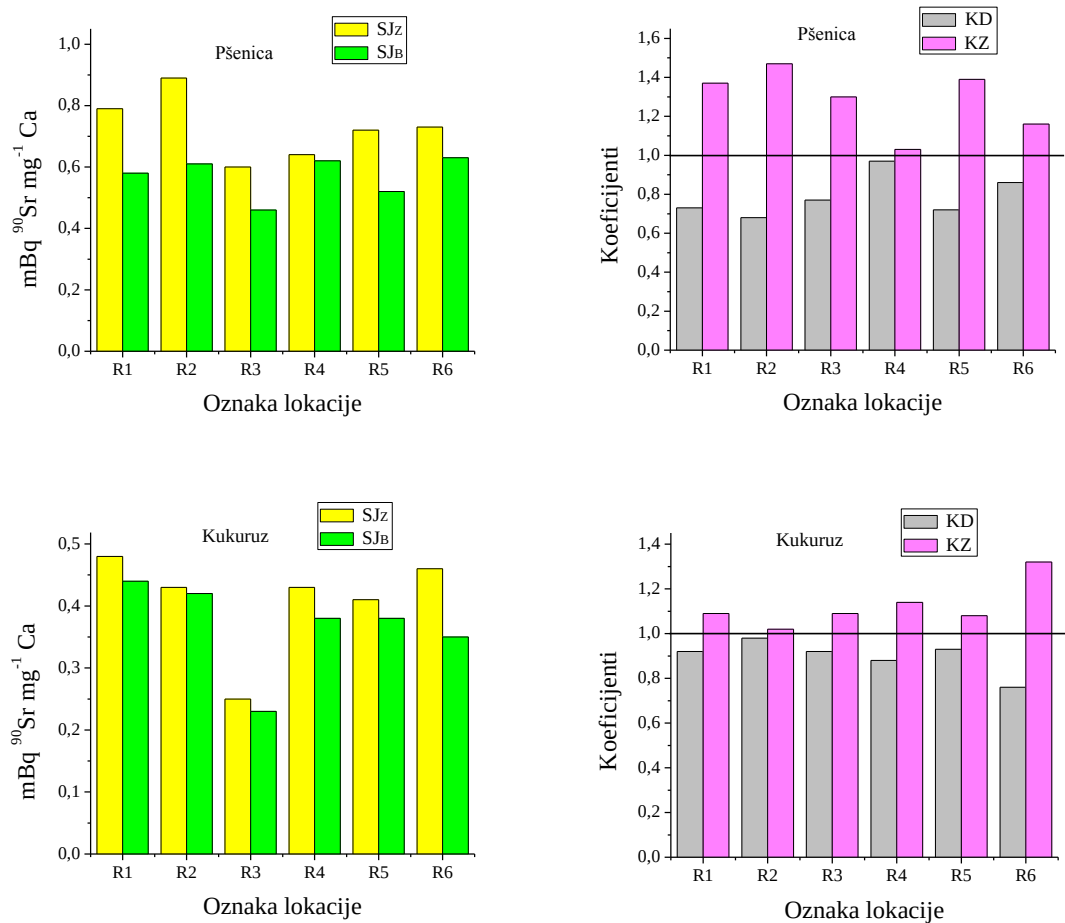
usevima, resuspenzija iz zemljišta [111,138]. Kada je reč o distribuciji i akumulaciji različitih radionuklida u biljkama, postoje značajne razlike ne samo u distribuciji, već i u njihovoj akumulaciji. Translokacija iz korena u nadzemne delove biljke je intenzivnija za radionuklide ^{90}Sr i ^{137}Cs , nego za trovalentne radionuklide retkih zemalja ili ^{239}Pu [132]. Ako se pak uporedi akumulacija dva najznačajnija veštačka radionuklida sa dužim vremenom poluraspada (^{90}Sr i ^{137}Cs), Sarap i saradnici su pokazali da analizirani usevi akumuliraju više ^{90}Sr nego ^{137}Cs ; vrednosti transfer faktora su znatno niže za ^{137}Cs i iznose od 0,01 do 0,43 [121,122].

Vrednosti transfer faktora zemljište - usev za radionuklid ^{90}Sr , prikazane u ovoj studiji su u skladu sa rezultatima navedenim u svetskoj literaturi [110,111,114,119]. Obzirom da ovaj parametar predstavlja relevantan bioindikator za proveru radijacionog zagađenja sistema zemljište - biljna kultura, dobijeni rezultati su ukazali na akumulaciju radionuklida ^{90}Sr u ispitivanim usevima oglednih polja. Ovo istovremeno ukazuje da usevi, koji se gaje na području ispitanih oglednih polja u Republici Srbiji, nisu značajnije kontaminirani ovim radionuklidom.

4.10.2. Ostali parametri radijacione sigurnosti

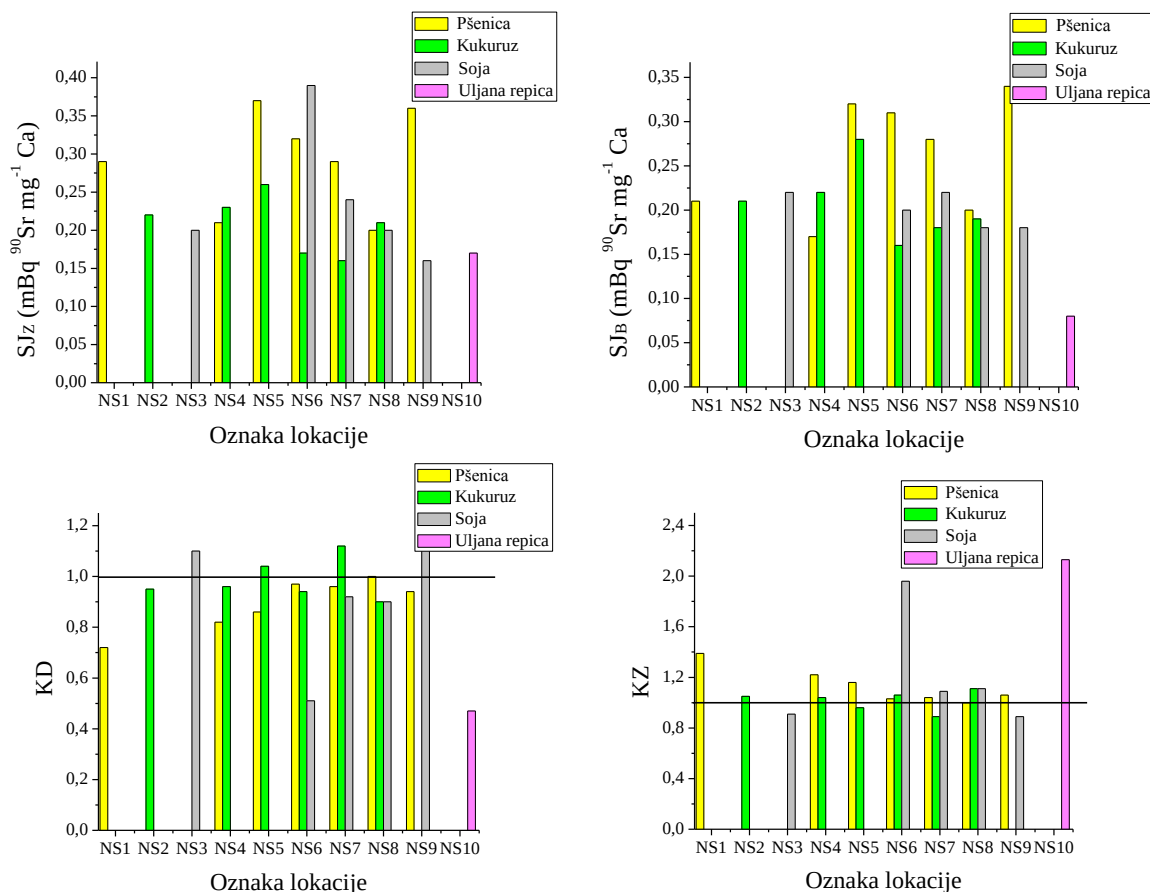
Pokazatelji radijacione sigurnosti istraživanih prostora, osim transfer faktora zemljište - usev za radionuklid ^{90}Sr su i parametri: broj stroncijumovih jedinica (jednačina 3.12), koeficijent diskriminacije (jednačina 3.13), koeficijent zaštite (jednačina 3.14) i K-parametar (jednačina 3.15).

Na osnovu određenih specifičnih aktivnosti ^{90}Sr i koncentracija Ca u poljoprivrednom zemljištu (sloj 0-15 cm oko korena biljke) i nadzemnom delu useva, izračunate su vrednosti radijacionih parametara za radionuklid ^{90}Sr za ogledna polja „Radmilovac” i „Rimski Šančevi”. Ovi parametri predstavljaju objektivni pokazatelj tranfera i odnosa ^{90}Sr i Ca u agroekosistemu. Srednje vrednosti ovih parametara za tri godine praćenja distribucije ^{90}Sr i Ca u zemljištu i usevima za ispitivane lokacije oglednog polja Radmilovac su prikazane na slici 4.8, a za lokacije oglednog polja Rimski Šančevi na slici 4.9, pri čemu su oznake parametara sledeće: SJ_Z - broj stroncijumovih jedinica za zemljište, SJ_B - broj stroncijumovih jedinica za biljke, KD - koeficijent diskriminacije i KZ - koeficijent zaštite.



Slika 4.8. Bar-dijagram srednjih vrednosti parametara SJ_z , SJ_b , KD i KZ (Radmilovac)

Vrednosti ovih parametara (slika 4.8, ogledno polje Radmilovac) su: broj stroncijumovih jedinica za zemljište je u intervalu od 0,25 do 0,79 $\text{mBq } ^{90}\text{Sr mg}^{-1} \text{Ca}$, broj stroncijumovih jedinica za useve je u intervalu od 0,23 do 0,63 $\text{mBq } ^{90}\text{Sr mg}^{-1} \text{Ca}$, koeficijent diskriminacije od 0,68 do 0,98, dok su vrednosti za koeficijent zaštite u intervalu od 1,02 do 1,47. Srednja vrednost broja stroncijumovih jedinica za zemljište je 0,60 $\text{mBq } ^{90}\text{Sr mg}^{-1} \text{Ca}$, dok su srednje vrednosti broja stroncijumovih jedinica za pšenicu 0,57 $\text{mBq } ^{90}\text{Sr mg}^{-1} \text{Ca}$ i 0,37 $\text{mBq } ^{90}\text{Sr mg}^{-1} \text{Ca}$ za kukuruz. Sa slike 4.8 se vidi da su vrednosti koeficijenta diskriminacije manje od jedinice, dok su shodno tome vrednosti koeficijenta zaštite veće od jedinice za oba useva. Može se zaključiti da nema značajnih varijacija u pogledu vrednosti ovih parametara za pšenicu, niti za kukuruz.



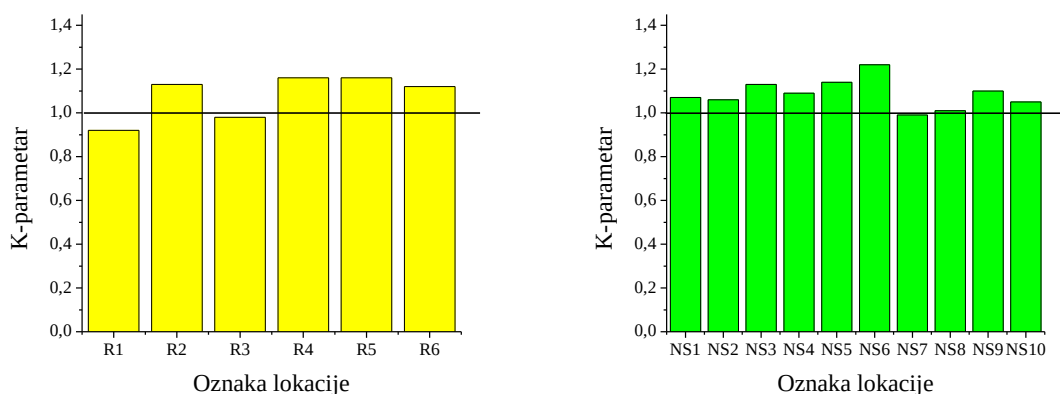
Slika 4.9. Bar-dijagram srednjih vrednosti parametara SJ_z, SJ_b, KD i KZ (Rimski Šančevi)

Vrednosti parametra broj stroncijumovih jedinica za ogledno polje Rimski Šančevi (slika 4.9) su: za zemljište u intervalu od 0,16 do 0,39 mBq ⁹⁰Sr mg⁻¹ Ca i za useve u intervalu od 0,08 do 0,34 mBq ⁹⁰Sr mg⁻¹ Ca. Srednja vrednost broja stroncijumovih jedinica za zemljište je 0,24 mBq ⁹⁰Sr mg⁻¹ Ca, dok su srednje vrednosti broja stroncijumovih jedinica za pšenicu, kukuruz, soju i uljanu repicu, redom: 0,26 mBq ⁹⁰Sr mg⁻¹ Ca, 0,21 mBq ⁹⁰Sr mg⁻¹ Ca, 0,20 mBq ⁹⁰Sr mg⁻¹ Ca i 0,08 mBq ⁹⁰Sr mg⁻¹ Ca. Najniže vrednosti ovog parametra su dobijene za uljanu repicu, što ukazuje da uljana repica u odnosu na druge ispitane useve, sporije akumulira ⁹⁰Sr od kalcijuma iz zemljišta. Na osnovu vrednosti koeficijenata diskriminacije (0,47 do 1,12) i zaštite (0,89 do 2,13), očigledno je da postoje varijacije ovih parametara u odnosu na vrstu useva.

Vrednosti diskriminacionih koeficijenata dobijene u ovoj studiji su u skladu sa literaturnim vrednostima koje su u intervalu od 0,7 do 1,3 [37]. Poređenjem rezultata izračunatih parametara radijacione sigurnosti, utvrđeno je da su niže vrednosti dobijene

za ogledno polje Rimski Šančevi. Jedan od razloga je taj što su koncentracije Ca daleko veće u zemljištu oglednog polja Rimski Šančevi. Time je takođe potvrđeno da su vrednosti ovih parametara zavisne od vrste zemljišta i useva, kao i od sadržaja Ca u zemljištu, a posledično i u usevima [37].

Osim navedenih parametara, na osnovu vrednosti specifičnih aktivnosti ^{90}Sr u dva sloja poljoprivrednog zemljišta (0-15 i 15-30 cm), izračunat je K-parametar, čije su srednje vrednosti prikazane na slici 4.10.



Slika 4.10. Bar-dijagram srednje vrednosti K-parametra (levo - Radmilovac, desno - Rimski Šančevi)

Izračunavanje K-parametra je bilo u cilju određivanja efekta depozicije radionuklida ^{90}Sr na ispitivanim lokalitetima. Sa slike 4.10 se može videti da su srednje vrednosti ovog parametra na većini lokacija veće od 1, što dovodi do zaključka da na tim lokacijama postoji opadajući gradijent ^{90}Sr u ispitivanom profilu zemljišta. Na dve lokacije oglednog polja Radmilovac i jednoj lokaciji oglednog polja Rimski Šančevi vrednost ovog parametra je malo niža od jedinice, tako da se može smatrati da i na ovim lokacijama postoji opadajući gradijent, s obzirom da se radi o poljoprivrednom zemljištu u kome postoji mogućnost da prilikom obrade dođe do mešanja slojeva zemljišta.

4.11. Primena modela za procenu migracije ^{90}Sr u sistemu zemljište - biljka

Za potrebe modelovanja, vrednosti ulaznih parametara opisanih u prethodnom poglavlju, $K_c (^{90}\text{Sr}^{2+} / \text{Ca}^{2+})$ i α_{ex} za odgovarajuće tipove zemljišta su preuzete iz studije

Sysoeva i sar. [139], dok su vrednosti *CEC* parametra preuzete iz studije Dragović i sar. [140]. Krogh i saradnici su pokazali u studiji [141] da se vrednost za fizičko-hemijski parametar *CEC* može dobiti računskim putem pomoću pedotransfer funkcije, ukoliko su poznate vrednosti za sadržaj organske materije i sadržaj gline u zemljištu. Izračunate vrednosti upotrebom ove funkcije su u skladu sa podacima studije [140]. Za zemljište oglednog polja Radmilovac (izluženi černozem), korišćene vrednosti ulaznih parametara su: 2,1 za K_c ($^{90}\text{Sr}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$), 0,7 za α_{ex} i 30 cmol kg^{-1} za *CEC*, dok su vrednosti za ogledno polje Rimski Šančevi (černozem) 1,9, 0,7 i 32 cmol kg^{-1} , redom.

U tabelama 4.42 i 4.43 dato je poređenje vrednosti transfer faktora zemljište - usev, koje su dobijene primenom modela [123] i eksperimentalnim određivanjem. Na oglednom polju Radmilovac gajeni usevi su pšenica (2013. i 2015.) i kukuruz (2014.). Na oglednom polju Rimski Šančevi gajeni usevi u periodu ispitivanja (2013 - 2015.) su: pšenica (NS1) , kukuruz (NS2), soja (NS3) i uljana repica (NS10), dok je na preostalim lokacijama rotacija useva opisana u tabeli 3.4.

Tabela 4.42. Poređenje rezultata transfer faktora zemljište - usev za ^{90}Sr za ogledno polje Radmilovac, dobijenih primenom modela (TF_{mod}) i eksperimentalnim određivanjem (TF_{eks})

Oznaka lokacije	2013.		2014.		2015.	
	TF_{mod}	TF_{eks}	TF_{mod}	TF_{eks}	TF_{mod}	TF_{eks}
R1	0,134	0,171	0,117	0,114	0,183	0,182
R2	0,138	0,172	0,099	0,109	0,113	0,142
R3	0,148	0,181	0,131	0,099	0,111	0,142
R4	0,149	0,142	0,119	0,177	0,139	0,188
R5	0,197	0,127	0,115	0,108	0,152	0,110
R6	0,196	0,140	0,116	0,138	0,149	0,134

Iz tabela se uočava da vrednosti TF zemljište - usev za ^{90}Sr , dobijene korišćenjem modela pokazuju relativno dobro slaganje sa eksperimentalno određenim vrednostima. Odstupanje rezultata modelovanja od eksperimentalno određenih vrednosti se može pripisati tome što je u modelu kao aproksimacija uzeto da su svi jonoizmenjivački centri u zemljištu zauzeti jonima kalcijuma (tj. da je koncentracija izmenjivog kalcijuma jednaka *CEC* parametru). Takođe, pretpostavka modela je da biljka ^{90}Sr usvaja jedino preko korenovog sistema, što nije jedini oblik usvajanja kod

svih useva. Neke useve karakteriše dvojni mehanizam kojim biljna kultura može usvajati nutrijente (preko korena i preko lišća), što rezultuje u relativno velikoj koncentraciji aktivnosti ^{90}Sr u pojedinačnim biljnim organima.

Tabela 4.43. Poređenje rezultata transfer faktora zemljište - usev za ^{90}Sr za ogledno polje Rimski Šančevi, dobijenih primenom modela (TF_{mod}) i eksperimentalnim određivanjem (TF_{eks})

Oznaka lokacije	2013.		2014.		2015.	
	TF_{mod}	TF_{eks}	TF_{mod}	TF_{eks}	TF_{mod}	TF_{eks}
NS1	0,248	0,173	0,223	0,186	0,188	0,151
NS2	0,086	0,098	0,076	0,122	0,053	0,088
NS3	0,311	0,320	0,394	0,421	0,386	0,303
NS4	0,221	0,142	0,079	0,070	0,171	0,120
NS5	0,230	0,145	0,084	0,095	0,157	0,150
NS6	0,230	0,213	0,217	0,147	0,026	0,029
NS7	0,260	0,233	0,230	0,256	0,032	0,052
NS8	0,290	0,310	0,215	0,198	0,064	0,110
NS9	0,218	0,160	0,245	0,253	0,122	0,106
NS10	0,108	0,100	0,225	0,162	0,190	0,153

Poređenjem izračunatih vrednosti transfer faktora i vrednosti dobijenih korišćenjem modela usvajanja predloženog od strane Maskalchuk i saradnika [123], uočeno je relativno dobro slaganje, što ukazuje da korišćeni model može dobro da predvidi migraciju ^{90}Sr iz zemljišta u biljne kulture.

5. ZAKLJUČAK

➤ U literaturi su opisane različite metode za određivanje aktivnosti ^{90}Sr u uzorcima iz životne sredine, tj. različite analitičko-hemijske tehnike za izdvajanje ^{90}Sr . U ovoj disertaciji za određivanje aktivnosti ^{90}Sr u uzorcima zemljišta i biljnih kultura metodom spektrometrije beta zračenja, izabrana je radiohemijska analitička metoda, koja je modifikacija standardne metode, te je u skladu sa tim i validovana. Rezultati validacije su pokazali da su zadovoljeni kriterijumi ocene za ispitivane analitičke parametre validacije metode. Ova metoda se pokazala kao vrlo efikasna za određivanje aktivnosti ^{90}Sr u uzorcima iz životne sredine, daje zadovoljavajuće rezultate i istovremeno je, zbog jednostavnosti hemijskih operacija, ekonomična i tehnički lako ostvarljiva. Negativna strana ove metode je dug period uravnotežavanja ^{90}Sr - ^{90}Y .

➤ U ovoj studiji prikazani su rezultati praćenja distribucije radionuklida ^{90}Sr u poljoprivrednom zemljištu oglednih polja „Radmilovac” u Beogradu i „Rimski Šančevi” u Novom Sadu u periodu od 2013. do 2015. godine. Rezultati određivanja aktivnosti ^{90}Sr su ukazali da nema drastičnijih odstupanja među dobijenim vrednostima, uzimajući u obzir mesta sakupljanja uzoraka i primenjene agrotehničke i meliorativne mere u toku obrade zemljišta; srednje vrednosti specifičnih aktivnosti ^{90}Sr su nešto niže u zemljištu oglednog polja Rimski Šančevi. Takođe, rezultati su ukazali i na migraciju ovog radionuklida u oraničnom horizontu zemljišta oba ogledna polja. Uočen je trend opadanja srednjih aktivnosti tokom godina ispitivanja, što je najverovatnije posledica sistematskog usvajanja od strane biljnih kultura. Navedene vrednosti su ukazale na činjenicu da je ^{90}Sr koji potiče od atmosferskih nuklearnih proba i Černobiljskog akcidenta, još uvek prisutan u životnoj sredini istraživanog prostora. Dobijeni rezultati su u skladu sa literaturnim podacima.

➤ Na oglednom polju Radmilovac nije uočen uticaj tehnologije gajenja na aktivnost ^{90}Sr u usevima. Na oglednom polju Rimski Šančevi takođe, nisu uočene varijacije aktivnosti ovog radionuklida u usevima u okviru različitih sistema gajenja. Ustanovljena je određena translokacija aktivnosti ^{90}Sr u pojedinačnim biljnim organima useva. U pšenici i uljanoj repici je aktivnost ^{90}Sr veća u korenu, nego u ostatku biljke, s tim što pšenica kao žitarica više usvaja ovaj radionuklid od uljane

repice. U kukuruзу i soji redosled raspodele aktivnosti ^{90}Sr je sledeći: koren>list>stablo>plod. Soja usvaja više ovaj radionuklid od kukuruза, što je u skladu sa u ranijoj literaturi uočenim povećanim usvajanjem ovog radionuklida od strane leguminoza.

➤ Primenom linearne korelacione analize utvrđeni su dominantni fizičko-hemijski, hemijski i pedološki parametri koji utiču na migraciju ^{90}Sr . Rezultati analize su ukazali na postojanje statistički značajnih korelacija aktivnosti ^{90}Sr , kao i ukupnog Sr i Ca sa fizičko-hemijskim karakteristikama zemljišta na ispitivanim lokalitetima, sa nivoom značajnosti: $p < 0,001$; 0,01 i 0,05. Na osnovu analize korelacija, može se zaključiti da je sadržaj humusa značajan faktor koji utiče na sorpciju radioizotopa ^{90}Sr u oraničnom sloju zemljišta, odnosno njegova komponenta fulvična kiselina. Razlog za to je što fulvične kiseline mogu sa katjonima u zemljištu da obrazuju komplekse, koji povećavaju njihovu rastvorljivost i pokretljivost, čime se ujedno može povećati i pristupačnost neposredno u zoni rizosfere useva. Takođe, humusne materije olakšavaju interakcije između rastvorljivih oblika radionuklida ^{90}Sr i čestica zemljišta, što je omogućilo migraciju ovog radionuklida u zemljištu. Zatim, raspodela ^{90}Sr i njegova migracija u obradivom zemljištu značajno zavise i od sadržaja glinovite frakcije zemljišta, jer se ona odlikuje sposobnošću izmene katjona. Rezultati korelacione analize su ukazali na povezanost aktivnosti ^{90}Sr i njegovog ponašanja sa higroskopnom vlažnošću zemljišta, što je najverovatnije indirektna veza sa frakcijom zemljišta fine strukture - glinom. Primenom jednofaktorske analize varijanse (ANOVA test) utvrđeno je postojanje značajnih razlika (nivo značajnosti manji od 0,001; 0,01 i 0,05) u aktivnostima ^{90}Sr , zatim koncentracijama Sr i Ca u zemljištu i pšenici, usevu koji se uzgaja na oba ogledna polja. Pomenute razlike mogu poticati od fizičko-hemijskih karakteristika zemljišta na oglednim poljima, primenjenih agrotehničkih mera, ali i tehnologije gajenja useva.

➤ Izračunati transfer faktori zemljište - usev za radionuklid ^{90}Sr ukazuju na to da se najveći deo aktivnosti akumulira u korenu useva, a manji deo translocira u ostale biljne organe, što potvrđuje da je resuspenzija iz zemljišta glavni mehanizam akumulacije ovog radionuklida. Na osnovu vrednosti broja stroncijumovih jedinica zaključuje se da brzina akumulacije ^{90}Sr u odnosu na Ca iz zemljišta, zavisi od vrste

useva. Vrednosti koeficijenata diskriminacije i zaštite ukazuju na postojanje zavisnosti od vrste useva. Osim toga, potvrđeno je da su vrednosti ovih parametara zavisne od vrste zemljišta, kao i od sadržaja Ca u zemljištu i usevima. Izračunavanjem K-parametra određen je efekat depozicije radionuklida ^{90}Sr na ispitivanim lokalitetima, na osnovu čega je zaključeno da postoji opadajući gradijent ^{90}Sr u ispitivanom profilu zemljišta.

➤ Rezultati modelovanja migracije ^{90}Sr iz zemljišta u nadzemni deo useva su pokazali relativno dobro slaganje sa vrednostima transfer faktora zemljište - usev, izračunatim na osnovu eksperimentalno određene aktivnosti ^{90}Sr . Ovo je ukazalo da korišćeni model usvajanja, predložen od strane Maskalchuk i saradnika može dobro da predvidi migraciju ^{90}Sr iz zemljišta u biljne kulture.

Istraživanja sprovedena u okviru ove doktorske disertacije, omogućila su potpuniji uvid o distribuciji ^{90}Sr u poljoprivrednom zemljištu i usevima ispitivanih područja u Republici Srbiji. Ujedno, dobijeni rezultati predstavljaju inicijalnu bazu podataka na osnovu koje bi se mogle predvideti varijacije u nivou veštačke radioaktivnosti u agroekosistemu, s obzirom da ovakve studije do sada nisu sprovedene u Republici Srbiji.

6. LITERATURA

1. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), *Sources and effects of ionizing radiation*. UNSCEAR 2008, Report to the General Assembly with Scientific Annexes, United Nations, New York, 2010.
2. Društvo za zaštitu od zračenja Srbije i Crne Gore, Monografija: *Černobilj 30 godina posle*. Institut za nuklearne nauke „Vinča” i Društvo za zaštitu od zračenja Srbije i Crne Gore, Beograd, 2016.
3. G. Shaw, *Radioactivity in the Environment, Introduction*. Vol. 10, Elsevier, 2007.
4. S. Dragović, N. Mihailović, B. Gajić, *Quantification of transfer of ^{238}U , ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K and ^{137}Cs in mosses of a semi-natural ecosystem*. J Environ Radioactiv 101 (2010) 159-164.
5. J. Koch, J. Tadmor, *RADFOOD - A Dynamic Model for Radioactivity Transfer Through the Human Food Chain*. Health Phys 50 (1986) 1721-1737.
6. F.W. Whicker, T.B. Kirchner, *PATHWAY: A Dynamic Food-Chain Model to Predict Radionuclide Ingestion After Fallout Deposition*. Health Phys 52 (1987) 717-737.
7. H. Müller, G. Pröhl, *ECOSYS-87: A Dynamic Model for Assessing Radiological Consequences of Nuclear Accidents*. Health Phys 64 (1993) 232-252.
8. J. Brown, J.R. Simmonds, *FARMLAND: A Dynamic Model for the Transfer of Radionuclides Through Terrestrial Foodchains*. Report NRPB-R273, Chilton, 1995.
9. A.P. Moller, T.A. Mousseau, *Conservation consequences of Chernobyl and other nuclear accidents*. Biol Conserv 144 (2011) 2787-2798.
10. International Atomic Energy Agency (IAEA). *Programmes and Systems for Source and Environmental Radiation Monitoring*. Safety Report Series No. 64, IAEA, Vienna, 2005.
11. P. Chamard, R.H. Velasco, M. Belli, G.D. Silvestro, G. Ingraio, U. Sansone, *Cesium-137 and strontium-90 distribution in a soil profile*. Sci Total Environ 136 (1993) 251-258.
12. N.H. Quang, N.Q. Long, D.B. Lieu, T.T. Mai, N.T. Ha, D.D. Nhan, P.D. Hien, *$^{239+240}\text{Pu}$, ^{90}Sr and ^{137}Cs inventories in surface soils of Vietnam*. J Environ Radioactiv 75 (2004) 329-337.

13. D. Krstić, D. Nikezić, N. Stevanović, M. Jelić, *Vertical profile of ^{137}Cs in soil*. Appl Radiat Isotopes 61 (2004) 1487-1492.
14. G.G. Matishov, D.G. Matishov, N.E. Kasatkina, I.S. Usyagina, M.M. Kuklina, *Analysis of distribution of artificial radionuclides in the ecological system of Barents Sea*. Dokl Biol Sci 404 (2005) 375-378.
15. J.M. Fernandez, E. Piault, D. Macouillard, C. Juncos, *Forty years of ^{90}Sr in situ migration: importance of soil characterization in modeling transport phenomena*. J Environ Radioactiv 87 (2006) 209-226.
16. T. Watanabe, N. Tsuchiya, Y. Oura, M. Ebihara, C. Inoue, N. Hirano, R. Yamada, S. Yamasaki, A. Okamoto, F. Watanabe, K. Nunohara, *Distribution of artificial radionuclides ($^{110\text{m}}\text{Ag}$, $^{129\text{m}}\text{Te}$, ^{134}Cs , ^{137}Cs) in surface soils from Miyagi Prefecture, northeast Japan, following the 2011 Fukushima Dai-ichi nuclear power plant accident*. Geochem J 46 (2012) 279-285.
17. O.E. Samad, R. Baydoun, B. Nsouli, T. Darwish, *Determination of natural and artificial radioactivity in soil at North Lebanon province*. J Environ Radioactiv 125 (2013) 36-39.
18. E. Lokas, P. Bartmiński, P. Wachniev, J.W. Mietelski, T. Kawiak, J. Srodoń, *Sources and pathways of artificial radionuclides to soils at a High Arctic site*. Environ Sci Pollut Res Int 21 (2014) 12479-12493.
19. J. Guillen, A. Baeza, J.A. Corbacho, J.G. Munoz-Munoz, *Migration of ^{137}Cs , ^{90}Sr , and $^{239+240}\text{Pu}$ in Mediterranean forests: influence of bioavailability and association with organic acids in soil*. J Environ Radioactiv 144 (2015) 96-102.
20. N. Kavasi, S.K. Sahoo, A. Sorimachi, S. Tokonami, T. Aono, S. Yoshida, *Measurement of ^{90}Sr in soil samples affected by the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident*. J Radioanal Nucl Ch 303 (2015) 2565-2569.
21. J.W. Mietelski, R. Kierepko, E. Łokas, A. Cwanek, K. Kleszcz, E. Tomankiewicz, T. Mróz, R. Anczkiewicz, M. Szałkowski, B. Wąs, M. Bartyzel, R. Misiak, *Combined, sequential procedure for determination of ^{137}Cs , ^{40}K , ^{63}Ni , ^{90}Sr , $^{230,232}\text{Th}$, $^{234,238}\text{U}$, ^{237}Np , $^{238,239+240}\text{Pu}$ and ^{241}Am applied for study on contamination of soils near Żarnowiec Lake (northern Poland)*. J Radioanal Nucl Ch 310 (2016) 661-670.

22. H. Al-Qasbi, G.T.W. Law, L.K. Fifield, F.R. Livens, *Origin of artificial radionuclides in soil and sediment from North Wales*. J Environ Radioactiv 151 (2016) 244-249.
23. G. Choppin, J.O. Liljezin, J. Rydberg, C. Ekberg, *Radiochemistry and Nuclear Chemistry*. 4th edition, Academic Press, Amsterdam, 2013.
24. G. Friedlander, J.W. Kennedy, *Nuklearna i radiohemija*. Naučna knjiga, Beograd, 1962.
25. I. Aničin, Đ. Bek-Uzarov, P. Bojović, I. Draganić, Z. Draganić, O. Jovanović, Đ. Krmpotić, J. Martinović, M. Mladenović, M. Vojinović, *Radioaktivni izotopi i zračenja*. Knjiga I: Opšti pojmovi, treće izmenjeno i dopunjeno izdanje, RO Institut za nuklearne nauke „Boris Kidrič”, Vinča, Beograd, 1981.
26. P. Osmokrović, *Osnovi nuklearne fizike*. Akademska misao, Beograd, 2008.
27. Službeni glasnik Republike Srbije, *Zakon o zaštiti od jonizujućih zračenja i o nuklearnoj sigurnosti*. Broj 36, Beograd, 2009.
28. H. Cember, *Introduction to Health Physics*. Third edition, USA, 1976.
29. H. Blatz, *Radiation Hygiene Handbook*. 1st edition, McGraw-Hill Book Company, London, 1959.
30. Technical Reports Series 295, *Measurement of radionuclides in food and the environment*. A Guidebook, International Atomic Energy Agency (IAEA), Vienna, 1989.
31. S. Cohen and Associates, McLean, VA, *Draft for Review Only, Public Health Goal for Strontium-90 in Drinking Water*. Pesticide and Environmental Toxicology Branch, Office of Environmental Health Hazard Assessment, California Environmental Protection Agency, 2005.
32. I. Filipović, S. Lipanović, *Opća i anorganska kemija*. Školska knjiga, Zagreb, 1988.
33. G. Mičić, *Radioaktivni metaboliti (⁴⁰K, ⁹⁰Sr) u ciklusu proizvodnje mleka i kiselo-mlečnih proizvoda*. Magistarska teza, Univerzitet u Beogradu, Veterinarski fakultet, Beograd, 1981.
34. Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR), *Toxicological profile for strontium*. U.S. Department of health and human services, Public Health Service, Toxicology Information Branch, 2004.

35. A. Aarkrog, *Input of anthropogenic radionuclides into the World Ocean*. Deep Sea Res 50 (2003) 2597-2606.
36. R. Právělie, *Nuclear Weapons Tests and Environmental Consequences: A Global Perspective*. AMBIO 43 (2014) 729-744.
37. R. Brnović, *Stroncijum 90 u životnoj sredini čoveka*. Magistarski rad, Farmaceutsko-biokemijski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Beograd 1972.
38. I. Friberg, *Development and application of a method for the determination of ^{90}Sr in environmental samples*. J Radioanal Nucl Ch 226 (1997) 55-60.
39. R.A. Tinker, J.D. Smith, M.B. Cooper, *Determination of Strontium-90 in Environmental Samples Containing Thorium*. Analyst 122 (1997) 1313-1317.
40. J.M. Torres, M. Liaurado, G. Rauret, M. Bickel, T. Altitzoglou, R. Pilvio, *Determination of ^{90}Sr in aquatic organisms by extraction chromatography: method validation*. Anal Chim Acta 4 (2000) 101-111.
41. P. Froidevaux, K. Friedrich-Benet, J.F. Valley, *Simple determination of ^{90}Sr in water in environmental radioactivity survey*. J Radioanal Nucl Ch 261 (2004) 295-299.
42. R. Jakopič, Lj. Benedik, *Tracer Studies on Sr Resin and Determination of ^{90}Sr in Environmental Samples*. Acta Chim Slov 52 (2005) 297-302.
43. B. Niedrée, A.E. Berns, H. vereecken, P. Burauel, *Do Chernobyl-like contaminations with ^{137}Cs and ^{90}Sr affect the microbial community, the fungal biomass and the composition of soil organic matter in soil?*. J Environ Radioactiv 118 (2013) 21-29.
44. H. Başkaya, M. Doğru, A. Küçükönder, *Determination of the ^{137}Cs and ^{90}Sr radioisotope activity concentrations found in digestive organs of sheep fed with different feeds*. J Environ Radioactiv 134 (2014) 61-65.
45. T. Jabbar, K. Khan, M.S. Subhani, P. Akhter, *Determination of ^{90}Sr in environment of district Swat, Pakistan*. J Radioanal Nucl Ch 279 (2009) 377-384.
46. C. Landstetter, G. Wallner, *Determination of strontium-90 in deer bones by liquid scintillation spectrometry after separation on Sr-specific ion exchange columns*. J Environ Radioactiv 87 (2006) 315-324.
47. R. Rodríguez, J. Avivar, L. Ferrer, L.O. Leal, V. Cerdà, *Automated total and radioactive strontium separation and preconcentration in samples of environmental interest exploiting a lab-on-valve system*. Talanta 96 (2012) 96-101.

48. R. Acar, O. Acar, *Determination of ^{90}Sr Accumulation in Human Teeth*. Turk J Chem 28 (2004) 67-74.
49. C. Cosma, *Strontium-90 measurement after the Chernobyl accident in Romanian samples without chemical separation*. Spectrochim Acta B 55 (2000) 1165-1171.
50. I. Shcheglov, O.B. Tsvetnova, A.L. Klyashtorin, *Biogeochemical migration of technogenic radionuclides in forest ecosystems: by the materials of a multilayer study in the areas severely contaminated due to the Chernobyl incident*. Nauka, Moscow, 2001.
51. B. Gajić, *Fizika zemljišta*. Univerzitet u Beogradu, Poljoprivredni fakultet, Beograd, 2006.
52. P. Bossew, G. Kirchner, *Modelling the vertical distribution of radionuclides in soil. Part 1: the convection-dispersion equation revisited*. J Environ Radioactiv 73 (2004) 127-150.
53. K. Bunzl, *Das Verhalten von Radionukliden im Boden*. Deutsche Tierärztliche Wochenschrift 94 (1987) 357-359.
54. Lj. Janković-Mandić, *Radioaktivnost zemljišta Beograda: Distribucija prirodnih i veštačkih radionuklida i procena radijacionog izlaganja stanovništva*. Doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Fakultet za fizičku hemiju, Beograd, 2011.
55. M.D. Pérez-Cárceles, A. Sibón, M.L. Gil del Castillo, M.A. Vizcaya, E. Osuna, T. Casas, J.L. Romero, A. Luna, *Strontium Levels in Different Causes of Death: Diagnostic Efficacy in Drowning*. Biol Trace Elem Res 126 (2008) 27-37.
56. K.M. Frei, R. Frei, U. Mannering, M. Gleba, M.L. Nosch, H. Lyngstrøm, *Provenance of ancient textiles-a pilot study evaluating the strontium isotope system in wool*. Archaeometry 51 (2009) 252-276.
57. W.M. Lam, H.B. Pan, M.K. Fong, W.S. Cheung, K.L. Wong, Z.Y. Li, K.D.K. Luk, W.K. Chan, C.T. Wong, C. Yang, W.W. Lu, *In Vitro characterization of low modulus linoleic acid coated strontium-substituted hydroxyapatite containing PMMA bone cement*. J Biomed Mater Res B 96B (2011) 76-83.
58. N. Vajda, C.K. Kim, *Determination of radiostrontium isotopes: A review of analytical methodology*. Appl Radiat Isotopes 68 (2010) 2306-2326.
59. H.L. Krieger, E.R. Martin, G.W. Friskhorn, *Sequential radiochemical analysis for ruthenium, strontium and cesium in environmental air*. Health Phys 30 (1976) 465-470.

60. R. Brnović, *Metoda za određivanje Sr-90 sa aluminijumom kao povlačivačem za Y-90*. Naučno-tehnički PREGLED 8 (1971) 33-37.
61. H.L. Volchok, *EML Procedures Manual, HASL-300*. Environmental Measurements Laboratory, US Department of Energy, USA, New York, 1983.
62. R.A. Tinker, J.D. Smith, M.B. Cooper, *Determination of Strontium-90 in Environmental Samples Containing Thorium*. Analyst 122 (1997) 1313-1317.
63. T. Kimura, K. Iwashima, T. Ishimori, T. Hamada, *Separation of ^{89}Sr and ^{90}Sr from calcium in milk with a macrocyclic ether*. Anal Chem 51 (1979) 1113-1116.
64. G. Kramer, J.M. Davies, *Isolation of Sr-90, Y-90, Pm-147 and Ce-144 from wet ashed urine by calcium oxalate coprecipitation and sequential solvent-extraction*. Anal Chem 54 (1982) 1428-1431.
65. E. Blasius, W. Klein, U. Schon, *Separation of Sr from nuclear waste solutions by solvent extraction with crown ethers*. J Radioanal Nucl Ch 89 (1985) 389-398.
66. D.J. Wood, S. Elshani, H.S. Du, N.R. Natale, C.M. Wai, *Separation of ^{90}Y from ^{90}Sr by solvent extraction with ionizable crown ethers*. Anal Chem 65 (1993) 1350-1354.
67. J.E. Roane, T.A. DeVol, J.D. Leyba, R.A. Fjeld, *The use of extraction chromatography resins to concentrate actinides and strontium from soil for radiochromatographic analyses*. J Environ Radioactiv 66 (2003) 227-245.
68. A.S. Kanekar, P.N. Pathak, P.K. Mohapatra, *A rapid online estimation method for radiostrontium in soil samples using crown ether and supercritical fluid extraction*. Talanta 99 (2012) 744-749.
69. F. Goutelard, R. Nazard, C. Bocquet, N. Coquenlorge, P. Letessier, D. Calmet, *Improvement in ^{90}Sr measurements at very low levels in environmental samples*. Appl Radiat Isotopes 53 (2000) 145-151.
70. K.H. Hong, Y.H. Cho, M.H. Lee, G.S. Choi, C.W. Lee, *Simultaneous measurement of ^{89}Sr and ^{90}Sr in aqueous samples by liquid scintillation counting using the spectrum unfolding method*. Appl Radiat Isotopes 54 (2001) 299-305.
71. M.H. Lee, H.J. Ahn, J.H. Park, Y.J. Park, K. Song, *Rapid sequential determination of Pu, ^{90}Sr and ^{241}Am nuclides in environmental samples using an anion exchange and Sr-Spec resins*. Appl Radiat Isotopes 69 (2011) 295-298.

72. Ž. Grahek, I. Milanović, M. Nodilo, M. Rožmarić, *Sequential separation of Fe and Sr from liquid samples by using Sr resin and rapid determination of ^{55}Fe and $^{89,90}\text{Sr}$* . Appl Radiat Isotopes 81 (2013) 42-48.
73. C.R. Porter, B. Kahn, M.W. Carter, G.L. Rehnberg, E.W. Pepper, *Determination of Radiostrontium in Food and Other Environmental Samples*. Environ Sci Technol 1 (1967) 745-750.
74. Environmental Modelling for Radiation Safety (EMRAS) Programme, *Modelling Radiation Exposure and Radionuclide Transfer for Non-human species*. Report of the Biota Working Group of EMRAS Theme 3, International Atomic Energy Agency (IAEA), 2007.
75. D. Ristanović, *Savremena biofizika: 3. Matematičko modelovanje pojava u biološkim sistemima*. Naučna knjiga, Beograd, 1989.
76. L. Kolomejceva-Jovanović, *Hemija i zaštita životne sredine - ekološka hemija*. Monografija nacionalnog značaja, Savez inženjera i tehničara Srbije, Beograd, 2010.
77. Ž. Dolijanović, S. Oljača, D. Kovačević, M. Simić, N. Momirović, Ž. Jovanović, *Dependence of the productivity of maize and soybean intercropping systems on hybrid type and plant arrangement pattern*. Genetika 45 (2013) 135-144.
78. Z. Dolijanovic, D. Kovacevic, N. Momirovic, S. Oljaca, Z. Jovovic, *Effects of crop rotations on weed infestation in winter wheat*. Bulg J Agric Sci 20 (2014) 416-420.
79. Službeni Glasnik Republike Srbije, *Zakon o organskoj proizvodnji*. Broj 30/10, Beograd, 2010.
80. D. Milošev, S. Šeremešić, I. Đalović, B. Pejić, V. Ćirić, *Assessing the Agroecosystem performance in a long-term winter wheat cropping*. Contempor Agric 63 (2014) 494-500.
81. S. Šeremešić, I. Đalović, D. Milošev, A. Nastasić, B. Pejić, M. Vasiljević, *Maize cropping (Zea mays L.) assessment by simple performance-based index*. Ratarstvo i Povrtarstvo 52 (2015) 102-107.
82. S. Šeremešić, *Uticaj sistema ratarenja na svojstva organske materije černozema*. Doktorska disertacija, Univerzitet u Novom Sadu, Poljoprivredni fakultet, Novi Sad 2012.

83. International Atomic Energy Agency (IAEA), *Measurements of Radionuclides in Food and the Environment*. A guide book, Technical Report Series No. 295, IAEA, Vienna, 1989.
84. Multi-Agency Radiological Laboratory Analytical Protocols Manual (MARLAP), Vol. II, Chapters 10-17 and Appendix F, U. S. Environmental Protection Agency, 2004.
85. ISO 11466, *Soil quality - Extraction of trace elements soluble in aqua regia*. International Standardization Organization (ISO), Geneva, 1995.
86. N.B. Sarap, M.M. Janković, G.K. Pantelić, *Validation of radiochemical method for the determination of ^{90}Sr in environmental samples*. Water Air Soil Pollut 225 (2014) 2003-2013.
87. Eurachem Guide, *The Fitness for Purpose of Analytical Methods - A Laboratory Guide to Method Validation and Related Topics*. Magnusson B. and Ornemark U. (eds.), 2nd ed., 2014.
88. ISO/IEC 17025, *General requirements for the competence of testing and calibration laboratories*. International Standardization Organization/International Electrotechnical Commission, 2nd ed., 2005.
89. I. Taverniers, M.D. Loose, E.V. Bockstaele, *Trends in quality in the analytical laboratory. II. Analytical method validation and quality assurance*. Trend Anal Chem 23 (2004) 535-552.
90. ISO 8402, *Quality management and quality assurance - Vocabulary*. International Standard Organization, Geneva, 1994.
91. International Conference on Harmonization guidelines, *Validation of Analytical Procedures: Methodology*, ICH/CPMP Guidelines Q2B, Geneva, 1996.
92. Thermo Eberline ESM, *Multi-low-level-counter and PC-program for windows*. Operating manual, FHT 770 T, RB-017-990824 E.
93. D. Ristić, M. Radenković, J. Joksić, M. Milošević, Z. Obradović, *Optimizacija uslova merenja na niskofonskom α/β proporcionalnom brojaču Thermo-Eberline FHT 770 T*. U: M. Kovačević (ur.) Zbornik radova, XXIII Simpozijum Društva za zaštitu od zračenja Srbije i Crne Gore, Donji Milanovac, Srbija i Crna Gora (2005) 195-198.
94. G. Pantelić, D. Todorović, J. Nikolić, M. Eremić-Savković, M. Janković, M. Rajačić, N. Sarap, Lj. Javorina, *Osiguranje i kontrola kvaliteta u laboratorijama koje vrše monitoring radioaktivnosti*. U: B. Dikić, S. Dikić (urednici) Zbornik radova 2, Šesti

međunarodni kongres „Ekologija, zdravlje, rad, sport”, Banja Luka, Republika Srpska, (2013) 206-213.

95. B. Ivanović, *Teorijska statistika*. Beogradski grafički zavod, Beograd, 1966.

96. A. Onjia, *Analitičke tehnike za određivanje i praćenje hemijskih supstanci od uticaja na koroziju*. Integritet i vek konstrukcija 7 (2007) 79-82.

97. J.S. Fritz, D.T. Gjerde, *Ion Chromatography*. 3rd ed., Wiley-VCH, Weinheim, 2000.

98. M.B. Rajković, I.D. Sredović Ignjatović, Lj.M. Ignjatović, V.A. Nedović, S.M. Prijić, *Primena klasičnih instrumentalnih metoda analize u kontroli kvaliteta piva*. J Agric Sci 60 (2015) 477-503.

99. A.R. Đorđević, S.B. Radmanović, *Pedologija*. Univerzitet u Beogradu, Poljoprivredni fakultet, Beograd-Zemun, 2016.

100. United States Department of Agriculture (USDA), *Soil Survey Manual*. Chapter 3, Soil Conservation Service, USDA, Soil Survey Division Staff, 1993.

101. M. Belić, Lj. Nešić, V. Ćirić, *Praktikum iz pedologije*. Univerzitet u Novom Sadu, Poljoprivredni fakultet, Novi Sad, 2014.

102. J.B.D. Robinson, *Soil particle-size fractions and nitrogen mineralization*. J Soil Sci 18 (1967) 109-117.

103. ISO 10390, *Soil quality-Determination of pH*. 2nd ed., International Standardization Organization (ISO), Geneva, 2005.

104. ISO 10693, *Soil quality-Determination of carbonate content-volumetric method*. International Standardization Organization (ISO), Geneva, 1995.

105. V.N. Simakov, *Application of phenylanthranilic acid in determining humus, the method of Tyurin*. Почвоведение 8 (1957) 72-73.

106. V.G. Mineev, *Practicum on agrochemistry*. Work book, 2nd edition, University of Moscow, Russian Academy of Agricultural Sciences, 2001.

107. A. Walkley, I.A. Black, *An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method*. Soil Sci 37 (1934) 29-38.

108. I. Bikit, M. Sarić, Lj. Čonkić, J. Slivka, M. Krmar, *Transport prirodnih radionuklida iz zemljišta u biljke*. U: M. Kovačević (ur.) Zbornik radova, XVIII Jugoslovenski simpozijum za zaštitu od zračenja, Bečići, Savezna Republika Jugoslavija (1995) 221-224.

109. B.L. Cohen, *Transport of elements from soil to human diet*. Health Phys 49 (1985) 239-245.
110. R.L. Kathren, *Radioactivity in the environment: Sources, Distribution and Surveillance*. Harwood academic publishers, New York, 1986.
111. A. Paasikallio, A. Rantavaara, J. Sippola, *The transfer of cesium-137 and strontium-90 from soil to food crops after the Chernobyl accident*. Sci Total Environ 155 (1994) 109-124.
112. M. Gastberger, F. Steinhausler, M.H. Gerzabek, H. Lettner, A. Hubmer, *Soil-to-plant transfer of fallout caesium and strontium in Austrian lowland and Alpine pastures*. J Environ Radioactiv 49 (2000) 217-233
113. C.J. Wang, J.J. Wang, C.Y. Chiu, S.Y. Lai, Y.M. Lin, *Transfer factors of ^{90}Sr and ^{137}Cs from soil to the sweet potato collected in Taiwan*. J Environ Radioactiv 47 (2000) 15-27.
114. J. Solecki, S. Chibowski, *Determination of transfer factors for ^{137}Cs and ^{90}Sr isotopes in soil-plant system*. J Radioanal Nucl Ch 252 (2002) 89-93.
115. R.H. Panchal, D.D. Rao, B.H. Mehta, A. Baburajan, R.H. Gaikwad, *Comparison of transfer factors of ^{137}Cs from soil to leafy vegetables in pot experiment and ambient environment*. J Radioanal Nucl Ch 292 (2012) 401-409.
116. S.R. Chakraborty, R. Azim, A.K.M. Rezaul Rahman, R. Sarker, *Radioactivity concentrations in soil and transfer factors of radionuclides from soil to grass and plants in the Chittagong city of Bangladesh*. J Phys Sci 24 (2013) 95-113.
117. J.P. James, B.N. Dileep, P.M. Ravi, R.M. Joshi, T.L. Ajith, A.G. Hedge, P.K. Sarkar, *Soil to leaf transfer factor for the radionuclides ^{226}Ra , ^{40}K , ^{137}Cs and ^{90}Sr at Kaiga region, India*. J Environ Radioactiv 102 (2011) 1070-1077.
118. M. Bakım, A. Uğur Görgün, *Radioactivity in soils and some terrestrial foodstuffs from organic and conventional farming areas in Izmir, Turkey*. J Radioanal Nucl Ch 306 (2015) 237-242.
119. S.A. Abu-Khadra, M.F. Abdel-Sabour, A.T. Abdel-Fattah, H.S. Eissa, *Transfer Factor of Radioactive Cs and Sr from Egyptian Soils to Roots and Leafs of Wheat Plant*. IX Radiation Physics & Protection Conference, Cairo, Egypt (2008) 185-196.

120. I.F. Al-Hamarneh, N. Alkhomashi, F.I. Almasoud, *Study on the radioactivity and soil-to-plant transfer factor of ^{226}Ra , ^{234}U and ^{238}U radionuclides in irrigated farms from the northwestern Saudi Arabia*. J Environ Radioactiv 160 (2016) 1-7.
121. N.B. Sarap, M.M. Janković, Ž.K. Dolijanović, D.Đ. Kovačević, M.M. Rajačić, J.D. Nikolić, D.J. Todorović, *Soil to plant transfer factor for ^{90}Sr and ^{137}Cs* . J Radioanal Nucl Ch 303 (2015) 2523-2527.
122. N.B. Sarap, M.M. Rajačić, I.G. Đalović, S.I. Šeremešić, A.R. Đorđević, M.M. Janković, M.Z. Daković, *Distribution of natural and artificial radionuclides in chernozem soil/crop system from stationary experiments*. Environ Sci Pollut R 23 (2016) 17761-17773.
123. L.N. Maskalchuk, A.A. Baklai, A.V. Konoplev, T.G. Leontieva, *Migration of ^{90}Sr in the solid phase of the soil-soil solution-plant systems and ways to reduce it*. Radiochem 56 (2014) 222-225.
124. N. Sarap, M. Janković, D. Todorović, G. Pantelić, J. Nikolić, V. Stanić, *Uticaj trasera na ispitivanje sadržaja ^{90}Sr u uzorcima rečnih voda i zemljišta*. U: M. Kovačević (ur.) Zbornik radova, XXVI Simpozijum društva za zaštitu od zračenja Srbije i Crne Gore, Tara, Republika Srbija (2011) 105-108.
125. R. Bojanowski, Z. Radecki, M.J. Campbell, K.I. Burns, A. Trinkl, *Report on the Intercomparison Run for the Determination of Radionuclides in Soils IAEA-326 and IAEA-327*. IAEA/AL/100, IAEA, Vienna, 2001.
126. G. Lujanienė, A. Plukis, E. Kimtys, V. Remeikis, D. Jankūnaite, B.I. Ogorodnikov, *Study of ^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{239,240}\text{Pu}$, ^{238}Pu and ^{241}Am behavior in the Chernobyl soil*. J Radioanal Nucl Ch 251 (2002) 59-68.
127. N.B. Sarap, M. Nodilo, M. Štok, M.M. Janković, Ž. Grahek, *Intercomparison of different methodologies for determination of radiostrontium in soil samples*. In: V. Radolić, M. Poje Sovilj, I. Krajcar Bronić (eds.) Proceedings, XI Symposium of the Croatian Radiation Protection Association with international participation, Osijek, Croatia (2017) 255-260.
128. International Atomic Energy Agency (IAEA), *World-Wide Open Proficiency Test on the Determination of Anthropogenic and Natural Radionuclides in Water, Rice and Soil Samples*. Report on the IAEA-TEL-2015-03, IAEA, Vienna, 2015.
129. D.L. Sparks, *Environmental soil chemistry*. Academic Press, 2003.

130. M. Rivero-Huguet, E. Darré, *Determination of Total Strontium in Uruguayan Rice by Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry (ICP-OES)*. *At Spectrosc* 27 (2006) 80-85.
131. Y.N. Jolly, A. Islam, S. Akbar, *Transfer of metals from soil to vegetables and possible health risk assessment*. *SpringerPlus* 2 (2013) 385-392.
132. R. Kastori, *Zaštita agroekosistema*. Feljton, Novi Sad, 1995.
133. L. Guang-yue, H. Nan, D. De-xin, Z. Ji-fang, L. Yu-long, W. Yong-dong, N. Xiao-qin, *Screening of Plant Species for Phytoremediation of Uranium, Thorium, Barium, Nickel, Strontium and Lead Contaminated Soils from a Uranium Mill Tailings Repository in South China*. *Bull Environ Contam Toxicol* 86 (2011) 646-652.
134. M. Ćujić, S. Dragović, M. Đorđević, R. Dragović, B. Gajić, Š. Miljanić, *Radionuclides in the soil around the largest coal-fired power plant in Serbia: radiological hazard, relationship with soil characteristics and spatial distribution*. *Environ Sci Pollut R* 22 (2015) 10317-10330.
135. N.A. Kačinskij, *Fizika počvi*. I deo, „Visšaja škola”, Moskva, 1965.
136. M. Gračanin, *Mali pedološki praktikum*. Poljoprivredni nakladni zavod, Zagreb, 1945.
137. I. Vukašinović, D. Todorović, A. Đorđević, M.B. Rajković, V.B. Pavlović, *Depth distribution of ¹³⁷Cs in anthrosol from the experimental field „Radmilovac” near Belgrade, Serbia*. *Arh Hig Rada Toksikol* 64 (2013) 425-430.
138. M. Štrok, B. Smodiš, K. Eler, *Natural radionuclides in trees grown on a uranium mill tailings waste pile*. *Environ Sci Pollut R* 18 (2011) 819-826.
139. A.A. Sysoeva, I.V. Konopleva, N.I. Sanzharova, *Bioavailability of radiostrontium in soil: Experimental study and modeling*. *J Environ Radioactiv* 81 (2005) 269-282.
140. S. Dragović, B. Gajić, R. Dragović, Lj. Janković-Mandić, L. Slavković-Beškoski, N. Mihailović, M. Momčilović, M. Ćujić, *Edaphic factors affecting the vertical distribution of radionuclides in the different soil types of Belgrade, Serbia*. *J Environ Monit* 14 (2012) 127-137.
141. L. Krogh, H. Breuning-madsen, M. Humlekrog Greve, *Cation-Exchange Capacity Pedotransfer Functions for Danish Soils*. *Acta Agric Scand, Sect B, Soil Plant Sci* 50 (2000) 1-12.

PRILOG I

Tablice korelacija (tabele 1-12) između specifičnih aktivnosti ^{90}Sr u zemljištu i usevima, koncentracija Sr i Ca u zemljištu i usevima i fizičko-hemijskih karakteristika zemljišta za ogledna polja „Radmilovac” i „Rimski Šančevi” u periodu od 2013. do 2015. godine.

Oznake u tablicama su sledeće:

specifične aktivnosti ^{90}Sr u zemljištu ($^{90}\text{Sr}1$ - sezona 1, $^{90}\text{Sr}2$ - sezona 2),
specifične aktivnosti ^{90}Sr u usevima ($^{90}\text{Sr}K$ - koren, $^{90}\text{Sr}O$ - ostatak biljke),
koncentracije Sr u zemljištu ($Sr1$ - sezona 1, $Sr2$ - sezona 2),
koncentracije Sr u usevima (SrK - koren, SrO - ostatak biljke),
koncentracije Ca u zemljištu ($Ca1$ - sezona 1, $Ca2$ - sezona 2),
koncentracije Ca u usevima (CaK - koren, CaO - ostatak biljke) i
fizičko-hemijske osobine zemljišta: krupni pesak (KP), sitni pesak (SP), prah (PR),
glina (GL), vlažnost zemljišta (VZ), gustina zemljišta (GZ), pH u H_2O (pH_V), pH u KCl (pH_K), CaCO_3 (CC), sadržaj humusa (HU), sadržaj ukupnog organskog ugljenika (OC),
sadržaj organskog ugljenika u humičnim kiselinama (OC_H) i sadržaj organskog ugljenika u fulvičnim kiselinama (OC_F).

Tabela 1. Pirsonovi korelacioni koeficijenti (ogledno polje Radmilovac, sloj zemljišta 0-15 cm, 2013.)

	⁹⁰ Sr1	⁹⁰ Sr2	Sr1	Sr2	Ca1	Ca2	⁹⁰ SrK	⁹⁰ SrO	SrK	SrO	CaK	CaO	KP	SP	PR	GL	VZ	GZ	pH _V	pH _K	CC	HU	OC	OC _H	OC _F
⁹⁰ Sr1	1						-0,78									0,91							0,86		
⁹⁰ Sr2		1																							
Sr1			1																						
Sr2				1		0,89																			
Ca1					1	0,82																			
Ca2						1																			
⁹⁰ SrK							1		-0,86							0,93	0,89					0,77	0,97	0,86	
⁹⁰ SrO								1																	
SrK									1		0,86				0,90			-0,82	0,92	0,89			-0,94	-0,82	-0,91
SrO										1			-0,80												
CaK											1		0,94	0,91	-0,98				0,98	0,98					-0,89
CaO												1													
KP													1	0,94	-0,87				0,86	0,88					
SP														1	-0,82				0,86	0,83					
PR															1			0,85	-0,98	-0,99					0,92
GL																1					0,85	-0,96		-0,86	
VZ																	1								
GZ																		1		-0,80					
pH _V																			1	0,98			0,79		-0,94
pH _K																				1			-0,78		-0,95
CC																					1	-0,88		-0,81	
HU																						1	0,84	0,96	
OC																							1	0,93	0,90
OC _H																								1	
OC _F																									1

*Nivo značajnosti: $p < 0,05$

**Nivo značajnosti: $p < 0,01$

***Nivo značajnosti: $p < 0,001$

Tabela 2. Pirsonovi korelacioni koeficijenti (ogledno polje Radmilovac, sloj zemljišta 15-30 cm, 2013.)

	⁹⁰ Sr1	⁹⁰ Sr2	Sr1	Sr2	Ca1	Ca2	⁹⁰ SrK	⁹⁰ SrO	SrK	SrO	CaK	CaO	KP	SP	PR	GL	VZ	GZ	pH _V	pH _K	CC	HU	OC	OC _H	OC _F
⁹⁰ Sr1	1	0,79														0,83									
⁹⁰ Sr2		1																							
Sr1			1		0,83																				
Sr2				1		0,96																			
Ca1					1	0,84																			
Ca2						1																			
⁹⁰ SrK							1		-0,86							0,89						0,77	0,97	0,86	0,91
⁹⁰ SrO								1																	
SrK									1		0,86				-0,90			-0,82	0,92	0,89			-0,94	-0,82	-0,91
SrO										1			-0,80												
CaK											1		0,94	0,91	-0,98				0,98	0,98					-0,89
CaO												1													
KP													1	0,94	-0,87				0,86	0,88					
SP														1	-0,82				0,86	0,83					
PR															1			0,85	-0,98	-0,99			0,78		0,92
GL																1					0,85	-0,96		-0,86	
VZ																	1				-0,88		0,84	0,96	
GZ																		1		-0,80					
pH _V																			1	0,98			-0,79		-0,94
pH _K																				1			-0,78		-0,95
CC																					1			-0,81	
HU																						1			
OC																							1	0,93	0,90
OC _H																								1	
OC _F																									1

*Nivo značajnosti: $p < 0,05$

**Nivo značajnosti: $p < 0,01$

***Nivo značajnosti: $p < 0,001$

Tabela 3. Pirsonovi korelacioni koeficijenti (ogledno polje Radmilovac, sloj zemljišta 0-15 cm, 2014.)

	⁹⁰ Sr1	⁹⁰ Sr2	Sr1	Sr2	Ca1	Ca2	⁹⁰ SrK	⁹⁰ SrO	SrK	SrO	CaK	CaO	KP	SP	PR	GL	VZ	GZ	pH _V	pH _K	CC	HU	OC	OC _H	OC _F
⁹⁰ Sr1	1						0,91									0,92						0,93			0,91
⁹⁰ Sr2		1										0,89													
Sr1			1				-0,79																		
Sr2				1																		0,83			
Ca1					1					0,93	0,97														
Ca2						1							0,91		-0,88				0,84	0,91					-0,87
⁹⁰ SrK							1	0,93		0,85			0,79			-0,89									
⁹⁰ SrO								1		0,96		0,93	0,78	0,82		-0,88	0,86							0,81	
SrK									1							0,84	-0,82				0,98				
SrO										1	0,87	0,98	0,79	0,90	-0,81				0,89	0,82					-0,85
CaK											1														
CaO												1		0,81	-0,79					0,79			-0,78		
KP													1	0,94	-0,87				0,86	0,88					
SP														1	-0,82				0,86	0,83					
PR															1			0,85	-0,98	-0,99			0,78		0,92
GL																1	-0,96				0,85			-0,86	
VZ																	1				-0,88		0,84	0,96	
GZ																		1		-0,80					
pH _V																			1	0,98			-0,79		-0,94
pH _K																				1			-0,78		-0,95
CC																					1			-0,81	
HU																						1			
OC																							1	0,93	0,90
OC _H																								1	
OC _F																									1

*Nivo značajnosti: $p < 0,05$

**Nivo značajnosti: $p < 0,01$

***Nivo značajnosti: $p < 0,001$

Tabela 4. Pirsonovi korelacioni koeficijenti (ogledno polje Radmilovac, sloj zemljišta 15-30 cm, 2014.)

	⁹⁰ Sr1	⁹⁰ Sr2	Sr1	Sr2	Ca1	Ca2	⁹⁰ SrK	⁹⁰ SrO	SrK	SrO	CaK	CaO	KP	SP	PR	GL	VZ	GZ	pH _V	pH _K	CC	HU	OC	OC _H	OC _F
⁹⁰ Sr1	1	0,90														0,91						0,92			
⁹⁰ Sr2		1																							
Sr1			1		0,81					0,88	0,89														
Sr2				1																					
Ca1					1					0,81	0,96														
Ca2						1							0,95	0,84	-0,91				0,87	0,93					
⁹⁰ SrK							1	0,93		0,85			0,78			0,89									
⁹⁰ SrO								1		0,96		0,93	0,78	0,82			0,86							0,82	
SrK									1							0,84	-0,82								
SrO										1	0,87	0,98	0,79	0,90	-0,81								-0,86		-0,85
CaK											1														
CaO												1		0,81	-0,79								-0,78		
KP													1	0,94	-0,87				0,86	0,88					
SP														1	-0,82				0,86	0,83					
PR															1			0,85	-0,98	-0,99			0,78		0,92
GL																1	-0,96				0,85		-0,86		
VZ																	1				-0,88		0,84	0,96	
GZ																		1							
pH _V																			1	0,98			-0,79		-0,94
pH _K																				1			-0,78		-0,95
CC																					1			-0,81	
HU																						1			
OC																							1	0,93	0,90
OC _H																								1	
OC _F																									1

*Nivo značajnosti: $p < 0,05$

**Nivo značajnosti: $p < 0,01$

***Nivo značajnosti: $p < 0,001$

Tabela 5. Pirsonovi korelacioni koeficijenti (ogledno polje Radmilovac, sloj zemljišta 0-15 cm, 2015.)

	⁹⁰ Sr1	⁹⁰ Sr2	Sr1	Sr2	Ca1	Ca2	⁹⁰ SrK	⁹⁰ SrO	SrK	SrO	CaK	CaO	KP	SP	PR	GL	VZ	GZ	pH _v	pH _K	CC	HU	OC	OC _H	OC _F
⁹⁰ Sr1	1		0,83													-0,81	0,89					0,88			0,87
⁹⁰ Sr2		1					0,87									-0,86	0,88								
Sr1			1																						-0,77
Sr2				1	-0,77																				
Ca1					1				0,86				0,88	0,83	-0,99			-0,85	0,97	0,98			-0,78		-0,90
Ca2						1																			
⁹⁰ SrK							1	0,91	-0,80							-0,81	0,89						0,97	0,94	0,82
⁹⁰ SrO								1								-0,88	0,88						0,82	0,87	
SrK									1		0,91				-0,86				0,92	0,86			-0,92	-0,80	-0,90
SrO										1															
CaK											1														
CaO												1													
KP													1	0,94	-0,87				0,86	0,88					
SP														1	-0,82				0,86	0,83					
PR															1			0,85	-0,98	-0,99			0,78		0,92
GL																1	-0,96				0,85				-0,86
VZ																	1				-0,88		0,84		0,96
GZ																		1		-0,80					
pH _v																			1	0,98			-0,79		-0,94
pH _K																				1			-0,78		-0,95
CC																					1			-0,81	
HU																						1			
OC																							1	0,93	0,90
OC _H																								1	
OC _F																									1

*Nivo značajnosti: $p < 0,05$

**Nivo značajnosti: $p < 0,01$

***Nivo značajnosti: $p < 0,001$

Tabela 6. Pirsonovi korelacioni koeficijenti (ogledno polje Radmilovac, sloj zemljišta 15-30 cm, 2015.)

	⁹⁰ Sr1	⁹⁰ Sr2	Sr1	Sr2	Ca1	Ca2	⁹⁰ SrK	⁹⁰ SrO	SrK	SrO	CaK	CaO	KP	SP	PR	GL	VZ	GZ	pH _v	pH _K	CC	HU	OC	OC _H	OC _F
⁹⁰ Sr1	1	0,79					0,86										-0,83					0,93			0,94
⁹⁰ Sr2		1							-0,77																
Sr1			1		0,86										-0,78			-0,92							
Sr2				1						-0,82															
Ca1					1	0,81			0,87				0,84	0,82	-0,97			-0,87	0,95	0,95					-0,86
Ca2						1				-0,82			0,95	0,86	-0,86				0,89	0,90					-0,85
⁹⁰ SrK							1	0,91	-0,80							-0,81	0,89						0,97	0,94	0,82
⁹⁰ SrO								1								-0,88	0,88						0,82	0,87	
SrK									1		0,92				-0,86				0,92	0,86			-0,92	-0,80	-0,91
SrO										1															
CaK											1														
CaO												1													
KP													1	0,94	-0,87				0,86	0,88					
SP														1	-0,82				0,86	0,83					
PR															1			0,85	-0,98	-0,99			0,78		0,92
GL																1	-0,96				0,85			-0,86	
VZ																	1				-0,88		0,84	0,96	
GZ																		1		-0,80					
pH _v																			1	0,98			-0,79		-0,94
pH _K																				1			-0,78		-0,95
CC																					1			-0,81	
HU																						1			
OC																							1	0,93	0,90
OC _H																								1	
OC _F																									1

*Nivo značajnosti: $p < 0,05$

**Nivo značajnosti: $p < 0,01$

***Nivo značajnosti: $p < 0,001$

Tabela 7. Pirsonovi korelacioni koeficijenti (ogledno polje Rimski Šančevi, sloj zemljišta 0-15 cm, 2013.)

	⁹⁰ Sr1	⁹⁰ Sr2	Sr1	Sr2	Ca1	Ca2	⁹⁰ SrK	⁹⁰ SrO	SrK	SrO	CaK	CaO	KP	SP	PR	GL	VZ	GZ	pH _v	pH _K	CC	HU	OC	OC _H	OC _F
⁹⁰ Sr1	1	0,98					0,85	0,89		-0,92							-0,80					-0,94			-0,93
⁹⁰ Sr2		1			0,81		0,94	0,96		-0,82							-0,90			0,94		-0,99			
Sr1			1	0,92	0,99							0,98						-0,97					-0,92		
Sr2				1							0,93	0,98				-0,82		0,98							
Ca1					1	0,96	0,83	0,92			0,84	0,95						0,94				-0,85			
Ca2						1		0,82				0,92											-0,98		
⁹⁰ SrK							1	0,98						0,97		-0,96	-0,99			0,88		-0,98			
⁹⁰ SrO								1				0,79		0,91		0,91	-0,98					-0,98			
SrK									1																-0,94
SrO										1															
CaK											1	0,92				-0,86		0,94							
CaO												1						0,99							
KP													1												
SP														1		-0,99	-0,97			0,92		-0,91			
PR															1	-0,92					0,99				
GL																1					-0,92	0,88			
VZ																	1					0,95			
GZ																		1							
pH _v																			1						
pH _K																				1		-0,94			
CC																					1				
HU																						1			
OC																							1		
OC _H																								1	
OC _F																									1

*Nivo značajnosti: $p < 0,05$

**Nivo značajnosti: $p < 0,01$

***Nivo značajnosti: $p < 0,001$

Tabela 8. Pirsonovi korelacioni koeficijenti (ogledno polje Rimski Šančevi, sloj zemljišta 15-30 cm, 2013.)

	⁹⁰ Sr1	⁹⁰ Sr2	Sr1	Sr2	Ca1	Ca2	⁹⁰ SrK	⁹⁰ SrO	SrK	SrO	CaK	CaO	KP	SP	PR	GL	VZ	GZ	pH _v	pH _K	CC	HU	OC	OC _H	OC _F
⁹⁰ Sr1	1	0,94					-0,96						0,85										-0,82		-0,97
⁹⁰ Sr2		1											0,83										-0,89		-0,88
Sr1			1		0,91	0,92		0,89		-0,92												-0,89	-0,81		
Sr2				1			0,92	0,86			0,87		-0,82	0,98	0,95	-0,99	-0,95			0,82	0,96				
Ca1					1	0,99	0,80	0,90			0,78	0,93					-0,84	0,92					-0,93		
Ca2						1	0,79	0,90			0,77	0,93					-0,84	0,91				-0,83	-0,93		
⁹⁰ SrK							1	0,98						0,97		-0,96	-0,99			0,94	0,78	-0,98			
⁹⁰ SrO								1						0,91		-0,91	-0,98			0,88		-0,98			
SrK									1		0,80				0,86						0,86				-0,94
SrO										1															
CaK											1	0,92			0,88	-0,86	-0,84	0,94			0,92				
CaO												1					-0,79	0,99					-0,89		
KP													1												
SP														1	0,87	-0,99	-0,97			0,92	0,87	-0,91			
PR															1	-0,92	-0,82				0,99				-0,83
GL																1	-0,98			-0,86	-0,92	0,88			
VZ																	1	-0,81		-0,88	-0,83	0,95			
GZ																		1					-0,86		
pH _v																			1						
pH _K																				1		-0,94			
CC																					1				-0,81
HU																						1			
OC																							1	0,85	
OC _H																								1	
OC _F																									1

*Nivo značajnosti: $p < 0,05$

**Nivo značajnosti: $p < 0,01$

***Nivo značajnosti: $p < 0,001$

Tabela 9. Pirsonovi korelacioni koeficijenti (ogledno polje Rimski Šančevi, sloj zemljišta 0-15 cm, 2014.)

	⁹⁰ Sr1	⁹⁰ Sr2	Sr1	Sr2	Ca1	Ca2	⁹⁰ SrK	⁹⁰ SrO	SrK	SrO	CaK	CaO	KP	SP	PR	GL	VZ	GZ	pH _V	pH _K	CC	HU	OC	OC _H	OC _F
⁹⁰ Sr1	1	0,88	0,95	0,91	0,94	0,89	0,85		0,82							-0,80	-0,91	0,88				-0,91	-0,86		-0,91
⁹⁰ Sr2		1	0,95	0,93	0,97	0,91	0,83				0,83						-0,78	0,99					-0,88		
Sr1			1	0,99	0,99	0,98			0,90	0,92	0,83			0,83		-0,89	-0,94	0,96			0,81	-0,84			
Sr2				1	0,99	0,98			0,93	0,94	0,88			0,87	0,84	-0,93	-0,94	0,95			0,87	-0,83			
Ca1					1	0,98			0,87	0,89	0,83			0,79		-0,86	-0,91	0,98			0,79	-0,81	-0,82		
Ca2						1			0,95	0,96	0,89			0,89	0,86	-0,94	-0,92	0,93			0,90	-0,83			
⁹⁰ SrK							1	0,93											0,82						
⁹⁰ SrO								1																	
SrK									1		0,81	0,80		0,99	0,91	-0,99	-0,98		0,92	0,86	0,92	-0,89			
SrO										1				0,98	0,90	-0,99	-0,98	0,79		0,85	0,91	-0,89			
CaK											1	0,91			0,93	-0,81		0,85			0,95				-0,78
CaO												1			0,98	-0,82					0,97				-0,93
KP													1												
SP														1	0,87	-0,99	-0,97				0,87	-0,91			
PR															1	-0,92	-0,82				0,99				-0,83
GL																1		0,98		-0,86	-0,92	0,88			
VZ																	1	-0,81		-0,88	-0,83	0,95			
GZ																		1					-0,86		
pH _V																			1						
pH _K																				1		-0,94			
CC																					1				-0,81
HU																						1			
OC																							1	0,85	
OC _H																								1	
OC _F																									1

*Nivo značajnosti: $p < 0,05$

**Nivo značajnosti: $p < 0,01$

***Nivo značajnosti: $p < 0,001$

Tabela 10. Pirsonovi korelacioni koeficijenti (ogledno polje Rimski Šančevi, sloj zemljišta 15-30 cm, 2014.)

	⁹⁰ Sr1	⁹⁰ Sr2	Sr1	Sr2	Ca1	Ca2	⁹⁰ SrK	⁹⁰ SrO	SrK	SrO	CaK	CaO	KP	SP	PR	GL	VZ	GZ	pH _V	pH _K	CC	HU	OC	OC _H	OC _F
⁹⁰ Sr1	1	0,90			0,89		0,85											0,91				-0,85	-0,98		-0,79
⁹⁰ Sr2		1	0,78	0,88	0,94	0,81					0,82							0,99					-0,88		
Sr1			1	0,98	0,92	0,97			0,97	0,97	0,93	0,88		0,92	0,96	-0,97	-0,93	0,85			0,97	-0,78			
Sr2				1	0,97	0,98			0,94	0,95	0,93	0,80		0,87	0,89	-0,93	-0,92	0,94			0,92	-0,78			
Ca1					1	0,96			0,88	0,90	0,85			0,80		-0,87	-0,91	0,98			0,81	-0,80	-0,80		
Ca2						1			0,98	0,98	0,85			0,93	0,87	-0,97	-0,98	0,89			0,89	-0,88			
⁹⁰ SrK							1	0,93											0,82						
⁹⁰ SrO								1																	
SrK									1	0,99	0,81	0,80		0,99	0,91	-0,99	-0,98			0,86	0,92	-0,89			
SrO										1	0,82	0,80		0,98	0,90	-0,99	-0,98	0,80		0,85	0,91	-0,89			
CaK											1	0,91			0,93	-0,81		0,85			0,95				-0,78
CaO												1			0,98	-0,82					0,97				-0,93
KP													1												
SP														1	0,87	-0,99	-0,97			0,92	0,87	-0,91			
PR															1	-0,92	-0,82				0,99				-0,83
GL																1	0,98			-0,86	-0,92	0,88			
VZ																	1	-0,81		-0,88	-0,83	0,95			
GZ																		1					-0,86		
pH _V																			1						
pH _K																				1		-0,94			
CC																					1				-0,81
HU																						1			
OC																							1	0,85	
OC _H																								1	
OC _F																									1

*Nivo značajnosti: $p < 0,05$

**Nivo značajnosti: $p < 0,01$

***Nivo značajnosti: $p < 0,001$

Tabela 11. Pirsonovi korelacioni koeficijenti (ogledno polje Rimski Šančevi, sloj zemljišta 0-15 cm, 2015.)

	⁹⁰ Sr1	⁹⁰ Sr2	Sr1	Sr2	Ca1	Ca2	⁹⁰ SrK	⁹⁰ SrO	SrK	SrO	CaK	CaO	KP	SP	PR	GL	VZ	GZ	pH _V	pH _K	CC	HU	OC	OC _H	OC _F
⁹⁰ Sr1	1	0,99	0,99	0,87	0,99	0,81	0,84		0,97	-0,85	0,98						-0,82	0,91				-0,81	-0,94		-0,94
⁹⁰ Sr2		1	0,98	0,93	0,97	0,89	0,91		0,94	-0,92	0,94	-0,85					-0,89	0,89				-0,89	-0,88		-0,92
Sr1			1	0,86	0,99	0,80	0,82		0,95	-0,83	0,98							0,87				-0,79	-0,96	-0,79	
Sr2				1	0,86	0,99	0,99			-0,99				0,85		-0,83	-0,92			0,89		-0,99			
Ca1					1	0,79	0,81		0,95	-0,83	0,98							0,87				-0,79	-0,96	-0,80	
Ca2						1	0,99			-0,99		-0,99		0,87		-0,83	-0,92			0,93		-0,99			
⁹⁰ SrK							1			-0,99		-0,99		0,92		-0,90	-0,97			0,92		-0,99			
⁹⁰ SrO								1															-0,84	-0,99	
SrK									1		0,98						-0,80						-0,94		
SrO										1		0,99		-0,90		0,88	0,96	0,98		-0,91		0,99			
CaK											1							0,93					-0,98		
CaO												1		-0,94		0,91	0,96			-0,96		0,99			
KP													1												
SP														1	0,87	-0,99	-0,97			0,92	0,87	-0,91			
PR															1	-0,92	-0,82				0,99				-0,83
GL																1	0,98			-0,86	-0,92	0,88			
VZ																	1	-0,81		-0,88	-0,83	0,95			
GZ																		1					-0,86		
pH _V																			1						
pH _K																				1		-0,94			
CC																					1				-0,81
HU																						1			
OC																							1	0,85	
OC _H																								1	
OC _F																									1

*Nivo značajnosti: $p < 0,05$

**Nivo značajnosti: $p < 0,01$

***Nivo značajnosti: $p < 0,001$

Tabela 12. Pirsonovi korelacioni koeficijenti (ogledno polje Rimski Šančevi, sloj zemljišta 15-30 cm, 2015.)

	⁹⁰ Sr1	⁹⁰ Sr2	Sr1	Sr2	Ca1	Ca2	⁹⁰ SrK	⁹⁰ SrO	SrK	SrO	CaK	CaO	KP	SP	PR	GL	VZ	GZ	pH _V	pH _K	CC	HU	OC	OC _H	OC _F
⁹⁰ Sr1	1	0,99	0,96	0,92	0,95	0,89	0,96		0,90	-0,97	0,88	-0,92		0,83		-0,85	-0,94	0,86		0,78		-0,94	-0,80		-0,95
⁹⁰ Sr2		1	0,93	0,96	0,92	0,92	0,99		0,86	-0,99	0,83	-0,96		0,88		-0,88	-0,96	0,82		0,84		-0,97			-0,97
Sr1			1	0,79	0,99		0,86		0,98	-0,87	0,97	-0,79					-0,85	-0,83					-0,92		
Sr2				1	0,98		0,99					-0,99		0,92		-0,88	-0,95			0,96		-0,99			
Ca1					1		0,84		0,96	-0,85	0,98						-0,81	0,90				-0,81	-0,95		
Ca2						1	0,96			-0,97		-0,97		0,83			-0,87			0,94		-0,98			
⁹⁰ SrK							1			-0,99		-0,99		0,92		-0,90	-0,97			0,92		-0,99			
⁹⁰ SrO								1															-0,84	-0,99	
SrK									1	-0,77	0,98						-0,80	0,98					-0,96		
SrO										1		0,99		-0,90		0,88	0,96			-0,91		0,99			
CaK											1							0,93					-0,98		
CaO												1		-0,94		0,90	0,96			-0,96		0,99			
KP													1												
SP														1	0,87	-0,99	-0,97			0,92	0,87	-0,91			
PR															1	-0,92	-0,82				0,99				-0,83
GL																1	0,98			-0,86	-0,92	0,88			
VZ																	1	-0,81		-0,88	-0,83	0,95			
GZ																		1					-0,86		
pH _V																			1						
pH _K																				1		-0,94			
CC																					1				-0,81
HU																						1			
OC																							1	0,85	
OC _H																								1	
OC _F																									1

*Nivo značajnosti: $p < 0,05$

**Nivo značajnosti: $p < 0,01$

***Nivo značajnosti: $p < 0,001$

BIOGRAFIJA KANDIDATA

Nataša B. Sarap je rođena 5. marta 1981. godine u Somboru. Osnovnu školu „Mladost” je završila u Prigrevici, a srednju medicinsku školu „Dr Ružica Rip” u Somboru. Diplomirala je na Fakultetu za fizičku hemiju Univerziteta u Beogradu, u maju 2010. godine, sa prosečnom ocenom 8,53 u toku studija, odbranom diplomskog rada pod nazivom „Uticaj sintetskog katalizatora na bazi kobalta na dinamiku Bray-Liebhafsky reakcije”. Master akademske studije je završila takođe na Fakultetu za fizičku hemiju, sa prosečnom ocenom 9,60 u toku master studija, odbranivši u martu 2012. godine master rad pod nazivom „Primena Bray-Liebhafsky reakcije za kvantitativno određivanje piroksikama”. Doktorske studije na Fakultetu za fizičku hemiju je upisala u toku školske 2011/12. godine.

Nakon završetka osnovnih studija, zaposlila se na Fakultetu za fizičku hemiju Univerziteta u Beogradu, na radnom mestu istraživač-pripravnik, kao učesnik projekta „Fizička hemija dinamičkih stanja i struktura neravnotežnih sistema - od monotone do oscilatorne evolucije i haosa”, pod brojem 142025 (2006-2010. godina) i rukovodstvom dr Ljiljane Kolar-Anić, finansiranom od strane Ministarstva za prosvetu, nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije.

Od 1. februara 2011. godine zaposlena je u Laboratoriji za zaštitu od zračenja i zaštitu životne sredine, Instituta za nuklearne nauke „Vinča” Univerziteta u Beogradu. Angažovana je na projektu Ministarstva za prosvetu, nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije, pod brojem III 43009 (2011-2017. godina) i nazivom „Nove tehnologije za monitoring i zaštitu životnog okruženja od štetnih hemijskih supstanci i radijacionog opterećenja”, čiji je rukovodilac dr Antonije Onjia. Dana 21.03.2013. godine stekla je naučno zvanje istraživač saradnik, u koje je takođe i reizabrana 11.02.2016. godine.

Nataša B. Sarap je učesnik dva međunarodna bilateralna projekta (2016-2017.): između Republike Srbije i Republike Slovenije (projekat broj 29, Ministarstvo za prosvetu, nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije (MPNTR), pod nazivom „Antropogeni radionuklidi u reci Savi i njihov prekogranični efekat”, čiji je rukovodilac dr Marija Janković) i između Republike Srbije i Republike Hrvatske (projekat broj 38, MPNTR, pod nazivom „Ispitivanje sorpcije radionuklida na sintetičkim i prirodnim

sorbentima sa akcentom na potencijalnu primenu u analitici i/ili sigurnom odlaganju”, čiji je rukovodilac dr Ivana Smičiklas).

Član je Društva za zaštitu od zračenja Srbije i Crne Gore, kao i Društva fizikohemičara Srbije.

U toku svog dosadašnjeg rada, pohađala je sledeće obuke, seminare i kurseve:

- „Obuka za rad sa otvorenim izvorima jonizujućih zračenja”, Centar za permanentno obrazovanje Instituta za nuklearne nauke „Vinča”, Beograd, Republika Srbija, maj-jun 2011. godine
- Seminar „Proficiency Testing”, LGC Standards, Beograd, Republika Srbija, novembar 2013. godine
- I Edukacioni simpozijum „Radiation and Health for young Scientists”, Univerzitet u Hirosakiju, Hirosaki, Japan, septembar 2014. godine (Nagrada za najbolju poster prezentaciju na IV Međunarodnoj konferenciji za zaštitu životne sredine „Terrestrial Radioisotopes in Environment”, održanoj u Vespremu (Mađarska) u maju 2014. godine)
- „Training in radiochemical methods and radioactivity measurements for practitioners”, Institut „Jožef Stefan” (Ljubljana) u saradnji sa Joint Research Centre, Institute for Reference Materials and Measurements (Belgium), Ljubljana, Slovenija, novembar 2014. godine
- Periodična obnova znanja „Obuka za rad sa otvorenim i zatvorenim izvorima jonizujućih zračenja i osposobljavanje za sprovođenje mera zaštite”, Centar za permanentno obrazovanje Instituta za nuklearne nauke „Vinča”, Beograd, Republika Srbija, mart 2015. godine
- „How to get published in international journals”, Wiley Author Workshop, Beograd, Republika Srbija, april 2016. godine
- „Obuka za rad na tečnom scintilacionom detektoru”, Institut za nuklearne nauke „Vinča”, Beograd, Republika Srbija, jun 2016. godine.

Istraživački rad Nataše B. Sarap u oblasti zaštite životne sredine, odnosi se na izučavanje procene kontaminacije životne sredine radionuklidima i metoda za merenje radioaktivnosti u uzorcima iz životne sredine. U oblasti zaštite od zračenja, bavi se proračunima apsorbovanih i godišnjih efektivnih doza, u cilju zaštite stanovništva od izloženosti zračenju. Pored toga, učestvuje u sprovođenju monitoringa radioaktivnosti

životne sredine i kontrole kvaliteta laboratorije u kojoj je zaposlena; glavni ispitivač je od septembra 2015. godine.

NAUČNI DOPRINOS KANDIDATA

Objavljeni naučni radovi i saopštenja iz doktorske disertacije:

M21 - Rad u vrhunskom međunarodnom časopisu

1. Nataša B. Sarap, Marija M. Janković, Željko K. Dolijanović, Dušan Đ. Kovačević, Milica M. Rajačić, Jelena D. Nikolić, Dragana J. Todorović, *Soil to plant transfer factor for ^{90}Sr and ^{137}Cs* . Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry 303 (2015) 2523-2527.
2. Nataša B. Sarap, Milica M. Rajačić, Ivica G. Đalović, Srđan I. Šeremešić, Aleksandar R. Đorđević, Marija M. Janković, Marko Z. Daković, *Distribution of natural and artificial radionuclides in chernozem soil/crop system from stationary experiments*. Environmental Science and Pollution Research 23 (2016) 17761-17773.

M22 - Rad u istaknutom međunarodnom časopisu

1. Nataša B. Sarap, Marija M. Janković, Gordana K. Pantelić, *Validation of radiochemical method for the determination of ^{90}Sr in environmental samples*. Water Air and Soil Pollution 225 (2014) 2003-2013.

M33 - Saopštenje sa međunarodnog skupa štampano u celini

1. Nataša B. Sarap, Petar M. Mitrović, Srđan I. Šeremešić, Marija M. Janković, Adriana Radosavac, Ivica G. Đalović, *Vertical migration of ^{90}Sr radionuclide in agroecosystem*. Book of Proceedings, Sixth International Scientific Agricultural Symposium „Agrosym 2015”, Jahorina, Republic of Srpska, Bosnia (2015) 1517-1521.
2. Nataša B. Sarap, Marijana Nodilo, Marko Štok, Marija M. Janković, Željko Grahek, *Intercomparison of different methodologies for determination of radiostrontium in soil*

samples. Proceedings, XI Symposium of the Croatian Radiation Protection Association with international participation, Osijek, Croatia (2017) 255-260.

M34 - Saopštenje sa međunarodnog skupa štampano u izvodu

1. Nataša B. Sarap, Marija M. Janković, Milica M. Rajačić, Jelena D. Nikolić, Željko K. Dolijanović, Dragana J. Todorović, *Distribution of artificial radionuclides in agricultural soil at different profiles*. Book of Abstracts, 9th International Symposium on the Natural Radiation Environment (NRE-IX), Hiroasaki, Japan (2014) 180.

Objavljeni naučni radovi i saopštenja koji nisu proistekli iz doktorske disertacije:

Pored objavljenih radova koji su proistekli iz doktorske disertacije, Nataša B. Sarap je autor ili koautor: radova u međunarodnim časopisima (2 rada kategorije M 21, 1 rad kategorije M 22 i 7 radova kategorije M 23), radova u nacionalnim časopisima (1 rad kategorije M 51), poglavlja u knjigama M 11 i M 42 (1 rad kategorije M 13 i 2 rada kategorije M 45), saopštenja sa međunarodnih skupova (25 radova kategorije M 33 i 17 radova kategorije M 34) i saopštenja sa nacionalnih skupova (16 radova kategorije M 63 i 2 rada kategorije M 64).

Прилог 1.

Изјава о ауторству

Потписана: Наташа Б. Сарап

број индекса: 331/11

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом:

Праћење дистрибуције радионуклида ^{90}Sr
у пољопривредном земљишту и биљним културама
методом спектрометрије бета зрачења

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да предложена дисертација у целини ни у деловима није била предложена за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршила ауторска права и користила интелектуалну својину других лица.

Потпис докторанда

У Београду, _____

Прилог 2.

**Изјава о истоветности штампане и електронске
верзије докторског рада**

Име и презиме аутора: Наташа Б. Сарап

Број индекса: 331/11

Студијски програм: Докторске студије физичке хемије

Наслов рада: Праћење дистрибуције радионуклида ^{90}Sr
у пољопривредном земљишту и биљним културама
методом спектрометрије бета зрачења

Ментори:

др Марко Ж. Даковић, доцент, Факултет за физичку хемију, Универзитет у
Београду

др Марија М. Јанковић, научни сарадник, Институт за нуклеарне науке „Винча”,
Универзитет у Београду

Потписана Наташа Б. Сарап

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предала за објављивање на порталу **Дигиталног репозиторијума Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис докторанда

У Београду, _____

Прилог 3.

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

Праћење дистрибуције радионуклида ^{90}Sr
у пољопривредном земљишту и биљним културама
методом спектрометрије бета зрачења

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предала сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучила.

1. Ауторство

☒ 2. Ауторство - некомерцијално

3. Ауторство – некомерцијално – без прераде

4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима

5. Ауторство – без прераде

6. Ауторство – делити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је на полеђини листа).

Потпис докторанда

У Београду, _____

1. Ауторство - Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.

2. Ауторство – некомерцијално. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.

3. Ауторство - некомерцијално – без прераде. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.

4. Ауторство - некомерцијално – делити под истим условима. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.

5. Ауторство – без прераде. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.

6. Ауторство - делити под истим условима. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.