

UNIVERZITET U BEOGRADU  
FAKULTET ZA FIZIČKU HEMIJU

Jelena M. Petrović

**OPTIMIZACIJA KONVERZIONIH MODELA  
ZA IZRAČUNAVANJE INTENZITETA  
EROZIJE ZEMLJIŠTA NA OSNOVU  
AKTIVNOSTI RADIOIZOTOPA <sup>137</sup>Cs**

doktorska disertacija

Beograd, 2017

UNIVERSITY OF BELGRADE  
FACULTY OF PHYSICAL CHEMISTRY

Jelena M. Petrović

**OPTIMIZATION OF CONVERSION MODELS  
FOR THE CALCULATION OF THE  
INTENSITY OF SOIL EROSION BASED ON  
ACTIVITIES OF RADIOISOTOPE <sup>137</sup>Cs**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2017

## Mentori

dr Šćepan Miljanić, redovni profesor u penziji  
Univerzitet u Beogradu - Fakultet za fizičku hemiju

---

dr Snežana Dragović, naučni savetnik  
Univerzitet u Beogradu - Institut za nuklearne nauke „Vinča”

---

## Članovi komisije

dr Marko Daković, docent  
Univerzitet u Beogradu - Fakultet za fizičku hemiju

---

dr Boško Gajić, redovni profesor  
Univerzitet u Beogradu - Poljoprivredni fakultet

---

Datum odbrane

\_\_\_\_\_, Beograd

---

## **Zahvalnica**

*Neizmernu zahvalnost dugujem mentorki dr Snežani Dragović, naučnom savetniku Instituta za nuklearne nauke „Vinča”, na iskrenim i neprocenjivim savetima i ogromnom razumevanju tokom svih godina zajedničkog rada kao i na bezuslovnoj ličnoj i profesionalnoj podršci, ogromnom strpljenju i vremenu posvećenom izradi ove doktorske disertacije.*

*Mentoru dr Ščepanu Miljaniću, redovnom profesoru Fakulteta za fizičku hemiju u Beogradu, veliku zahvalnost dugujem na stručnoj pomoći i podršci u toku izrade doktorske disertacije i njenom konačnom uobličavanju.*

*Prof. dr Ranku Dragoviću, dr Milanu Đorđeviću i dr Mrđanu Đokiću, Prirodno-matematički fakultet u Nišu, zahvaljujem na ogromnoj pomoći prilikom terenskih istraživanja i kasnije u toku izrade same doktorske disertacije.*

*Prof. dr Desmond Walling-u, Department of Geography, University of Exeter, dugujem veliku zahvalnost na nesebičnoj pomoći prilikom implementacije modela za izračunavanja intenziteta erozije.*

*Prof. dr Bošku Gajiću, Poljoprivredni fakultet u Beogradu, zahvalnost dugujem za pomoć pri fizičkohemijским analizama i korisnim sugestijama u konačnom uobličavanju doktorske disertacije.*

*Zahvaljujem se dr Marku Dakoviću na korisnim savetima, uloženom vremenu i trudu.*

*Zahvaljujem se kolegama iz Instituta za nuklearne nauke „Vinča” i Instituta za primenu nuklearne energije - INEP, gde je urađena ova doktorska disertacija.*

# OPTIMIZACIJA KONVERZIONIH MODELA ZA IZRAČUNAVANJE INTENZITETA EROZIJE ZEMLJIŠTA NA OSNOVU AKTIVNOSTI RADIOIZOTOPA $^{137}\text{Cs}$

## Sažetak

U radu je ispitana mogućnost primene konverzionih modela za ispitivanje intenziteta erozije neobrađivanog zemljišta korišćenjem radioizotopa  $^{137}\text{Cs}$ . Neki razvijeni konverzioni modeli optimizovani su za potrebe primene na istraživanom prostoru male površine gde je černobiljska depozicija dominantna, odnosno za izračunavanje srednjeg godišnjeg intenziteta erozije zemljišta za period od 1986. do 2014. godine (godine uzorkovanja).

Utvrđeno je da srednje vrednosti specifične aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  u uzorcima zemljišta sakupljenim sa neobrađivanog erozionog prostora (većeg - A i manjeg - B) u dolini reka Pčinje i Južne Morave, jugoistočna Srbija, u periodu od 2013. do 2015. godine, iznose  $39 \text{ Bq kg}^{-1}$  na istraživanom prostoru A+B (ukupnom istraživanom prostoru),  $22 \text{ Bq kg}^{-1}$  na istraživanom prostoru velike površine A i  $63 \text{ Bq kg}^{-1}$  na istraživanom prostoru male površine B. Ispitivanjem vertikalne distribucije  $^{137}\text{Cs}$  u analiziranim profilima neobrađivanog zemljišta uočeno je opadanje vrednosti specifičnih aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  sa dubinom.

Korelacije između specifičnih aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  i fizičko-hemijskih karakteristika zemljišta ispitane su primenom neparametarske korelacione analize, Spirmanovog koeficijenta korelacije rangova. U cilju grupisanja podataka primenjena je hijerarhijska analiza grupisanja. Pozitivne korelacije utvrđene su između specifičnih aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  i sledećih fizičko-hemijskih karakteristika zemljišta: sadržaja krupnog peska (na prostoru A+B), sadržaja sitnog peska (na prostoru A+B i A), sadržaja humusa (na prostoru A+B, A i B) i specifične električne provodljivosti - K (na prostoru B), dok su negativne korelacije utvrđene između  $^{137}\text{Cs}$  i sledećih fizičko-hemijskih karakteristika zemljišta: sadržaja praha (na prostoru A+B), sadržaja gline (na prostoru A+B i A), ukupnog kapaciteta izmene katjona u zemljištu - CEC (na prostoru A+B), sadržaja karbonata -  $\text{CaCO}_3$  (na prostoru A+B) i pH vrednosti zemljišta (na prostoru A+B i B).

Na istraživanom prostoru male površine B intenziteti erozije izračunati su primenom modela PD (model profilne distribucije), DM (difuzioni i migracioni model) i MODERN (modelovanje intenziteta erozije korišćenjem radionuklida), konvertovanjem površinske aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  u intenzitet erozije zemljišta ( $\text{t ha}^{-1} \text{ god}^{-1}$ ). Takođe za izračunavanje srednjeg dugogodišnjeg intenziteta erozije zemljišta korišćena je i univerzalna jednačina gubitka

zemljišta - model USLE. Srednje vrednosti intenziteta erozije na istraživanom prostoru B primenom modela PD, DM, MODERN i USLE iznose -12; -4,0; -11; i -5,8 t ha<sup>-1</sup> god<sup>-1</sup>, redom. Intenziteti erozije zemljišta procenjeni primenom ovih modela, ukazuje da istraživani prostor male površine B pripada sledećim kategorijama erozije: model PD - jaka (10-20 t ha<sup>-1</sup> god<sup>-1</sup>); model DM - slaba (0-5 t ha<sup>-1</sup> god<sup>-1</sup>); model MODERN - jaka (10-20 t ha<sup>-1</sup> god<sup>-1</sup>); i model USLE - umerena (5-10 t ha<sup>-1</sup> god<sup>-1</sup>). Pokazano je da su vrednosti intenziteta erozije zemljišta dobijene primenom konverzionih modela korišćenjem radioizotopa <sup>137</sup>Cs na prostoru sa dominantnom černobiljskom depozicijom u skladu sa vrednostima dobijenim primenom modela USLE.

**Ključne reči:** <sup>137</sup>Cs; erozija zemljišta; model PD (Model profilne distribucije); model DM (Difuzioni i migracioni model); model MODERN (Modelovanje intenziteta erozije korišćenjem radionuklida); model USLE (Univerzalna jednačina gubitka zemljišta)

**Naučna oblast:** Fizička hemija

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

**UDK broj:** 544.58

# OPTIMIZATION OF CONVERSION MODELS FOR THE CALCULATION OF THE INTENSITY OF SOIL EROSION BASED ON ACTIVITIES OF RADIOISOTOPE $^{137}\text{Cs}$

## Abstract

This study examines the possibility of implementation of conversion models to estimate the soil erosion and deposition rates for uncultivated area using environmental radionuclide inventories of  $^{137}\text{Cs}$ . To obtain quantitative estimates of the average annual soil redistribution rates over the period from 1986 and sampling year (2014), from radionuclide measurements in the small study area with  $^{137}\text{Cs}$  input predominantly from Chernobyl accident (1986), some of conversion models have been modified.

The mean values of  $^{137}\text{Cs}$  specific activities in soil samples collected during 2013-2015 from uncultivated erosive area (large-scale area - A and small-scale area - B) of southeastern Serbia, Pčinja and South Morava River Basins, were  $39 \text{ Bq kg}^{-1}$  for the entire study area (A+B),  $22 \text{ Bq kg}^{-1}$  for the large-scale area (A) and  $63 \text{ Bq kg}^{-1}$  for the small-scale area (B). In the analysed profiles the specific activities of the  $^{137}\text{Cs}$  decreased with soil depth.

Correlations between  $^{137}\text{Cs}$  specific activities and soil properties were determined by non-parametric test, Spearman's rank order correlation. Hierarchical cluster analysis was applied in order to identify groups of variables. Positive correlations were found between  $^{137}\text{Cs}$  specific activity and following soil properties: coarse sand content (study area A+B), fine sand content (study areas A+B and A), organic matter content (study areas A+B, A and B) and specific electrical conductivity - K (study area B) while negative correlations were found between  $^{137}\text{Cs}$  specific activity and following soil properties: silt content (study area A+B), clay content (study areas A+B, A and A), cation exchange capacity - CEC (study area A+B), carbonate content -  $\text{CaCO}_3$  (study area A+B) and soil pH (study areas A+B and B).

At small-scale area B, PD model (Profile Distribution Model), DM model (Diffusion and Migration Model) and MODERN model (Modelling Deposition and Erosion rates with RadioNuclides) have been used to convert  $^{137}\text{Cs}$  inventories to quantitative estimates of erosion and deposition rates. Also, USLE (Universal Soil Loss Equation) method have been used to estimate the long-term average annual soil loss. The net erosion rate obtained using the Profile Distribution Model, Diffusion and Migration Model, MODERN model and USLE method were found to be -12, -4.0, -11 and  $-5.8 \text{ t ha}^{-1} \text{ god}^{-1}$ , respectively. Small-scale area B was found to be under high erosion rate ( $10\text{-}20 \text{ t ha}^{-1} \text{ god}^{-1}$ ) according to net erosion rate

obtained by Profile Distribution Model, under slight erosion rate ( $0-5 \text{ t ha}^{-1} \text{ god}^{-1}$ ) according to Diffusion and Migration Model, under high erosion rate ( $10-20 \text{ t ha}^{-1} \text{ god}^{-1}$ ) according to MODERN model and under moderate erosion rate ( $5-10 \text{ t ha}^{-1} \text{ god}^{-1}$ ) according to USLE method. Soil redistribution rates quantified by caesium-137 methods in the area with  $^{137}\text{Cs}$  input predominantly from Chernobyl accident were in good agreement with erosion rate calculated by USLE method.

**Key words:**  $^{137}\text{Cs}$ ; Soil Erosion; PD Model (Profile Distribution Model); DM Model (Diffusion and Migration Model); Model MODERN (Modelling Deposition and Erosion rates with RadioNuclides); USLE Model (Universal Soil Loss Equation)

**Scientific field:** Physical Chemistry

**Scientific discipline:** Radiochemistry and Nuclear Chemistry, Environmental Protection

**UDK number:** 544.58



## SADRŽAJ

1. UVOD.....	3
2. TEORIJSKE OSNOVE.....	4
2.1. Radioaktivnost zemljišta.....	4
2.1.1. Veštački radionuklidi u zemljištu.....	5
2.2. Poreklo i karakteristike $^{137}\text{Cs}$ u zemljištu.....	6
2.3. Distribucija i migracija $^{137}\text{Cs}$ u zemljištu.....	9
2.4. Erozija zemljišta.....	10
2.4.1. Oblici erozije zemljišta.....	11
2.4.2. Erozija u Srbiji: stanje i pregled dosadašnjih istraživanja.....	12
2.5. Cilj istraživanja.....	17
2.5.1. Korišćenje radionuklida za procenu intenziteta erozije zemljišta.....	18
2.5.2. Istraživani prostor.....	21
3. MATERIJAL I METODE RADA.....	24
3.1. Sakupljanje uzoraka.....	24
3.2. Gamaspektrometrijska analiza.....	27
3.2.1. Kalibracija detektora.....	28
3.2.2. Određivanje specifične aktivnosti $^{137}\text{Cs}$ .....	29
3.2.3. Određivanje površinske aktivnosti $^{137}\text{Cs}$ .....	30
3.2.4. Nesigurnost merenja aktivnosti i minimalna detektabilna aktivnost.....	31
3.3. Određivanje fizičko-hemijskih karakteristika zemljišta.....	31
3.4. Metode statističke analize podataka.....	32
3.5. Modeli za izračunavanje intenziteta erozije zemljišta.....	33
3.5.1. Model profilne distribucije - model PD.....	33
3.5.2. Model difuzije i migracije - model DM.....	34
3.5.3. Model MODERN.....	37
3.5.4. Programi za procenu intenziteta erozije zemljišta.....	39
3.5.5. Model USLE.....	40
4. REZULTATI I DISKUSIJA.....	43
4.1. Specifične aktivnosti $^{137}\text{Cs}$ u zemljištu istraživanog prostora.....	43
4.2. Fizičko-hemijske karakteristike zemljišta istraživanog prostora.....	49
4.3. Korelacije i analiza grupisanja.....	55

4.4. Ispitivanje intenziteta erozije zemljišta na osnovu aktivnosti $^{137}\text{Cs}$ na istraživanom prostoru male površine B .....	59
4.4.1. Referentna površinska aktivnost $^{137}\text{Cs}$ .....	60
4.4.2. Površinska aktivnost $^{137}\text{Cs}$ na istraživanom prostoru male površine B .....	62
4.4.3. Intenziteti erozije izračunati primenom modela PD .....	69
4.4.4. Intenziteti erozije izračunati primenom modela DM .....	71
4.4.5. Intenziteti erozije izračunati primenom modela MODERN .....	72
4.4.6. Poređenje intenziteta erozije zemljišta primenom modela PD, DM i MODERN .....	80
4.4.7. Intenziteti erozije procenjeni primenom tradicionalnog modela USLE .....	84
5. ZAKLJUČAK .....	87
6. LITERATURA .....	91
Prilog 1.....	107
Prilog 2.....	108
Prilog 3.....	109
Biografija kandidata.....	110

## 1. UVOD

Degradacija zemljišta predstavlja proces narušavanja kvaliteta i funkcija zemljišta prirodnim putem ili pod uticajem čovekove aktivnosti. Do degradacije zemljišta može doći usled erozije zemljišta, smanjenja sadržaja organskih materija u zemljištu, sabijanja zemljišta, acidifikacije, salinizacije i alkalizacije zemljišta, hemijskog zagađenja zemljišta i dr.

Erozija zemljišta, kao jedan od glavnih uzroka degradacije zemljišta, je najčešće prirodni fizički proces koji predstavlja spiranje odnosno odnošenje površinskog sloja zemljišta pod uticajem erozionih agenasa kao što su voda, vetar, gravitacija i dr. Nepravilnim korišćenjem zemljišta i narušavanjem prirodnih ekosistema, kao što su nekontrolisana seča šuma posebno na strmim brdima i planinama, erozija zemljišta se može znatno ubrzati. Usled dugotrajnog dejstva intenzivnih erozionih procesa može doći do trajnog gubitka zemljišta. Na eroziju zemljišta utiče veliki broj faktora, kao što su: količina i intenzitet padavina, nagib terena, fizičke i hemijske karakteristike zemljišta, vegetacija i dr.

Prema karti erozije Srbije [1] izrađenoj u periodu od 1966. do 1971. godine 86,39% teritorije Srbije (76354,43 km<sup>2</sup>) zahvaćeno je različitim intenzitetom erozije, i to: 41,19% zahvaćeno je vrlo slabom erozijom, 18,16% zahvaćeno je slabom erozijom, 12,67% zahvaćeno je srednjom, 13,21% zahvaćeno je jakom erozijom i 1,16% ekscisivnom erozijom. Prema podacima iz 2009. godine [2] odnos između pojedinih kategorija erozije u odnosu na prethodno prikazane je promenjen, pa tako prema ovim podacima: 41,19% teritorije Srbije zahvaćeno je vrlo slabom erozijom, 24,63% zahvaćeno je slabom erozijom, 16,69% zahvaćeno je srednjom erozijom, 3,30% zahvaćeno je jakom erozijom i 0,58% ekscisivnom erozijom.

Poznavanje intenziteta erozije je izuzetno važno u cilju očuvanja zemljišta koje predstavlja jedan od najvažnijih prirodnih resursa. Potraga za alternativnim tehnikama za procenu erozije zemljišta u cilju dopunjavanja postojećih metoda i ispunjavanja novih zahteva skrenula je pažnju na određenu grupu radionuklida iz životne sredine, deponovanih radionuklida <sup>137</sup>Cs, <sup>210</sup>Pb<sup>ex</sup> i <sup>7</sup>Be. Ovi prirodni i veštački/antropogeni radioizotopski markeri predstavljaju veoma efikasne i korisne alatke za procenu erozije i akumulacije zemljišta u okviru nekog predela na nekoliko vremenskih i prostornih skala. Upotreba radionuklida može da upotpuni i u nekim slučajevima čak i da zameni konvencionalna merenja erozije i akumulacije.

---

<sup>1</sup> U engleskoj literaturi često nazivan „unsupported” ili „excess” <sup>210</sup>Pb

## 2. TEORIJSKE OSNOVE

### 2.1. Radioaktivnost zemljišta

Radionuklidi (radioizotopi ili radioaktivni izotopi) su nestabilni izotopi koji poseduju višak energije. Radionuklidi zahvaljujući svojoj unutrašnjoj nestabilnosti podležu radioaktivnom raspadu (jednačina 1), odnosno spontanom procesu prelaska nestabilnog jezgra u stabilno ili stabilnije stanje pri čemu dolazi do emisije čestica ili elektromagnetnog zračenja [3]:



gde je  $X$  - predak (roditelj),  $Y$  - potomak,  $x$  - emitovana čestica ili kvant (radioaktivno zračenje) i  $\Delta\varepsilon$  - energija zračenja (kin. en. česice +  $\gamma$ ).

Za sve tipove radioaktivnog raspada ( $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ - raspad, zahvat elektrona i spontano cepanje jezgara) važi jedinstven kinetički zakon. Zakon radioaktivnog raspada može se prikazati u sledećem obliku:

$$N = N_0 e^{-\lambda t} = N_0 e^{-\frac{t \ln 2}{t_{1/2}}} \quad (2)$$

gde je  $N_0$  - broj radioaktivnih jezgara prisutnih u početnom trenutku ( $t=0$ ),  $N$  - broj jezgara polaznog radioizotopa koji ostaje neraspadnut nakon isteka vremena  $t$ ,  $\lambda$  - radioaktivna konstanta ( $s^{-1}$ ) i  $t_{1/2}$  - vreme poluraspada.

Vreme poluraspada  $t_{1/2}$  (kreće se od  $10^{-10}$  s do  $10^{15}$  god) definiše kinetiku odnosno brzinu raspada posmatranog radionuklida, dok konstanta raspada  $\lambda$  karakteriše verovatnoću radioaktivnog raspada posmatranog radionuklida [3].

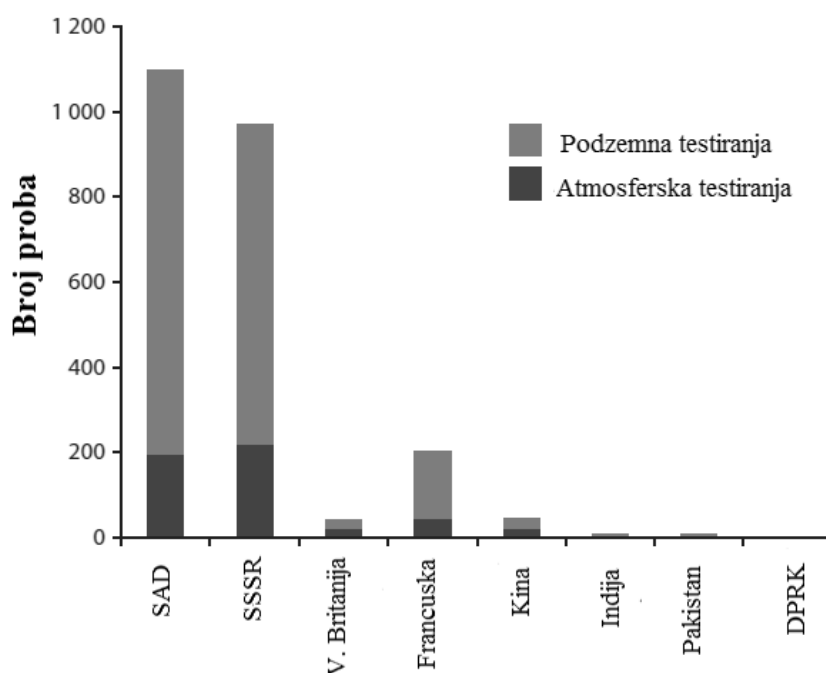
Svi poznati radionuklidi mogu se svrstati u dve osnovne kategorije: (1) prirodni radionuklidi (primordijalni i kosmogeni) i (2) antropogeni/veštački radionuklidi koji su nastali kao produkt ljudske aktivnosti.

Zemljište je glavni rezervoar za dugoživuće radionuklide oslobođene u terestričku životnu sredinu [4] i kao takav predstavlja medijum za transfer radionuklida do bioloških sistema i osnovni indikator radioaktivne kontaminacije životne sredine.

### 2.1.1. Veštački radionuklidi u zemljištu

Veštački radionuklidi mogu dospeti u životnu sredinu iz velikog broja izvora [5]. Testiranje nuklearnog oružja predstavlja jedan od najznačajnijih izvora veštačkih radionuklida u životnoj sredini. Nekoliko stotina testiranja nuklearnog oružja u atmosferi izvršeno je širom sveta u periodu od 1945. do 1980. godine [6]. Najveći broj testiranja nuklearnog oružja izvršen je u periodu od 1952. do 1958. godine i od 1961. do 1962. godine [6]. Nuklearno oružje korišćeno je dva puta u vojne svrhe u avgustu 1945. godine (krajem II svetskog rata) bacanjem atomskih bombi „Mali dečak” i „Debeli čovek” na japanske gradove Hirošimu (06. avgust 1945.) i Nagasaki (09. avgust 1945) od strane Sjedinjenih Američkih Država, dok su ostale nuklearne eksplozije izvršene u cilju testiranja oružja i njihovih efekata [7].

Nakon potpisivanja sporazuma o zabrani testiranja nuklearnog oružja u atmosferi, svemiru i pod vodom 1963. godine, probe nuklearnog oružja uglavnom su izvođene ispod površine Zemlje (podzemne) [7]. Broj proba nuklearnog oružja, u zemljama gde ih je najviše izvršeno, prikazane su na slici 1.



Slika 1. Broj proba nuklearnog oružja [6]

Nuklearni akcidenti predstavljaju još jedan od bitnijih izvora veštačkih radionuklida u životnoj sredini. U svetu postoji preko 400 aktivnih nuklearnih reaktora, od kojih se najveći broj nalazi u Americi, Francuskoj, Japanu i Rusiji. U toku rada tipičnog nuklearnog reaktora nastaje preko 200 radionuklida, a većina nastalih radionuklida su kratkoživi [5].

Najveći nuklearni akcident dogodio se 26. aprila 1986. godine u Ukrajini, na četvrtom bloku nuklearne elektrane Lenjin u Černobilju. Procenjuje se da je tokom akcidenta oslobođeno ukupno 14 EBq radioaktivnih materija, prvenstveno uključujući 1,8 EBq  $^{131}\text{I}$ , 0,085 EBq  $^{137}\text{Cs}$  i njegovih drugih izotopa, 0,01 EBq  $^{90}\text{Sr}$ , 0,003 EBq plutonijumovih izotopa [8]. Raznošenje radioaktivnog materijala bilo je veoma nehomogeno, i u najvećoj meri zavisilo je od meteoroloških uslova. Najveći deo aktivnosti deponovan je u Ukrajini, Belorusiji i Ruskoj Federaciji [8]. Od ukupno emitovanih radionuklida iz oštećenog reaktora u Černobilju na teritoriji Socijalističke Federativne Republike Jugoslavije (SFRJ) deponovano je oko 2,4% [9].

Drugi značajan nuklearni akcident odigrao se 11. marta 2011. godine, u nuklearnoj elektrani u Fukušimi, Japan. Procenjuje se da je tokom akcidenta u atmosferu oslobođeno oko 6-12 EBq  $^{133}\text{Xe}$ , 0,1-0,4 EBq  $^{131}\text{I}$  i oko 0,007-0,02 EBq  $^{137}\text{Cs}$  [10]. Oslobođeni radioaktivni materijal uglavnom je bio usmeren ka istoku i severu Japana, prateći preovlađujući pravac vetra, a potom i širom sveta [10]. U severnom delu Srbije detektovane su veoma niske koncentracije  $^{131}\text{I}$  poreklom iz akcidenta u Fukušimi [11]. Radioizotop  $^{131}\text{I}$  u severnom delu Srbije prvi put je detektovan u vazduhu 24. marta 2011. godine ( $0,4 \text{ mBq m}^{-3}$ ), dok je maksimalna koncentracija detektovana 30. marta 2011. godine ( $2,7 \text{ mBq m}^{-3}$ ) [11].

Putem vazdušnih i vodenih strujanja veštački radionuklidi sa dugim vremenom poluraspada (kao što su na primer  $^{90}\text{Sr}$  i  $^{137}\text{Cs}$ ) mogu se preneti na velike udaljenosti od mesta njihovog otpuštanja u životnu sredinu [12, 13] i tako dovesti do globalne kontaminacije, dok veliki broj veštačkih radionuklida usled kratkog vremena poluraspada značajno doprinosi lokalnoj kontaminaciji životne sredine tj. kontaminaciji prostora u neposrednoj blizini mesta proba nuklearnog oružja ili havarije [13].

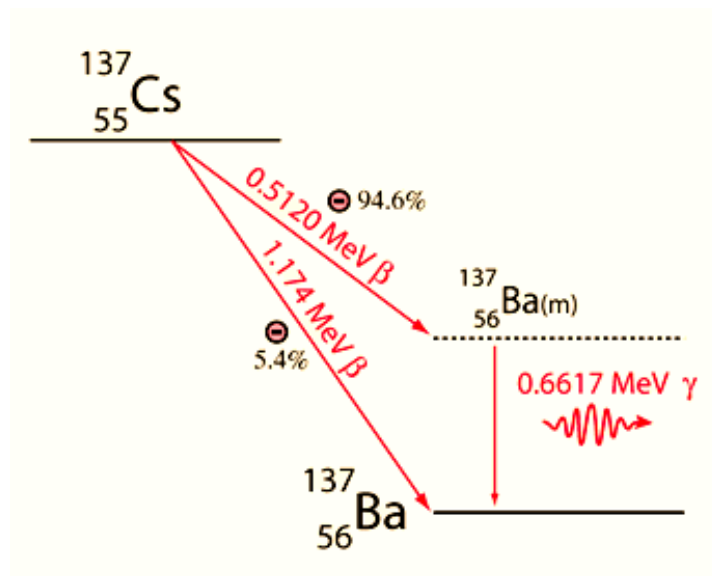
## 2.2. Poreklo i karakteristike $^{137}\text{Cs}$ u zemljištu

Nemački istraživači, hemičar Robert Busen i fizičar Gustav Kirhhoff, otkrili su cezijum (Cs) 1860. godine metodom plamene spektrometrije. Naziv cezijuma potiče od latinske reči "*caesius*" što znači nebo plavo. Cezijum je alkalni metal, nalazi se u prvoj grupi i šestoj

periodi Periodnog sistema elemenata, atomski broj cezijuma je 55. Jedini stabilni izotop cezijuma je  $^{133}\text{Cs}$ . Od ostalih poznatih izotopa cezijuma, samo dva  $^{134}\text{Cs}$  ( $t_{1/2}\sim 2,1$  godina) i  $^{137}\text{Cs}$  ( $t_{1/2}\sim 30,2$  godina) su od značaja za životnu sredinu, zahvaljujući njihovom relativno dugom vremenu poluraspada i emisiji  $\beta$ - i  $\gamma$ -zračenja tokom raspada [14].

Veštački radionuklid  $^{137}\text{Cs}$  nastaje kao produkt nuklearne fisije uranijuma. Zbog visokog fisionog prinosa (6,2%) i dugog vremena poluraspada,  $^{137}\text{Cs}$  je jedan od najzastupljenijih fisionih proizvoda u prirodi.

Jezgro radionuklida  $^{137}\text{Cs}$  podleže  $\beta^-$  raspadu pri čemu u najvećoj meri (94,6%) prelazi u metastabilni  $^{137\text{m}}\text{Ba}$  ( $t_{1/2}\sim 2,6$  minuta) koji uz gama emisiju na energiji od  $\sim 661,66$  KeV prelazi u osnovno stanje - stabilan  $^{137}\text{Ba}$  (slika 2), dok se u ostalim slučajevima (5,4%)  $\beta^-$  raspadom prelaz ostvaruje direktno u osnovno stanje - stabilan  $^{137}\text{Ba}$  (slika 2).



Slika 2. Šema radioaktivnog raspada  $^{137}\text{Cs}$  [15]

Cezijum-137 je hemijski analogan kalijumu i prati njegov metabolizam u organizmu, i predstavlja tzv. organotropni radionuklid, odnosno ne postoji kritični organ u kojem se deponuje već se distribuira u svim ćelijama [13, 16]. Biološko vreme polueliminacije za čoveka zavisi od starosnog doba, veličine mišićne mase i metabolizma organizma i kreće se od 10 do 110 dana [16, 17].

Najznačajniji izvori  $^{137}\text{Cs}$  u životnoj sredini su: (1) atmosfersko testiranje nuklearnog oružja, (2) nuklearni akcidenti i (3) lokalna otpuštanja iz nuklearnih reaktora i postrojenja za preradu isluženog goriva (*eng. reprocessing*) [14, 18].

Nakon otpuštanja  $^{137}\text{Cs}$  u atmosferu može doći do direktne ili indirektne kontaminacije biljnog pokrivača, zemljišta i vode u procesima suve (uklanjanje radioaktivnog materijala iz radioaktivnog oblaka gravitacionim taloženjem) ili vlažne (usled interakcije kišnih kapi i dispergovanog materijala) depozicije. Nakon deponovanja  $^{137}\text{Cs}$  iz atmosfere značajne količine  $^{137}\text{Cs}$  mogu biti zadržane na vegetacionom pokrivaču, zadržani  $^{137}\text{Cs}$  može biti adsorbovan ili apsorbovan od strane biljaka, a potom transportovan u zemljište spiranjem sa biljaka (u slučaju adsorpcije) ili kad se biljke osuše i istrule (u slučaju apsorpcije) [14, 19, 20]. Na globalnom nivou značajnija je vlažna depozicija, dok je na lokalnom nivou, odnosno u okolini otpuštanja radioaktivnog materijala, suva depozicija  $^{137}\text{Cs}$  takođe značajna [19, 20].

Nakon proba nuklearnog oružja  $^{137}\text{Cs}$  je otpušten u stratosferu i distribuiran širom sveta pre nego što je došlo do njegove depozicije, za razliku od akcidenta u Černobilju kada je velika količina  $^{137}\text{Cs}$  otpuštena u troposferu, ali on nije stigao do gornjih slojeva atmosfere i nije ostao dovoljno dugo u vazduhu da cirkuliše i proširi se, odnosno deponuje u sve delove sveta [14, 18]. Prostorna depozicija  $^{137}\text{Cs}$  poreklom od testiranja nuklearnog oružja pokazuje značajnu povezanost sa geografskom širinom. Ukupna depozicija značajno je veća u severnoj hemisferi u odnosu na južnu usled većeg broja testiranja nuklearnog oružja u severnoj hemisferi i ograničenog intenziteta razmene vazduha između hemisfera [14, 18]. Procenjeno je da je pre černobiljskog akcidenta ukupna količina od 20 PBq  $^{137}\text{Cs}$  zaostala u zemljištu Evrope poreklom od testiranja nuklearnog oružja [21]. Pre nuklearnog akcidenta u Černobilju prosečni nivoi površinske aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  na sledećim geografskim širinama 30-40 °N, 40-50 °N (ovom opsegu pripada geografska širina Srbije) i 50-60 °N iznosili su 1,8; 2,4 i 2,2 kBq m<sup>-2</sup>, redom [21].

Prostorna raspodela deponovanog  $^{137}\text{Cs}$  nakon černobiljskog akcidenta bila je veoma nehomogena. Kretanje radioaktivnog oblaka zavisilo je u najvećoj meri od meteoroloških uslova odmah nakon akcidenta, tj. pravca duvanja vetra i količine padavina. Nehomogena distribucija  $^{137}\text{Cs}$  oslikava nehomogenu distribuciju padavina odmah nakon akcidenta [14]. Radioaktivni oblak poreklom iz Černobilja doveo je do kontaminacije velikog dela Evrope [22]. Prema dostupnim podacima srednja vrednost površinske aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  u zemljištu na teritoriji SFRJ nakon akcidenta u Černobilju 1986. godine iznosila je 14 kBq m<sup>-2</sup>, krećući se od 0,8 kBq m<sup>-2</sup> u zoni minimalne kontaminacije do 83 kBq m<sup>-2</sup> u zoni maksimalne kontaminacije [9].

Poređenjem vrednosti površinske aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  pre černobiljskog akcidenta za opseg geografskih širina 40-50 °N [21], sa srednjom vrednošću površinske aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  u



zemljištu na teritoriji SFRJ nakon akcidenta u Černobilju [9] dolazi se do zaključka da  $^{137}\text{Cs}$  u najvećoj meri potiče od černobiljskog akcidenta dok manji deo potiče od proba nuklearnog oružja. Takođe se može pretpostaviti da zona minimalne kontaminacije nije zahvaćena černobiljskim oblakom, dok u zoni maksimalne kontaminacije  $^{137}\text{Cs}$  potiče uglavnom od černobiljskog akcidenta. Više od 80% od ukupnog  $^{137}\text{Cs}$  u površinskom sloju zemljišta u centralnoj Evropi u 2000. godini vodi poreklo iz černobiljskog akcidenta [23].

### 2.3. Distribucija i migracija $^{137}\text{Cs}$ u zemljištu

Na horizontalnu i vertikalnu distribuciju  $^{137}\text{Cs}$  u zemljištu utiče veliki broj faktora, kao što su: količina i vrsta padavina, vegetacioni pokrivač, topografski i biološki faktori, fizičko-hemijske karakteristike zemljišta (npr. tekstura zemljišta, sadržaj organskih materija, pH vrednost) i dr.

Nakon deponovanja iz atmosfere  $^{137}\text{Cs}$  dospeva na površinu zemljišta odakle migrira u dublje slojeve. Vertikalni transport cezijumovih jona ostvaruje se na različite načine: transportom jona usled proceđivanja vode kroz zemljište ili difuzijom jona u zemljišnoj vodi; transportom jona vezanih za koloide; mehaničkim mešanjem od strane životinja u zemljištu itd. [19]. Migracija  $^{137}\text{Cs}$  u dublje slojeve zemljišta je veoma spora. Migraciona brzina  $^{137}\text{Cs}$  u zemljištu Belorusije kretala se od 0,39 do 1,16 cm god<sup>-1</sup> [24]. Ispitivanje je pokazalo da se vertikalna distribucija  $^{137}\text{Cs}$  u zemljištu Švedske u prvoj i osmoj godini nakon černobiljskog akcidenta razlikovala. Naime u prvoj godini nakon akcidenta 91-98%  $^{137}\text{Cs}$  nađeno je u prvih 0-5 cm dubine, dok je kasnije nađeno 50-92%, takođe u prvoj godini nakon akcidenta migraciona brzina kretala se od 0,5 do 1,0 cm god<sup>-1</sup> a kasnije od 0,2 do 0,6 cm god<sup>-1</sup> [25].

Vertikalna distribucija ili profil  $^{137}\text{Cs}$  u zemljištu odražava različite fizičke, fizičko-hemijske i biološke procese koji se dešavaju u zemljištu. Značaj fizičko-hemijskih procesa je veći u nekim ekstremnim uslovima, gde je biološka aktivnost slaba i gde klimatski ili geološki faktori igraju ključnu ulogu. U većini neobrađivanih zemljišta, fizičko-hemijski procesi i biopedoturbacija su glavni faktori odgovorni za preraspodelu  $^{137}\text{Cs}$  u profilu zemljišta, dok je u obrađivanom zemljištu, preraspodela  $^{137}\text{Cs}$  pre svega rezultat mehaničkog mešanja pri obradi zemljišta. Lateralna (bočna) preraspodela  $^{137}\text{Cs}$  u zemljištu usled bioloških i hemijskih procesa je beznačajna u odnosu na kretanje  $^{137}\text{Cs}$  pod uticajem fizičkih procesa odnosno erozije i transporta pod uticajem vode i vetra [14, 20].

Vertikalna distribucija  $^{137}\text{Cs}$  značajno se razlikuje u obrađivanom i neobrađivanom zemljištu [26]. U neobrađivanom zemljištu koncentracija  $^{137}\text{Cs}$  opada sa dubinom zemljišta,

dok je u obrađivanom zemljištu koncentracija  $^{137}\text{Cs}$  homogeno distribuirana u oraničnom sloju, kao posledica mehaničkog mešanja slojeva zemljišta. U velikom broju studija utvrđeno je da se najveće aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  nalaze u površinskom sloju zemljišta i da njegova koncentracija opada sa dubinom [24, 25, 27–31]. Al-Masri (2013) je ukazao da tip zemljišta igra značajnu ulogu u vertikalnoj distribuciji  $^{137}\text{Cs}$  [32].

Cezijum-137 se ponaša kao monovalentni katjon  $^{137}\text{Cs}^+$  zbog čega se adsorbuje na negativno naelektrisanim česticama zemljišta [33, 34]. Cezijum se vezuje za minerale gline mehanizmom specifične adsorpcije [35], dok ostale komponente zemljišta kao što su na primer organske materije, kvarc, karbonati, (hidr)okisidi Fe, Al i Mn poseduju mnogo manji afinitet za cezijum [33, 36]. Adsorpcija cezijuma od strane minerala gline je veoma specifična, posebno kod minerala grupe ilita koji su veoma prisutni u pojedinim tipovima zemljišta. Jak afinitet ilita za cezijum uslovljen je relativno niskom hidratacionom energijom  $\text{Cs}^+$  (usled čega se veoma lako dehidriše) i postojanjem mesta sa oštećenim ivicama (*eng. frayed edge sites - FES*) u mineralima gline [33-37].

Adsorpcija cezijuma na organskim materijama je nespecifična i zavisi od kapaciteta izmene katjona organskih materija i relativnog odnosa cezijuma i drugih prisutnih katjona [33, 35]. Formiranje kompleksa između Cs i organskih liganada je zanemarljivo [35]. Rigol i sar. (2002) ukazali su na to da specifična mesta u glini kontrolišu adsorpciju radiocezijuma u organskom zemljištu i da organska jedinjenja imaju samo indirektan ali značajan efekat, i da se adsorpcija dešava uglavnom na nespecifičnim mestima samo u organskom zemljištu sa preko 95% organskih materija i zanemarljivim sadržajem frakcije gline [37]. Staunton i sar. (2002) su ukazali da uprkos slaboj, nespecifičnoj interakciji između organske materije i Cs, organske materije smanjuju afinitet minerala gline i na taj način umanjuju njihovu sposobnost da imobilizuju Cs u zemljištu [36]. Takođe, Dumat i sar. (1997) su ukazali na to da prisustvo organske materije umanjuje afinitet gline za cezijum [33].

## **2.4. Erozijska zemljišta**

Erozijska zemljišta predstavljaju prirodni proces odnošenja i ispiranja čestica zemljišta pod uticajem erozionih agenasa kao što su: voda, vetar, led, gravitacija i dr. Usled erozije dolazi do razaranja i nestajanja zemljišta [38]. Dugogodišnjim uticajem erozionih procesa može doći do menjanja morfoloških oblika na zemlji u smeru ublažavanja reljefa, usled erozije viših delova i prenošenja i akumuliranja nanosa u nižim delovima [39].

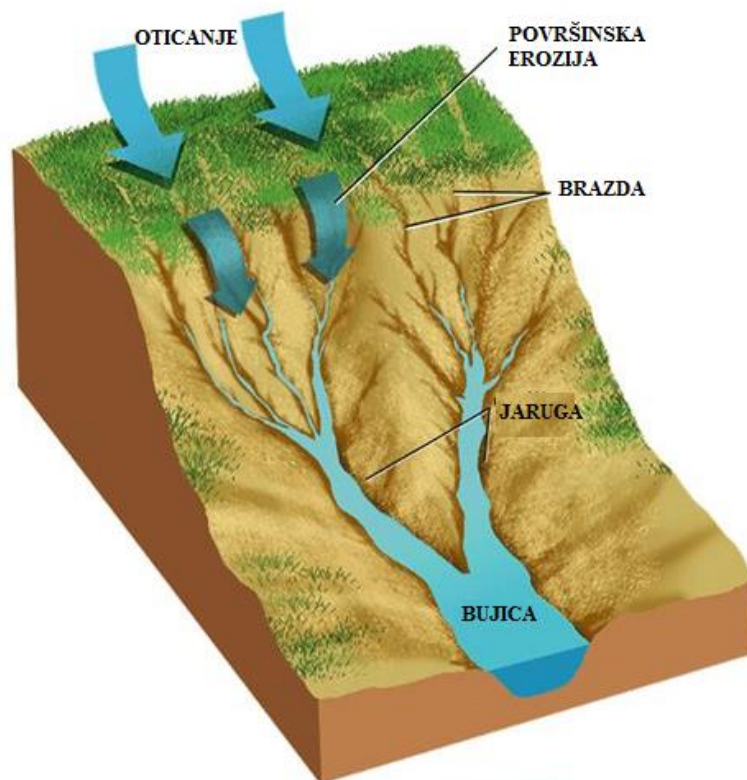
### 2.4.1. Oblici erozije zemljišta

Na osnovu glavnih erozionih agenasa izvršena je podela erozija zemljišta na: vodnu, eolsku, i gravitacionu.

Vodna erozija predstavlja odnošenje čestica zemljišta pod dejstvom vode i najprisutniji je oblik erozije. U zavisnosti od stanja u kojem se voda nalazi u momentu dejstva na zemljište, erozija vodom razvrstava se na: pluvijalnu (nastaje pod uticajem kiše), fluvijalnu (nastaje tekućom vodom) i glacijalnu/glečersku (nastaje dejstvom lednika).

U procesu pluvijalne erozije zemljišta razlikuju se tri osnovne faze: (1) odvajanje čestica zemljišta - kad kišna kap padne na zemljište ona svojom kinetičkom energijom odvaja pojedine čestice od ukupne mase zemljišta, (2) njihov transport - prenošenje erozijskog materijala pod uticajem površinskog oticanja i (3) sedimentacija ili akumulacija - taloženje erodiranog materijala nastaje kad energija površinske vode oslabi [40]. Pluvijalna erozija se pojavljuje u četiri oblika:

- (1) Kapljična erozija (*eng.* Splash erosion) nastaje udarom kišnih kapi, koje pored odvajanja vrše i transport čestica zemljišta.
- (2) Površinska erozija (*eng.* Sheet erosion) nastaje usled udara kišne kapi u zemljište pri čemu dolazi do odvajanja (otkidanja) čestica od ukupne mase zemljišta i njihovog transporta usled oticanja vode po površini zemljišta. Intenzitet erozije zavisi od količine i brzine oticanja vode po površini zemljišta (što je uslovljeno količinom i intenzitetom kiše), vrste i gustine biljnog pokrivača, kao i od nagiba površine (povećanjem nagiba povećava se i intenzitet erozije usled povećanja brzine i količine vode koja otiče).
- (3) Brazdasta erozija (*eng.* Rill erosion) nastaje kada se tokovi vode koncentrišu u plitke brazde i kanaliće, u kojima tekuća voda vrši i odvajanje i transport čestica zemljišta. Veličina brazdi zavisi od jačine površinskog oticanja, intenziteta padavina, infiltracije i nagiba terena.
- (4) Jaružna erozija (*eng.* Gully erosion) nastaje slično kao i brazdasta erozija, pri čemu se formiraju jaruge koje su šire i dublje od brazdi. Ukoliko se ne saniraju, često prelaze u bujične tokove koji predstavljaju najteži oblik erozije zemljišta (slika 3).



Slika 3. Erozioni oblici zemljišta usled oticanja vode [41]

Eolska erozija nastaje odnošenjem zemljišnog materijala (posebno najsitnijih čestica zemljišta kao što su: glina, prah i sitan pesak) vetrom. U zavisnosti od veličine, težine i vezanosti čestica kao i od snage vetra, čestice zemljišta se mogu preneti na veća ili manja rastojanja. Eolska erozija je zastupljena u oblastima gde je zemljište rastresito, prekriveno oskudnom vegetacijom i izloženo čestim i jakim vetrovima.

#### 2.4.2. Erozija u Srbiji: stanje i pregled dosadašnjih istraživanja

Različitim intenzitetima erozije zahvaćene su velike površine zemljišta u Srbiji. Korišćenjem empirijskog modela S. Gavrilovića [42, 43] (za izračunavanje koeficijenta erozije ( $Z$ )) korišćene su dopunjene tablice za određivanje parametara koji ulaze u sastav jednačine [1]) izrađena je karta erozije Srbije u periodu od 1966. godine do 1971. godine (slika 4).

Na karti erozije Srbije, intenziteti erozije svrstani su u pet osnovnih kategorija, prema vrednostima koeficijenta erozije ( $Z$ ) [1, 44]:

1. Ekscesivna - kategorija I (I-1 ( $Z=1,41-1,50$ ); I-2 ( $Z=1,21-1,40$ ) i I-3 ( $Z=1,01-1,20$ ));

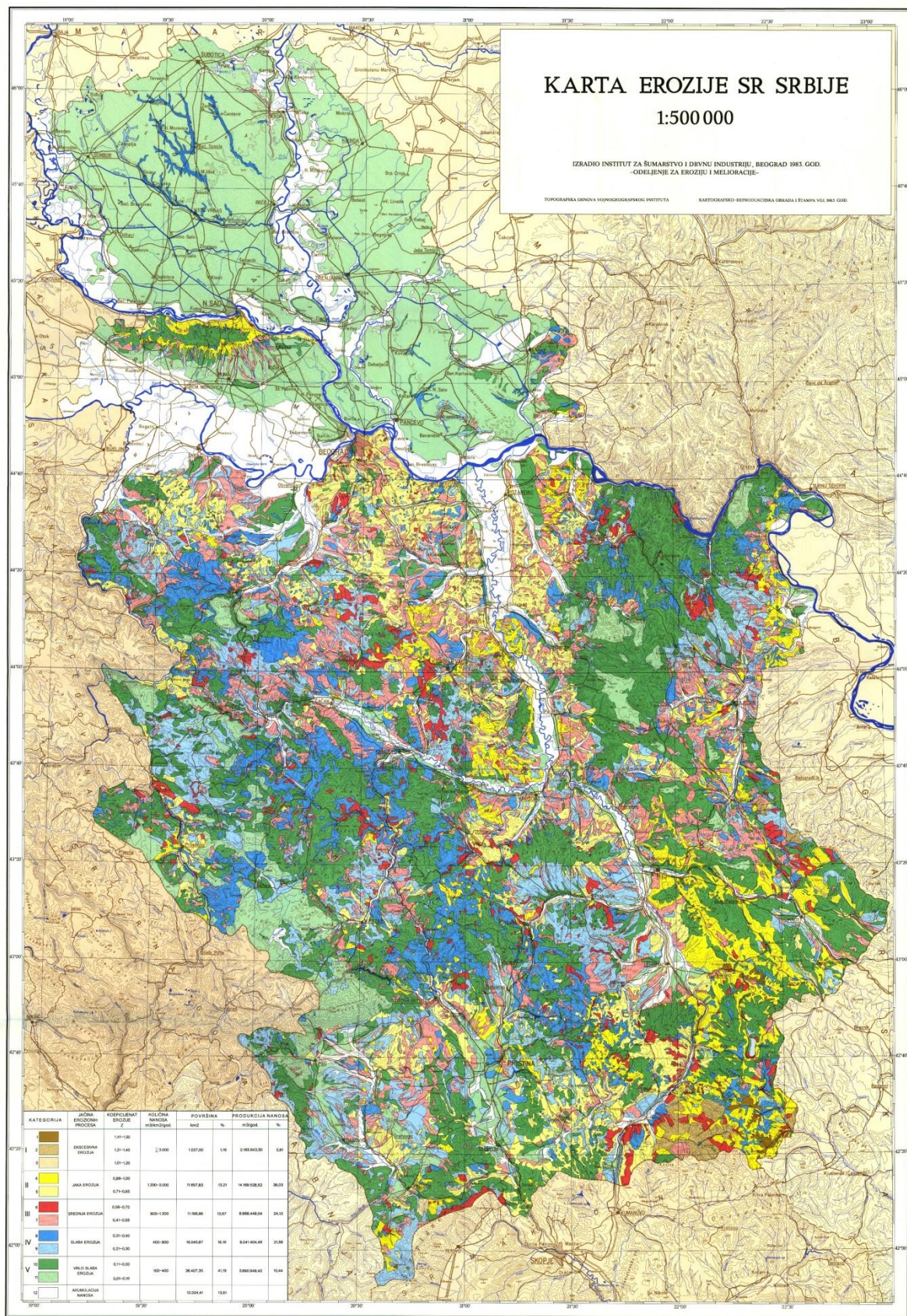
2. Jaka - kategorija II (II-4 ( $Z=0,86-1,00$ ) i II-5 ( $Z=0,71-0,85$ ));
3. Srednja - kategorija III (III-6 ( $Z=0,56-0,70$ ) i III-7 ( $Z=0,41-0,55$ ));
4. Slaba - kategorija IV (IV-8 ( $Z=0,31-0,40$ ) i IV-9 ( $0,21-0,30$ )); i
5. Vrlo slaba - kategorija V (V-10 ( $Z=0,11-0,20$ ) i V-11 ( $Z=0,01-0,10$ )).

Prema karti erozije Srbije (slika 4) različitim intenzitetima erozije zahvaćeno je 76354,43 km<sup>2</sup> ili 86,39% teritorije Srbije, dok zoni akumulacije pripada 12024,71 km<sup>2</sup> ili 13,61% (tabela 1).













Na osnovu opštih elemenata za ocenu rizika od degradacije zemljišta i identifikaciju područja pod rizikom ocenjuju se indikatori za ocenu rizika od degradacije zemljišta (stepen ugroženosti zemljišta od erozije, gubitka organske materije, zbijanja zemljišta, zaslanjivanja i/ili alkalizacije, klizišta, acidifikacije i hemijskog zagađenja) [2]. Prema podacima iz 2009. godine prikazanim u Izveštaju o stanju životne sredine u Republici Srbiji za 2010. godinu [2] odnos između pojedinih kategorija erozije je promenjen (tabela 1). Površine teritorije Srbije zahvaćene ekscisivnom (I kategorija) i jakom erozijom (II kategorija) su značajno smanjene u odnosu na 1971. godinu. Čak 50% odnosno 75% površina iz kategorija I i II, redom, uključeno je u III kategoriju. Ukupno 25% površina zahvaćeno srednjom erozijom (III kategorija) svrstano je u IV kategoriju (slaba erozija), dok je IV kategorija (slaba erozija) dobila najveće uvećanje površina pod erozijom. Za V kategoriju (vrlo slaba erozija) nisu uočene promene [2]. Prema stanju erozije u Srbiji iz 2009. godine (tabela 1) 18182,65 km<sup>2</sup> (23,81%) od ukupne površine Srbije zahvaćeno je erozijom I, II i III kategorije [2].

Tabela 1. Površine u Srbiji zahvaćene erozijom, po kategorijama (modifikovano prema [2])

Kategorija erozije	Površina prema proceni iz 2009. godine			% od ukupne teritorije Srbije (1971. god)
	km <sup>2</sup>	u % od ukupne površine pod erozijom	% od ukupne teritorije Srbije	
Ekscesivna (I)	513,50	0,67	0,58	1,16
Jaka (II)	2918,96	3,82	3,30	13,21
Srednja (III)	14750,19	19,32	16,69	12,67
Slaba (IV)	21764,42	28,51	24,63	18,16
Vrlo slaba (V)	36407,35	47,68	41,19	41,19
Ukupno:	76354,43	100		86,39
Akumulacija nanosa	12024,71			13,61
Ukupno:	88379,14		86,39	100



Slika 4a. Karta erozije Srbije [1]

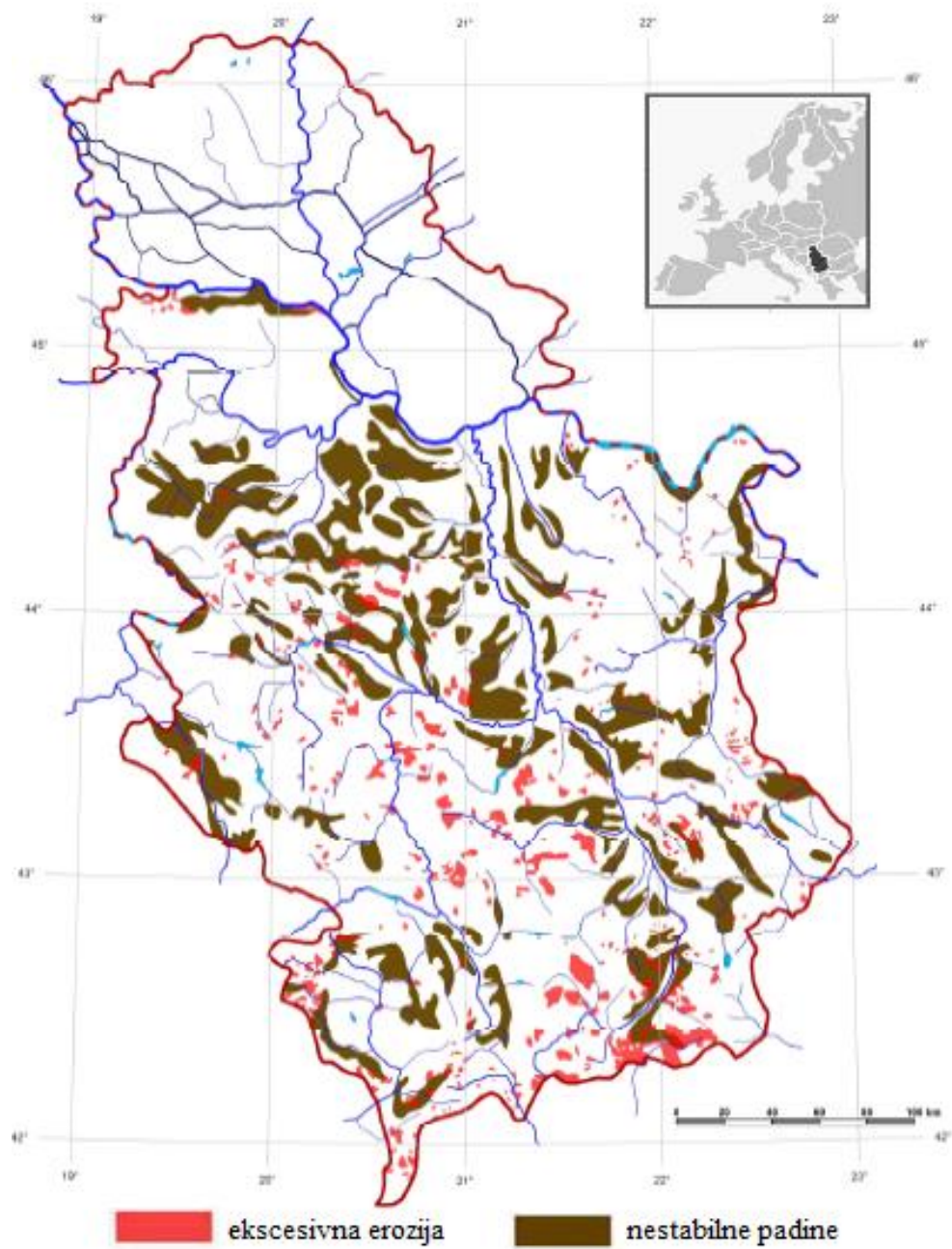
KATEGORIJA	JAČINA EROZIONIH PROCESA	KOEFIČIJENT EROZIJE Z	KOLIČINA NANOSA m <sup>3</sup> /km <sup>2</sup> /god	POVRŠINA		PRODUKCIJA NANOSA		
				km <sup>2</sup>	%	m <sup>3</sup> /god	%	
<b>I</b>	1 	<b>EKSCESIVNA EROZIJA</b>	1,14-1,50	≥ 3.000	1.027,00	1,16	2.165.643,30	5,81
	2 		1,21-1,40					
	3 		1,01-1,20					
<b>II</b>	4 	<b>JAKA EROZIJA</b>	0,86-1,00	1.200-3.000	11.657,83	13,21	14.169.528,52	38,03
	5 		0,71-0,85					
<b>III</b>	6 	<b>SREDNJA EROZIJA</b>	0,56-0,70	800-1.200	11.198,88	12,67	8.988.449,04	24,13
	7 		0,41-0,55					
<b>IV</b>	8 	<b>SLABA EROZIJA</b>	0,31-0,40	400-800	16.045,87	18,16	8.041.404,46	21,59
	9 		0,21-0,30					
<b>V</b>	10 	<b>VRLO SLABA EROZIJA</b>	0,11-0,20	100-400	36.407,35	41,19	3.890.949,42	10,44
	11 		0,01-0,10					
	12 	<b>AKUMULACIJA NANOSA</b>			12.024,41	13,61		

Slika 4b. Legenda karte erozije Srbije [1]

Dragicevic i sar. (2010) ukazali su na to da 3320,80 km<sup>2</sup>, odnosno 3,76%, od ukupne površine teritorije Srbije zauzimaju područja pod jakim potencijalom erozije (slika 5) [2, 45].

Na teritoriji Srbije po obodu Vranjske kotline, u dolini reke Pčinje, u Grdeličkoj klisuri, u slivu Vlasine i dolini Lima, gornjeg toka Ibra i u brdskom području Šumadije najintenzivnija je erozija sa bujičnom aktivnošću [46].

Prema podacima Republičkog zavoda za statistiku iz 2012., 2013. i 2014. godine na području Republike Srbije erodirano je ukupno 6296, 6996 i 9444 km<sup>2</sup> zemljišta, redom, dok su erozioni procesi zaustavljeni na ukupno 374, 277 i 811 km<sup>2</sup> zemljišta, redom. Prema podacima iz 2014. godine u regionu južne i istočne Srbije erodirano je ukupno 5273 km<sup>2</sup> zemljišta [47].



Slika 5. Karta Srbije sa rasporedom nestabilnih padina i oblasti sa jakim potencijalom erozije [2, 45]



## 2.5. Cilj istraživanja

Osnovni cilj istraživanja sprovedenog u okviru ove disertacije jeste primena i optimizacija postojećih konverzionih modela za izračunavanje intenziteta erozije neobrađivanog zemljišta, korišćenjem veštačkog radionuklida  $^{137}\text{Cs}$ , na prostoru jugoistočne Srbije gde je najveća depozicija ovog radionuklida dostignuta nakon akcidenta u nuklearnoj elektrani u Černobilju, odnosno 1986. godine.

Istraživanja su sprovedena u dolini reka Pčinje i Južne Morave, u okviru istraživanog prostora velike površine A, koji je prema karti erozije Srbije (slika 4) [1] zahvaćen različitim intenzitetima erozije, i u okviru istraživanog prostora male površine B, koji je prema karti erozije Srbije (slika 4) zahvaćen jakom erozijom [1].

Osnovna ideja podele istraživanog prostora na dve istraživane oblasti jeste upoređivanje stepena varijabilnosti analiziranih parametara (specifičnih aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  i fizičko-hemijskih karakteristika zemljišta: krupan pesak 2-0,2 mm, sitan pesak 0,2-0,05 mm, prah 0,05-0,002 mm, glina <0,002 mm, ukupni kapacitet izmene katjona u zemljištu - CEC, sadržaj humusa/organske materije, sadržaj karbonata -  $\text{CaCO}_3$ , pH vrednost i specifična električna provodljivost - K) na velikom i malom prostoru istraživane oblasti. Teritorija Srbije je bila zahvaćena černobiljskim oblakom. Nepravilne distribucije padavina u kratkom vremenu nakon akcidenta, razlike u vegetacionom pokrivaču i tipu zemljišta su dovele do značajnih prostornih razlika koncentracija  $^{137}\text{Cs}$  u zemljištu na teritoriji Srbije. Ispitivanje specifičnih aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  i fizičko-hemijskih karakteristika zemljišta istraživanog prostora velike površine A omogućiće dobijanje opšte slike o distribuciji analiziranih parametara na istraživanom prostoru, dok će izračunavanje intenziteta erozije zemljišta primenom i optimizacijom postojećih konverzionih modela biti sprovedeno unutar istraživanog prostora male površine B.

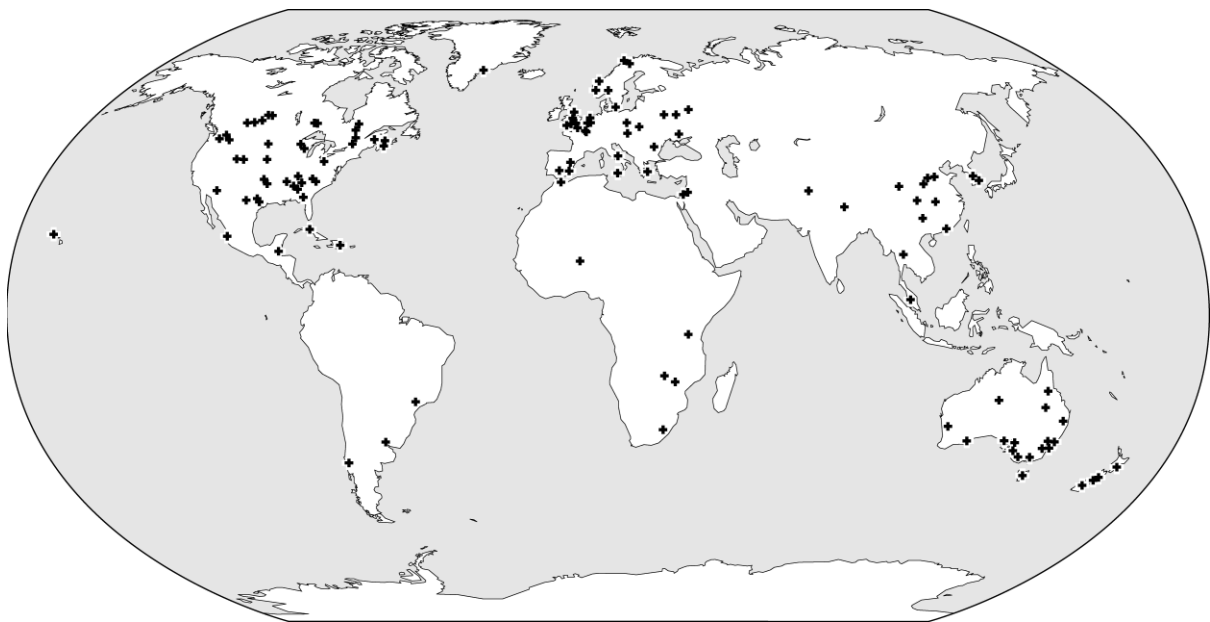
U svrhu ostvarivanja cilja ove disertacije istraživanje je podeljeno u tri osnovne faze rada. U prvoj fazi rada ispitivane su specifične aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  i fizičko-hemijske karakteristika zemljišta unutar istraživanog prostora velike površine A i male površine B. U drugoj fazi rada ispitane su korelacije primenom Spirmanovog koeficijenta korelacije rangova i hijerarhijske analize grupisanja između  $^{137}\text{Cs}$  i analiziranih fizičko-hemijskih karakteristika zemljišta. I u trećoj fazi, postojeći konverzioni modeli za izračunavanje intenziteta erozije neobrađivanog zemljišta su primenjeni i optimizovani za upotrebu na istraživanom prostoru male površine B, korišćenjem veštačkog radioizotopa  $^{137}\text{Cs}$ . Takođe,

na istraživanom prostoru male površine B je primenjen i tradicionalni model USLE za izračunavanje erozije zemljišta u cilju poređenja vrednosti sa vrednostima dobijenim primenom konverzionih modela.

### 2.5.1. Korišćenje radionuklida za procenu intenziteta erozije zemljišta

Radionuklidi u životnoj sredini, uključujući  $^{137}\text{Cs}$  ( $t_{1/2}=30,2$  godine),  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  ( $t_{1/2}=22,3$  godine) i  $^7\text{Be}$  ( $t_{1/2}=53,3$  dana) se sve više koriste za dobijanje informacija o intenzitetu erozije zemljišta [48-51].

Zahvaljujući relativno dugom vremenu poluraspada i širokoj rasprostranjenosti u životnoj sredini  $^{137}\text{Cs}$  se uspešno koristi za ispitivanje intenziteta erozije zemljišta [52-63]. Walling (2002) je identifikovao više od 120 lokacija na kojima je  $^{137}\text{Cs}$  do tada uspešno korišćen za ispitivanje erozije zemljišta; distribucija tih lokacija prikazana je na slici 6 [64].



Slika 6. Distribucija studija koje su uspešno sprovedene korišćenjem  $^{137}\text{Cs}$  za ispitivanje erozije zemljišta [64]

Osnovni princip upotrebe  $^{137}\text{Cs}$  za ispitivanje intenziteta erozije zemljišta opisan je u nekoliko publikacija [14, 26, 50, 65-67]. Jedna od osnovnih pretpostavki prilikom primene  $^{137}\text{Cs}$  za ispitivanja procesa erozije i akumulacije zemljišta jeste da se  $^{137}\text{Cs}$  jako i brzo vezuje za fine čestice zemljišta, usled čega se pod uticajem fizičkih procesa kreće zajedno sa

česticama zemljišta za koje je vezan [14]. Takođe, primena  $^{137}\text{Cs}$  za ispitivanja procesa erozije i akumulacije zemljišta zahteva njegovu ujednačenu lokalnu prostornu distribuciju.

Korišćenje  $^{137}\text{Cs}$  za ispitivanje erozije i akumulacije zemljišta zasnovano je na upoređivanju površinske aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  na individualnim lokacijama uzorkovanja ( $A_u$ ) (na kojima je došlo do erozije ili akumulacije zemljišta) sa vrednostima referentne površinske aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  ( $A_{ref}$ ) (stabilno mesto koje nije izloženo procesima erozije ni akumulacije zemljišta) [14, 26, 50, 65-67]. Slučaj u kome je izmerena površinska aktivnost za individualne lokacije uzorkovanja manja od vrednosti referentne površinske aktivnosti ( $A_u < A_{ref}$ ) ukazuje na eroziju zemljišta - odnošenja zemljišnog materijala, dok obrnut slučaj ( $A_u > A_{ref}$ ) ukazuje na akumulaciju zemljišta - taloženje zemljišnog materijala. Ovakva jednostavna poređenja daju uvid samo u kvalitativne informacije o prostornoj distribuciji erozije i akumulacije zemljišta.

Za kvantitativna ispitivanja intenziteta erozije i akumulacije zemljišta korišćenjem aktivnosti radionuklida  $^{137}\text{Cs}$ , razvijeni su konverzioni modeli prikazani u tabeli 2 (od interesa za ovu studiju). Kako vertikalna distribucija radionuklida koji se koriste za ispitivanje erozije i akumulacije zemljišta veoma zavise od načina obrade zemljišta (opisano u delu 2.3.), različiti modeli su razvijeni za obrađivana i neobrađivana zemljišta [14, 26, 50, 65, 66].

Tabela 2. Konverzioni modeli za izračunavanje intenziteta erozije zemljišta korišćenjem radioizotopa [26, 50, 65-67]

<b>Obrađivana zemljišta</b>	<b>Neobrađivana zemljišta</b>
Proporcionalni model - PM	Model profilne distribucije - PD
Model balansa mase I, II i III – MBM I, II i III	Difuzioni i migracioni model - DM
Modelovanje intenziteta erozije korišćenjem radionuklida - MODERN	Modelovanje intenziteta erozije korišćenjem radionuklida - MODERN

Modeli kao što su PM (*eng.* Proportional Model) i PD (*eng.* Profile Distribution Model) su veoma jednostavni i laki za upotrebu ali često daju nepouzdan rezultate iz razloga što uključuju veliki broj pretpostavki.

Unapređeni modeli kakvi su MBM II, MBM III (*eng.* Mass Balance Models) i DM (*eng.* Diffusion and Migration Model) daju pouzdanije rezultate u odnosu na PM i model PD. Ovi modeli uključuju parametre koji bi trebalo precizno da opišu fizičke procese koji utiču na distribuciju radionuklida u zemljištu nakon njihovog deponovanja.

Model MODERN (*eng.* Modelling Deposition and Erosion rates with RadioNuclides) je razvijen za konvertovanje površinske aktivnosti radionuklida ( $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{239+240}\text{Pu}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  i  $^7\text{Be}$ ) u intenzitet erozije zemljišta ( $\text{t ha}^{-1} \text{ god}^{-1}$ ) i primenjuje se kako za obrađivana tako i za neobrađivana zemljišta (tabela 2). Model pretpostavlja da ako su karakteristike zemljišta između referentnog mesta i lokacija uzorkovanja slične, da su mehanizmi koji utiču na dubinsku difuziju i migraciju radionuklida takođe slični.

U velikom broju studija ukazano je na prednosti korišćenja  $^{137}\text{Cs}$  za procenu intenziteta erozije i akumulacije zemljišta u odnosu na tradicionalne pristupe [14, 18, 64]:

- Pristup pruža retrospektivne informacije o intenzitetu erozije. Na osnovu prikupljenih uzoraka mogu se dobiti podaci o intenzitetu erozije u prošlosti;
- Ova tehnika omogućava procenu intenziteta erozije u poslednjih 40-50 godina, dajući na taj način podatke o prosečnom intenzitetu dugoročne erozije;
- Tehnika pruža informacije kako o eroziji tako i o akumulaciji zemljišta;
- Procenjen intenzitet erozije zemljišta predstavlja integraciju svih procesa koji dovode do kretanja zemljišta (na primer vode i vetra, obrade zemljišta);
- Tehnika dozvoljava kvantifikovanje erozije zemljišta usled površinske erozije, koja se često teško identifikuje na terenu;
- Procene intenziteta erozije zasnovane su na pojedinačnim tačkama uzorkovanja, na osnovu čega se mogu generisati informacije o prostornoj distribuciji intenziteta erozije u nekoj oblasti;
- Tehnika ne zahteva skupe i intenzivne dugoročne programe praćenja;
- Uzorkovanje je relativno jednostavno i ekonomično i može da se završi u relativno kratkom vremenu, u zavisnosti od gustine uzorkovanja i veličine ispitivane površine;
- Tehnika se takođe može koristiti za kontinuirano praćenje intenziteta erozije zemljišta, sprovođenjem studije u razmaku od nekoliko godina u okviru istog istraživanog prostora;
- Narušavanje istraživanog prostora tokom uzorkovanja je minimalno.

Modeli za izračunavanje intenziteta erozije zemljišta korišćenjem radioizotopa primenjeni su na području Vojvodine, Srbija [68] i na području jezera Drenovo, Bosna i Hercegovina [69]. Na području Vojvodine, Srbija, primenjeni su PM i model PD za izračunavanje intenziteta eolske erozije obrađivanog i neobrađivanog zemljišta, redom,

korišćenjem radioizotopa  $^{137}\text{Cs}$  i  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ , gde nije naznačena koja godina je uzeta kao godina depozicije  $^{137}\text{Cs}$  na istraživanom prostoru pa se pretpostavlja da su modeli korišćeni u izvornom obliku [68]. Korišćenjem  $^{137}\text{Cs}$  intenziteti erozije u obrađivanom i neobrađivanom zemljištu Vojvodine kretali su se od  $-54^1$  do  $-291$ ; i od  $-0,15$  do  $-8,7 \text{ t ha}^{-1} \text{ god}^{-1}$ , redom. Korišćenjem  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  intenzitet erozije u obrađivanom zemljištu Vojvodine kretao se od  $48$  do  $-316 \text{ t ha}^{-1} \text{ god}^{-1}$  [68]. Takođe na području jezera Drenovo, Bosna i Hercegovina, primenjeni su modeli PM i MBM1 za izračunavanje intenziteta erozije obrađivanog zemljišta na dve lokacije (S2 i S3) korišćenjem radioizotopa  $^{137}\text{Cs}$ , gde je 1986. godina korišćena kao godina njegove ukupne depozicije [69]. Intenziteti erozije upotrebom modela PM i MBM I na lokaciji S3 iznosili su  $2,50$  i  $23,47 \text{ t ha}^{-1} \text{ god}^{-1}$ , redom, dok su na lokaciji S2 iznosili  $-9,19$  i  $-123,75 \text{ t ha}^{-1} \text{ god}^{-1}$ , redom [69].

### 2.5.2. Istraživani prostor

Istraživani prostor se pruža od sliva Krševičke reke na zapadu (sliv Južne Morave) do zapadnih padina planine Dukat na istoku. Granica se na severu podudara sa planinskom vododelnicom Zladovačke planine i Patarice, a na jugu je predstavljena rečnim razvođem Široke planine (uz granicu sa BJR Makedonijom). Gornji deo sliva reke Pčinje površine  $1247 \text{ km}^2$  pripada Srbiji, a donji površine  $1893 \text{ km}^2$  BJR Makedoniji. Sliv Pčinje zahvata planinsko-kotlinsko-dolinski prostor Široke planine, Zladovačke planine, Patarica i zapadnih padina planine Dukat, odnosno planinske strane koje su nagnute prema dolini Pčinje i dolinama koje pripadaju njenom slivu. Lokaliteti na kojima je uzorkovano zemljište većim delom pripadaju Srpsko-makedonskoj masi, dok se manji deo terena nalazi u Vardarskoj tektonskoj jedinici.

Kroz ceo paleozoik i mezozoik veći deo terena bio je iznad vode, te nema sedimentnih naslaga pomoću kojih se mogu pratiti pojedine geološke faze. Tek u paleogenu dolazi do tektonskog izdizanja i formiranja planina i basena Pčinje [70]. Ovaj period je označen kao faza transgresije kada su nataložene veće količine sedimenata u kojima dominiraju peščari. Ipak, magmatiti i metamorfiti nastali u periodima pre tercijera izgrađuju veći deo terena. Superpoziciono preko gnajseva, mikašista i izlomljenih kristalastih škriljaca

---

<sup>1</sup> U daljem tekstu negativnim predznakom prikazan je intenzitet erozije koji ukazuje na količinu odnetog zemljišnog materijala (eroziju), dok je pozitivnim predznakom prikazan intenzitet erozije koji ukazuje na količinu donetog zemljišnog materijala (akumulaciju).

naležu naslage peščara, ali se zbog boranja i raskidanja pojedine starije partije stena nalaze iznad mladih.

Na pojedinim lokalitetima otkrivenih profila zapaža se nagnutost slojeva stena u pravcu jugozapada i boranje koje ukazuje na intenzivno paleogeno stezanje.

Fluvijalni sedimenti nastali egzogenim agensima u recentnoj fazi mozaično su raspoređeni na potezu između Trgovišta i Barbace. Paleogene tvorevine debljine preko 1100 m na većini lokaliteta nataložene su preko paleozojskih stena. Veće rasprostranjenje imaju oksidno crveni peščari, fanglomeratični i nestratifikovani glinovito-peskoviti materijal, te glinci, laporci i breče koji ukazuju na kratku i intenzivnu sedimentaciju [71].

Umereno-kontinentalna klima basena Pčinje modifikovana je pod uticajem pravca pružanja doline, udaljenosti od Egejskog mora, nadmorskom visinom, konfiguracijom, pokrivenošću i tipom vegetacije. Prema kriterijumu kontinentalnosti i aridnosti, sama dolina Pčinje ima odlike submediteranske i izmenjeno-egejske klime, ali su planine visine iznad 1300 m izložene uticaju vazdušnih masa koje dolaze iz južnog i zapadnog kvadranta. Zapadni vetrovi obično donose padavine u toku zime i krajem proleća, ali se vazdušne mase koje dolaze iz Egejskog mora javljaju kao modifikator od kontinentalne ka župskoj klimi.

U slivu gornjeg dela Pčinje zemljište je izloženo erozionim procesima, posebno pluvijalnoj eroziji i denudaciji. Kao značajan faktor erozije zemljišta ističu se padavine. Godišnja količina padavina u kotlinsko-dolinskom delu Pčinje nije velika i kreće se od 649 mm u Trgovištu do 621 mm u Bujanovcu [72]. Na planinama koje je uokviruju dolinu Pčinje godišnja količina padavina iznosi oko 1000 mm. Intenzivna i ubrzana erozija zemljišta i smanjenja dubine zemljišnog profila javljaju se kao posledica nagiba terena, erodibilnosti zemljišta, intenziteta kišnih padavina, izloženosti frontalnim kišnim serijama i pokrivenosti vegetacijom dubokog i razgranatog korena.

Geološki sastav terena i pedogenetski procesi usloveli su pojavu različitih tipova, podtipova i formi zemljišta. Dominantno je rasprostranjenje kiselih smeđih i podzolastih zemljišta tipa *Haplic Cambisols* i *Luvic Planosols*. Od mladih nerazvijenih zemljišta zastupljena su *Lithic Leptosols* i *Nudialithic Leptosols* na gnajsu i to u dolini Pčinje od Šainaca do Trgovišta. Mlada, plitka, peskovita i peskovito-ilovasta zemljišta rasprostranjena su na strmim terenima, zahvaćenim intenzivnom pluvijalnom erozijom i denudacijom. *Haplic Cambisols* i *Haplic Regosols* su zastupljeni duž dolinskih strana Gornje Pčinje, posebno u centralnom i severozapadnom delu istraživanog prostora. Ova zemljišta su razvijena na laporovitim i karbonatnim peskovito-ilovastim podlogama. Na visini od 400 do 600 m na

silikatnoj podlozi zastupljeni su *Haplic Regosols*, plitka, slabo razvijena skeletoidna zemljišta sa više od 50% peskovito-kamenite frakcije u ukupnoj masi zemljišta [73]. Na kontaktu planinskih padina i doline Pčinje i na rečnim terasama obrazovana su zemljišta tipa *Colluvic Regosols* i *Leptic Regosols*. Na celom prostoru su prisutna vodopropustljiva i mrvičasta plitka humusno-silikatna zemljišta tipa *Humic Leptosols* [74, 75]. Na prostorima nagnutim pod uglom od 45% zastupljena su zemljišta tipa *Cambisols* nastala usled intenzivnijih pedogenetskih procesa u zemljištu tipa *Humic Leptosols*. Zemljišta tipa *Haplic Cambisols* prisutna su na većim nadmorskim visinama, posebno na Širokoj planini i Patarici, Zladovačkoj planini i zapadnim padinama planine Dukat. Nerazvijena aluvijalna zemljišta tipa *Fluvisols* su zastupljena na sedimentnim naslagama inundaciono uz reku Pčinju i duž njenih pritoka Koćurice i Kozjedolske reke [73].

### 3. MATERIJAL I METODE RADA

#### 3.1. Sakupljanje uzoraka

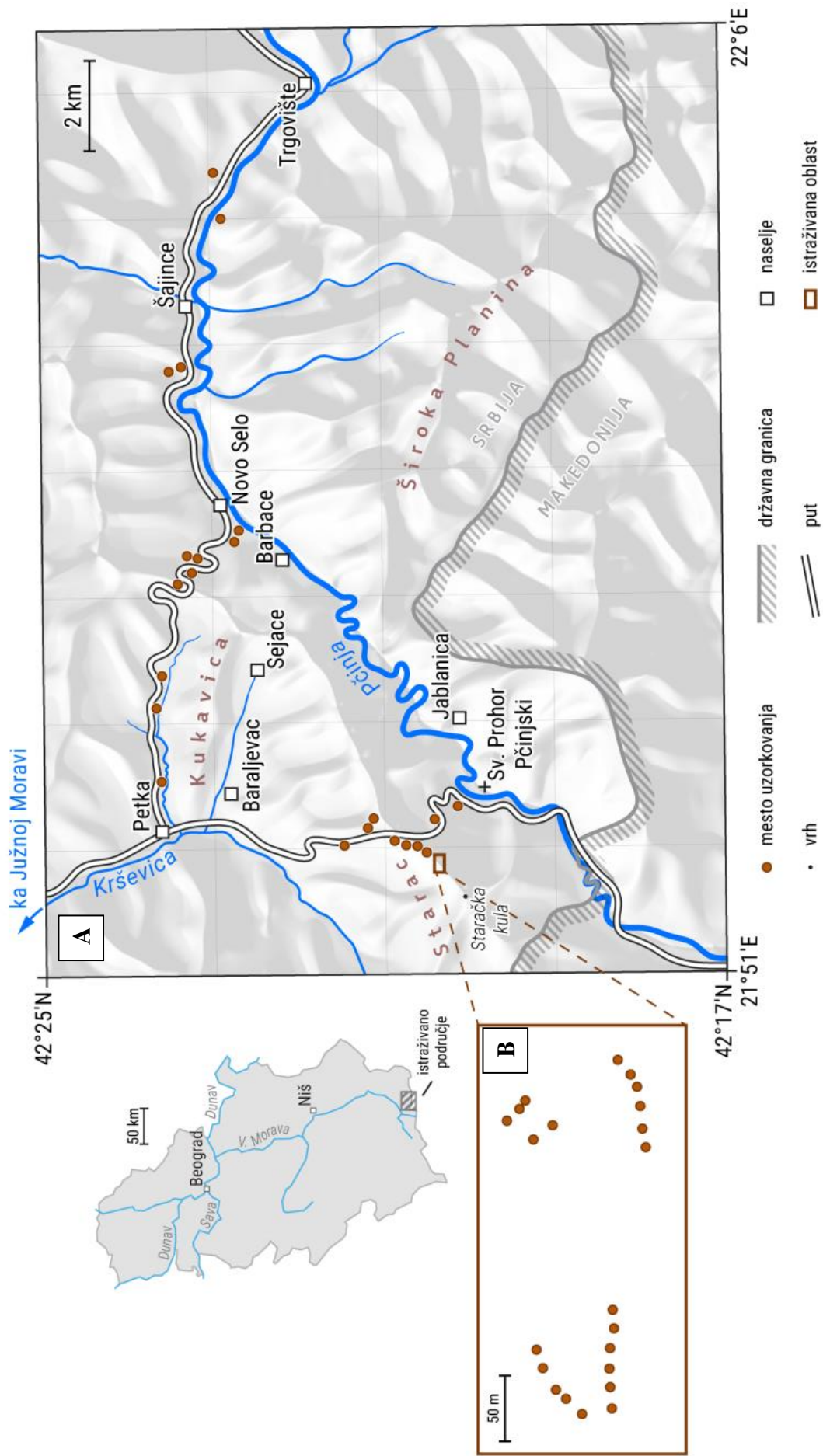
Uzorci neobrađivanog zemljišta sakupljeni su sa istraživanog prostora (slike 7 i 8) u periodu od 2013. do 2015. godine. Uzorkovanje zemljišta sprovedeno je unutar istraživanog prostora velike površine - A (slika 7) i male površine - B (slike 7 i 8).

Na istraživanom prostoru velike površine A primećeno je prisustvo ogoljenih stena i plitkih profila zemljišta što je dalo jasne naznake da je u prošlosti erozija zemljišta bila veoma izražena. U trenutku uzorkovanja činilo se da su erozivni procesi značajno usporeni (poredeći sa kartom erozije Srbije) usled širenja primarne vegetacije kao posledice smanjenog intenziteta ispaše stoke. Na istraživanom prostoru velike površine A nisu primećene poljoprivredne aktivnosti kao što su obrada zemljišta ili bilo koji drugi oblik antropogenizacije. Prirodna trava predstavlja dominantan tip vegetacije. Na istraživanom prostoru velike površine A uzorkovano je ukupno 22 profila zemljišta (slika 7). Profili zemljišta uzorkovani su do različitih dubina (20-50 cm) u zavisnosti od debljine sloja zemljišta, po slojevima od po 5 cm debljine.

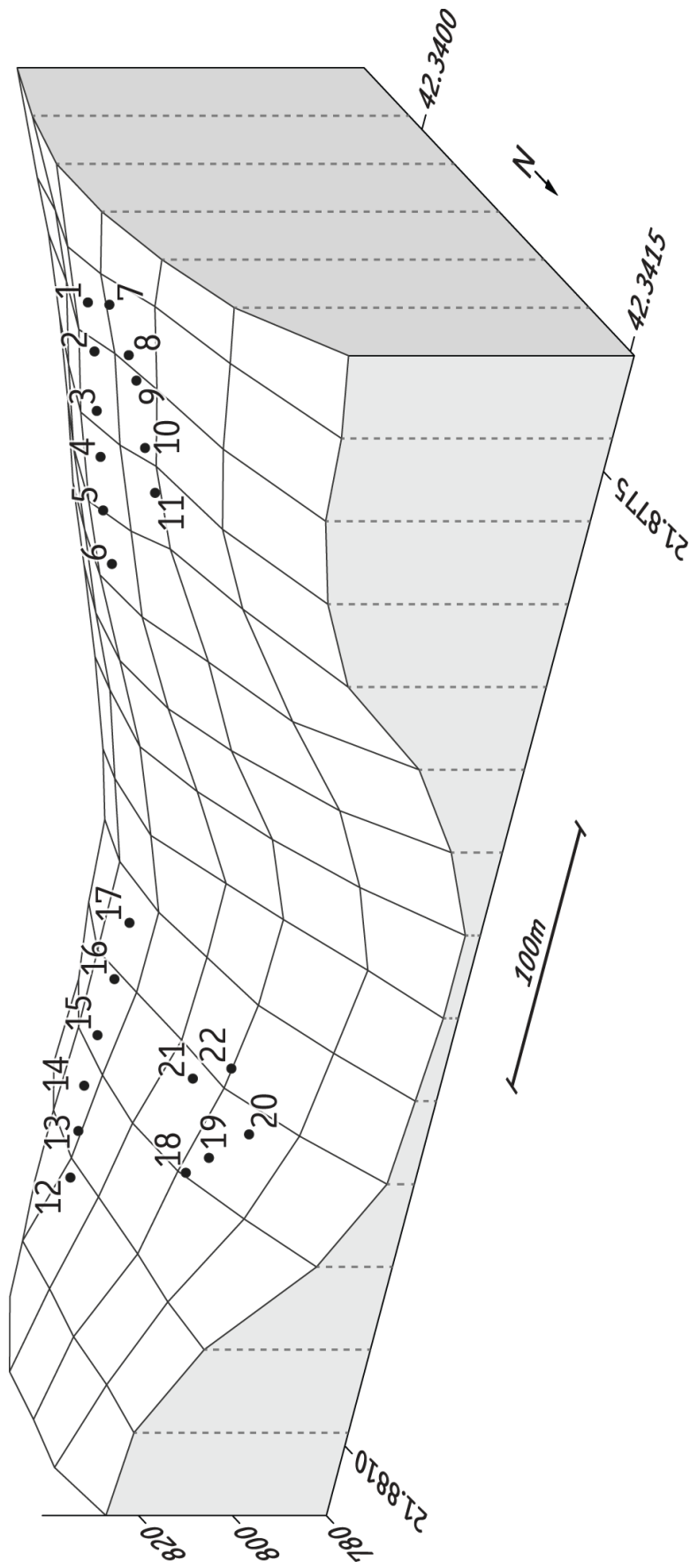
Na istraživanom prostoru male površine B takođe nisu primećene poljoprivredne aktivnosti kao što su obrada zemljišta ili bilo koji drugi oblik antropogenizacije. Istraživani prostor B obrastao je prirodnom travom sa malim brojem usamljenih zimzelenih žbunova. Na istraživanom prostoru male površine B uzorkovano je ukupno 22 profila zemljišta duž nagiba padine (odnosno transekta), ukupno pet transekata (transekt 1 (lokacije: 1→2→3→4→5→6); transekt 2 (lokacije: 7→8→9→10→11); transekt 3 (lokacije: 12→13→14→15→16→17); transekt 4 (lokacije: 18→19→20); i transekt 5 (lokacije: 21→22)) (slika 8). Profili zemljišta uzorkovani su do 25 cm dubine, po slojevima od po 5 cm dubine. Broj uzorkovanih profila zemljišta duž transekta određen je u skladu sa dužinom padine. Postojanje peščanih puteva omogućilo je lak pristup istraživanom prostoru.

Za referentno mesto izabran je mali prostor u blizini istraživanog prostora male površine B, praćenjem smernica za izbor referentnog mesta koje su detaljno navedene u studijama Mabit i sar. (2014) i Zapata (2002) [14, 56]. Sa referentnog mesta uzorkovana su dva profila zemljišta do dubine od 25 cm (po slojevima od po 2 cm do dubine od 20 cm i po slojevima od po 2,5 cm do dubine od 25 cm).





Slika 7. Lokacije uzimanja uzoraka zemljišta unutar istraživanog prostora velike površine - A i male površine - B



Slika 8. Lokacije uzimanja uzoraka zemljišta na istraživanom prostoru male površine - B

### 3.2. Gamaspektrometrijska analiza

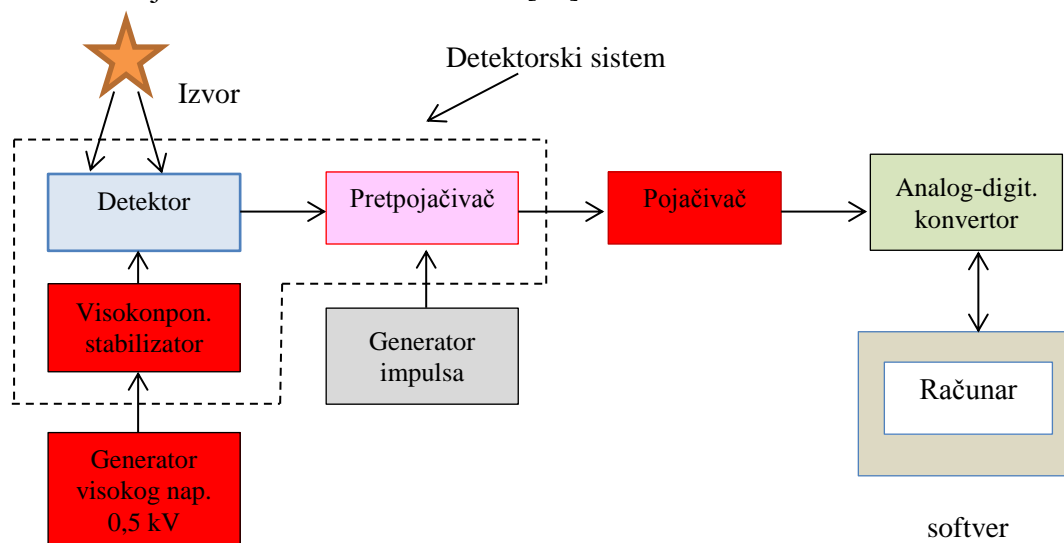
Uzorci zemljišta su prirodno osušeni na vazduhu do konstantne mase, a zatim usitnjeni pomoću avana i tučaka. Nakon sitnjenja uzorci zemljišta prosejani su kroz sito s otvorima prečnika 2 mm i upakovani su u Marinelli posude zapremine 0,5 L.

Uzorci zemljišta mereni su gamaspektrometrijski prema standardnoj metodi IAEA [76], korišćenjem gamaspektrometra sa poluprovodničkim germanijumskim detektorom (HPGe) proizvođača ORTEC-AMETEK sa 8192 kanala, čije su karakteristike prikazane u tabeli 3.

Tabela 3. Karakteristike detektora

Proizvođač	ORTEC-AMETEK
Tip detektora	p
Prečnik kristala	56,7 mm
Dužina kristala	63,7 mm
Prozor	Al 1,27 mm
Visoki napon	3300 V
Rezolucija na 1,33 MeV, $^{60}\text{Co}$	1,65 keV
Odnos fotovrh/Kompton, $^{60}\text{Co}$	69:1
Relativna efikasnost na 1,33 MeV, $^{60}\text{Co}$	34%
Olovna zaštita	10 cm (aktivnost $<50 \text{ Bq kg}^{-1}$ )
Dodatna zaštita	Cu, Cd, Perspex

Dijagram osnovnog gamaspektrometrijskog sistema prikazan je na slici 9. Za obradu spektara korišćen je softver Gamma Vision-32 [77].



Slika 9. Dijagram osnovnog gamaspektrometrijskog sistema

### 3.2.1. Kalibracija detektora

Energijska kalibracija i kalibracija efikasnosti (slika 10) izvršene su pomoću kalibracionog izvora MBSS 2 (Češki metrološki institut, Prag, Republika Češka, Cert. No: 9031 - OL - 419/10), zapremine  $500,0 \pm 5,0 \text{ cm}^3$ , mase  $492,5 \text{ g}$  i gustine  $0,985 \pm 0,01 \text{ g cm}^{-3}$ , koji sadrži smešu radionuklida  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{109}\text{Cd}$ ,  $^{139}\text{Ce}$ ,  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{113}\text{Sn}$ ,  $^{85}\text{Sr}$ ,  $^{88}\text{Y}$  i  $^{203}\text{Hg}$  poznatih aktivnosti zatopljenih u epoksidnoj smoli. Karakteristike izvora prikazane su u tabeli 4.

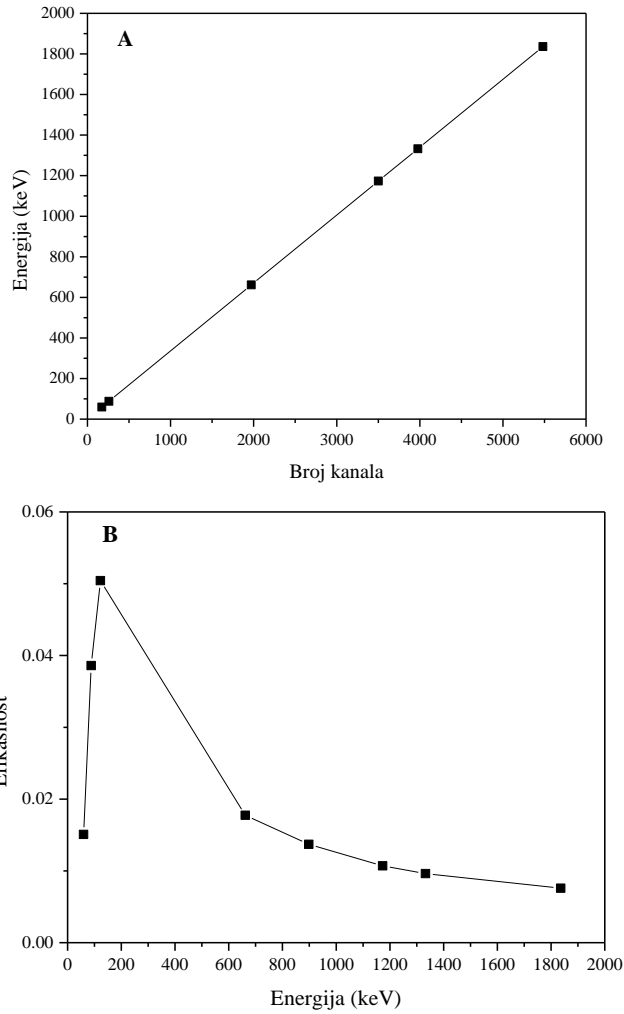
Tabela 4. Aktivnosti radionuklida koje sadrži kalibracioni izvor MBSS 2 na dan 16. 8. 2010.

Radionuklidi	Vreme poluraspada $t_{1/2}$ (dani)	$E_\gamma$ (keV)	Nesigurnost merenja aktivnosti (%)	Aktivnost (kBq)
$^{241}\text{Am}$	157800	59,5	1,1	3,646
$^{109}\text{Cd}$	462,6	88,0	1,3	13,87
$^{139}\text{Ce}$	137,5	133,5	1,1	0,694
$^{57}\text{Co}$	271,26	122,1	1,1	0,719
$^{60}\text{Co}$	1925,4	1173,2; 1332,5	1,3	2,277
$^{137}\text{Cs}$	11019	661,66	1,2	1,968
$^{113}\text{Sn}$	115,1	255,1	2,0	3,821
$^{85}\text{Sr}$	64,78	514	1,2	3,966
$^{88}\text{Y}$	106,6	898,0	1,2	5,351
$^{203}\text{Hg}$	46,72	279,11	1,5	2,023

Zavisnost efikasnosti detektora  $\varepsilon_E$  od energije ( $E$ ) opisuje se polinomskom funkcijom šestog reda:

$$\ln \varepsilon_E = \sum_{i=1}^6 a_i E^{2-i} \quad (3)$$

gde su  $a_i$  - koeficijenti aproksimacije:  $a_1 = -0,197313$ ;  $a_2 = -4,973969$ ;  $a_3 = 0,898493$ ,  $a_4 = -0,133790$ ,  $a_5 = 0,008198$ ,  $a_6 = 0,000194$ .



Slika 10. Energijska kalibracija (A) i kalibracija efikasnosti (B) detektora

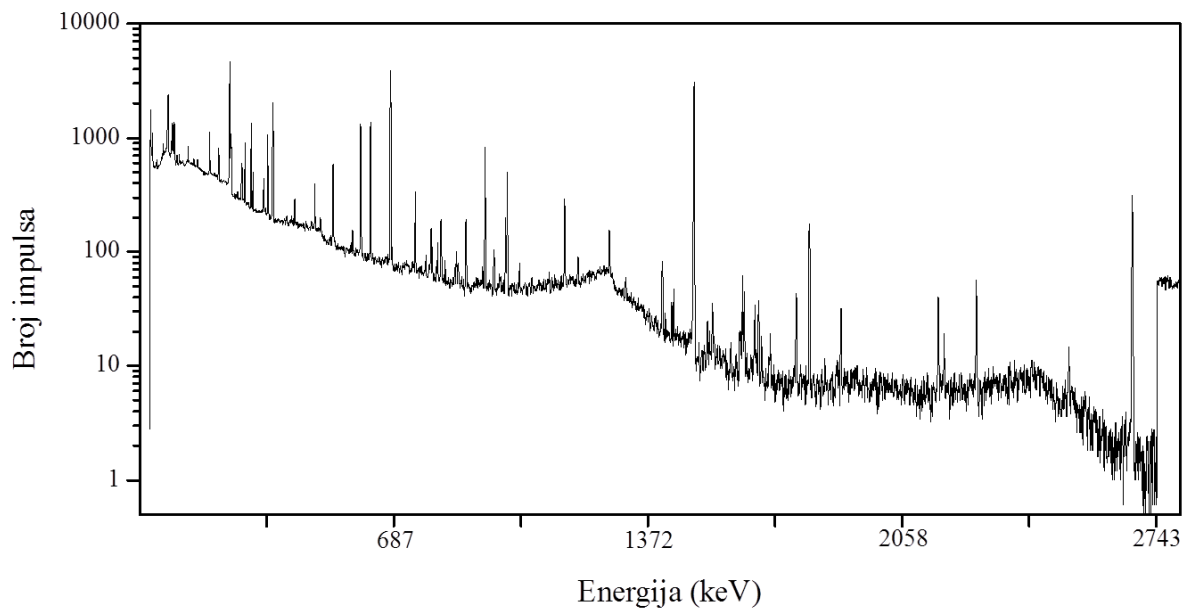
### 3.2.2. Određivanje specifične aktivnosti $^{137}\text{Cs}$

Za izračunavanje specifične aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  ( $\text{Bq kg}^{-1}$ ) na energiji od 661,66 keV, korišćena je sledeća jednačina:

$$A_{E,i} = \frac{N_{E,i}}{\varepsilon_E \times t \times I_a \times m} \quad (4)$$

gde je  $N_{E,i}$  - površina ispod pika totalne apsorpcije na energiji od 661,66 keV,  $\varepsilon_E$  - efikasnost detektora na energiji 661,66 keV,  $t$  - vreme merenja (60 ks),  $I_a$  - apsolutni intenzitet gama raspada na energiji 661,66 keV i  $m$  - masa uzorka (kg).

Tipičan izgled spektra gama zračenja uzorka zemljišta prikazan je na slici 11.



Slika 11. Spektar gama zračenja uzorka zemljišta [13]

### 3.2.3. Određivanje površinske aktivnosti <sup>137</sup>Cs

Površinska aktivnost <sup>137</sup>Cs (Bq m<sup>-2</sup>) izračunata je korišćenjem sledeće jednačine [14]:

$$A_s = \sum A_i \rho_i H_i \quad (5)$$

gde je  $A_i$  - specifična aktivnost  $i$ -og zemljišnog horizonta (Bq kg<sup>-1</sup>),  $\rho_i$  - je zapreminska gustina  $i$ -og zemljišnog horizonta (kg m<sup>-3</sup>) i  $H_i$  - debljina  $i$ -og zemljišnog horizonta (m).

Za izračunavanje površinske aktivnosti <sup>137</sup>Cs (Bq kg<sup>-1</sup>) korišćena je zapreminska gustina fine frakcije zemljišta (<2 mm) [14, 78].

### 3.2.4. Nesigurnost merenja aktivnosti i minimalna detektibilna aktivnost

Za izračunavanje ukupne nesigurnosti merenja ( $\sigma_{tot}$ ) korišćena je sledeća jednačina [77]:

$$\sigma_{tot} = \left( \sigma_{st}^2 + \frac{1}{3} \sum_i \sigma_{sis,i}^2 \right)^{\frac{1}{2}} = \left( \left( \frac{\sqrt{N+2B}}{N} \right)^2 + \frac{1}{3} \sum_i \sigma_{sis,i}^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

gde je  $\sigma_{st}$  - statistička greška brojanja,  $\sigma_{sis,i}$  - sistematska grešaka (uključuje: nesigurnost aktivnosti izvora (3%), nesigurnost određivanja efikasnosti (1-10%) i nesigurnost korišćene biblioteke radionuklida (1-2%)),  $N$  - broj impulsa fotovrha i  $B$  - broj impulsa fona.

Za izračunavanje minimalne detektibilne specifične aktivnosti radionuklida  $MDA$  ( $Bq \text{ kg}^{-1}$ ), najmanje aktivnosti koju je moguće sa pouzdanošću odrediti, korišćena je sledeća jednačina [77]:

$$MDA = \frac{2(1+2B)^{\frac{1}{2}}+1}{\varepsilon I_a t m} \quad (7)$$

gde je  $B$  - fon,  $\varepsilon$  - efikasnost,  $I_a$  - apsolutni intenzitet gama prelaza (%),  $t$  - vreme merenja (s) i  $m$  - masa uzorka (kg).

### 3.3. Određivanje fizičko-hemijskih karakteristika zemljišta

Za određivanje fizičko-hemijskih karakteristika zemljišta uzorci su pripremljeni na isti način kao i za gamaspektrometrijsku analizu (opisano u delu 3.2).

Granulometrijski sastav (krupan pesak (2-0,2 mm), sitan pesak (0,2-0,05 mm), prah (0,05-0,002 mm) i glina (<0,002mm)) i osnovne karakteristike zemljišta (ukupni kapacitet izmene katjona - CEC, sadržaj humusa, sadržaj kalcijum karbonata -  $\text{CaCO}_3$ , pH vrednost i specifična električna provodljivost - K) određene su standardnim procedurama:

- Granulometrijski sastav zemljišta - mehaničke frakcije (krupan pesak (2-0,2 mm), sitan pesak (0,2-0,05 mm), prah (0,05-0,002 mm) i glina (<0,002 mm)) određene su kombinovanom metodom prosejavanja i pipetiranja [79];
- Kapacitet adsorpcije katjona u zemljištu - CEC određen je kao suma hidrolitičke kiselosti zemljišta i adsorptivnih baznih katjona u zemljištu, metodom po Kappenu [80];
- Sadržaj organskih materija (humusa) određen je metodom Tjurina u modifikaciji Simakova. Za razaranje je korišćena dihrom-sumporna kiselina, a za titraciju rastvor Morove soli [81];
- Za određivanje sadržaja kalcijum karbonata -  $\text{CaCO}_3$  u zemljištu korišćena je metoda volumetrijskog određivanja. Za merenje zapremine oslobođenog  $\text{CO}_2$  korišćen je Šajblerov kalcimetar [82];
- Specifična električna provodljivost - K i pH vrednost (aktivna kiselost) određene su u suspenziji zemljišta sa vodom (ekstrakcioni odnos 1:5 (m/V)), za merenje je korišćen instrument WTW inoLab pH/Cond 720 [83, 84].

### 3.4. Metode statističke analize podataka

Neparametarski metod, Spirmanov koeficijent korelacije rangova, korišćen je za ispitivanje jačine (stepena) i smera (pozitivne ili negativne) povezanosti između  $^{137}\text{Cs}$  i fizičko-hemijskih karakteristika zemljišta istraživanog prostora. Spirmanov koeficijent korelacije koristi se za ispitivanje stepena veze između promenljivih u slučaju kada: neka od promenljivih nema normalnu raspodelu, veza između promenljivih nije linearna ili je broj uzoraka mali. Spirmanov koeficijent je neparametarski zbog toga što ne pretpostavlja raspodelu posmatranih promenljivih.

Takođe, primenom hijerarhijske analize grupisanja (*eng.* Hierarchical Cluster Analysis, HCA) određene su međusobne korelacije  $^{137}\text{Cs}$  i fizičko-hemijskih karakteristika zemljišta na istraživanom prostoru. Hijerarhijska analiza grupisanja sprovedena je korišćenjem metoda najdaljeg suseda ("*Furthest neighbor*"), kao pravila spajanja, i Pirsonovog koeficijenta, kao mere blizine. Rezultati hijerarhijske analize grupisanja predstavljeni su u vidu dendrograma.



Statistički program SPSS 16.0 korišćen je za izračunavanje parametara deskriptivne statistike, za analizu Spirmanovog koeficijenta korelacije rangova i hijerarhijske analize grupisanja [85].

### 3.5. Modeli za izračunavanje intenziteta erozije zemljišta

#### 3.5.1. Model profilne distribucije - model PD

Model PD ne uzima u obzir vremenski zavisnu prirodu depozicije  $^{137}\text{Cs}$  kao ni progresivni razvoj dubinske distribucije  $^{137}\text{Cs}$  u zemljišnim profilima nakon njegovog deponovanja iz atmosfere [18, 26, 66].

Aktivnost  $^{137}\text{Cs}$  u stabilnom neobrađivanom zemljištu opada eksponencijalno sa dubinom zemljišta i može se opisati sledećom funkcijom [66]:

$$A'(x) = A_{ref} (1 - e^{-x/h_0}) \quad (8)$$

gde je  $A'(x)$  - površinska aktivnost  $^{137}\text{Cs}$  iznad dubine  $x$  ( $\text{Bq m}^{-2}$ ),  $A_{ref}$  - referentna površinska aktivnost ( $\text{Bq m}^{-2}$ ),  $x$  - masa zemljišta po jedinici površine ( $\text{kg m}^{-2}$ ) i  $h_0$  - parametar koji opisuje oblik profila ( $\text{kg m}^{-2}$ ).

Ako se pretpostavi da se ukupna depozicija  $^{137}\text{Cs}$  dogodila 1963. godine i da je dubinska distribucija  $^{137}\text{Cs}$  u profilu zemljišta nezavisna od vremena, za lokacije na kojima je došlo do erozije zemljišta - odnošenja zemljišnog materijala, intenzitet erozije zemljišta  $Y$  ( $\text{t ha}^{-1} \text{god}^{-1}$ ) može se izračunati korišćenjem sledeće jednačine [26, 66]:

$$Y = \frac{10}{t-1963} \ln \left( 1 - \frac{X}{100} \right) h_0 \quad (9)$$

gde je  $t$  - godina uzorkovanja (god),  $X$  - procentualno smanjenje površinske aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  u odnosu na lokalnu referentnu površinsku aktivnost i definisana je kao  $(A_{ref} - A_u)/A_{ref} \times 100$ .

Za lokacije na kojima je došlo do akumulacije zemljišta - donošenja erodovanog zemljišnog materijala, intenzitet akumulacije  $R'$  može se odrediti iz viška površinske aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$   $A_{ex}(t)$  ( $\text{Bq m}^{-2}$ ) i  $^{137}\text{Cs}$  koncentracije u akumuliranom sedimentu  $Cd$  [26]:

$$R' = \frac{A_{ex}}{\int_{t_0}^t Cd(t')e^{-\lambda(t-t')}dt'} = \frac{A_u - A_{ref}}{\int_{t_0}^t Cd(t')e^{-\lambda(t-t')}dt'} \quad (10)$$

Višak površinske aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$   $A_{ex}(t)$  ( $\text{Bq m}^{-2}$ ) predstavlja slučaj u kome je izmerena površinska aktivnost za individualne lokacije uzorkovanja veća od vrednosti lokalne referentne površinske aktivnosti i definisan je kao  $A_u - A_{ref}$ .

Za primenu modela PD potrebno je poznavanje vrednosti parametara koji opisuje oblik profila  $h_0$ . Vrednost  $h_0$  dobijena je merenjem vertikalne distribucije  $^{137}\text{Cs}$  u referentnom profilu zemljišta i primenom sledeće eksponencijalne funkcije na dobijene podatke:

$$A(x) = A(0)e^{-x/h_0} \quad (11)$$

Više vrednosti parametra oblika profila  $h_0$  ukazuju na migraciju  $^{137}\text{Cs}$  u dublje slojeve zemljišta [26, 66].

### 3.5.2. Model difuzije i migracije - model DM

Model DM uzima u obzir vremenski zavisnu prirodu dubinske distribucije  $^{137}\text{Cs}$  i zbog toga pruža pouzdanije rezultate u odnosu na prethodno opisan model PD.

Posmatranjem zemljišta kao polu-beskonačnog homogenog poroznog medijuma, tako da se može okarakterisati konstantnim efektivnim difuzionim koeficijentom i konstantnom migracionom brzinom, i pod pretpostavkom da je inicijalna distribucija deponovanog  $^{137}\text{Cs}$  na površini zemljišta bila uniformna, vertikalna distribucija  $^{137}\text{Cs}$  ( $\text{Bq kg}^{-1}$ ) može se prikazati sledećom parcijalnom diferencijalnom jednačinom [66, 86]:

$$\frac{\partial C(x,t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C(x,t)}{\partial x^2} - V \frac{\partial C(x,t)}{\partial x} - \lambda C(x,t) \quad (12)$$

gde je  $D$  - efektivni difuzioni koeficijent ( $\text{kg}^2 \text{ m}^{-4} \text{ god}^{-1}$ ),  $V$  - migraciona brzina ( $\text{kg m}^{-2} \text{ god}^{-1}$ ),  $\lambda$  - konstanta raspada za  $^{137}\text{Cs}$  ( $0,023 \text{ god}^{-1}$ ),  $x$  - masa zemljišta po jedinici površine ( $\text{kg m}^{-2}$ ),  $t$  - vreme koje je proteklo od prve depozicije  $^{137}\text{Cs}$  (god) i  $C(x,t)$  - aktivnost  $^{137}\text{Cs}$  u vremenu  $t$  i kumulativnoj masenoj dubini  $x$  ( $\text{Bq kg}^{-1}$ ).

Difuzioni koeficijent i migraciona brzina oslikavaju evoluciju oblika profila  $^{137}\text{Cs}$  sa vremenom. Visoke vrednosti  $D$  i  $V$  ukazuju na migraciju  $^{137}\text{Cs}$  u dublje slojeve zemljišta.

Uzimajući u obzir uslov za očuvanje mase prilikom kretanja  $^{137}\text{Cs}$  u profilu zemljišta kao i vremenske varijacije depozicionog fluksa  $^{137}\text{Cs}$  i njegovu početnu distribuciju u površinskom sloju zemljišta rešenje jednačine (12) za stabilno zemljište se može prikazati kao [66]:

$$C(x,t) = \int_0^t e^{-\lambda(t-t')} dt' \int_0^\infty \frac{I(t')}{H} e^{-\frac{y}{H}} e^{-\frac{V(x-y)}{2D} - \frac{V^2(t-t')}{4D}} dy \left\{ \frac{1}{\sqrt{4\pi D(t-t')}} \left[ e^{-\frac{(x+y)^2}{4D(t-t')}} + e^{\frac{(x-y)^2}{4D(t-t')}} \right] - \frac{V}{2D} e^{\frac{Vx}{D}} \operatorname{erfc} \left[ \frac{x+y+V(t-t')}{\sqrt{4D(t-t')}} \right] \right\} \quad (13)$$

gde je  $\operatorname{erfc}$  greška funkcije:

$$\operatorname{erfc} = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_u^\infty e^{-y^2} dy \quad (14)$$

Jednačina (13) se koristi za prikazivanje dubinskog profila  $^{137}\text{Cs}$  u stabilnom zemljištu kroz optimizaciju vrednosti za difuzioni koeficijent  $D$  i migracionu brzinu  $V$ .

Rešenje jednačine (12) za zemljište koje je pod uticajem vodne erozije biće različito od jednačine (13) usled progresivnog smanjenja površine zemljišta i uklanjanja  $^{137}\text{Cs}$  koji se nalazi u erodovanom zemljištu [66]. Koncentracija  $^{137}\text{Cs}$  u erodovanom zemljištu  $Cu(t)$  (Bq

kg<sup>-1</sup>), pod pretpostavkom da nema obogaćenja, može se aproksimirati  $Cu(0,t)$  u površinskom sloju zemljištu dobijenom iz jednačine (13) [66, 86].

Za lokacije na kojima je došlo do površinske erozije zemljišta - odnošenja zemljišnog materijala, intenzitet erozije  $R$  može se odrediti iz smanjenja površinske aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$   $A_{ls}$  (Bq m<sup>-2</sup>) i koncentracije  $^{137}\text{Cs}$  u površinskom sloju zemljišta  $Cu(t')$  (na primer gornjih 0,5 cm) [26]:

$$\int_{t_0}^t RC_u(t')e^{-\lambda(t-t')} dt' = A_{ls}(t) \quad (15)$$

Smanjenje površinske aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$   $A_{ls}(t)$  (Bq m<sup>-2</sup>) predstavlja slučaj u kome je izmerena površinska aktivnost za individualne lokacije uzorkovanja manja od vrednosti referentne površinske aktivnosti i određuje se kao  $A_{ref}-A_u$ .

Za lokacije na kojima je došlo do akumulacije zemljišta - donošenja erodovanog materijala, intenzitet akumulacije  $R'$  može se odrediti iz viška površinske aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$   $A_{ex}$  (Bq m<sup>-2</sup>) i koncentracija  $^{137}\text{Cs}$  u akumuliranom sedimentu  $Cd(t')$  [26]:

$$R' = \frac{A_{ex}}{\int_{t_0}^t Cd(t')e^{-\lambda(t-t')} dt'} = \frac{A_u - A_{ref}}{\int_{t_0}^t Cd(t')e^{-\lambda(t-t')} dt'} \quad (16)$$

Vrednosti difuzionog koeficijenta -  $D$  i migracione brzine -  $V$  izračunate su korišćenjem sledećih jednačina [26]:

$$V \approx \frac{W_p}{t-1963} \quad (17)$$

$$D \approx \frac{(N_p - W_p)^2}{2(t-1963)} \quad (18)$$

gde je  $t$  - godina sakupljanja uzoraka (god),  $W_p$  - masa zemljišta po jedinici površine sa maksimalnom koncentracijom  $^{137}\text{Cs}$  (kg m<sup>-2</sup>) i  $N_p$  - razlika između mase zemljišta po jedinici

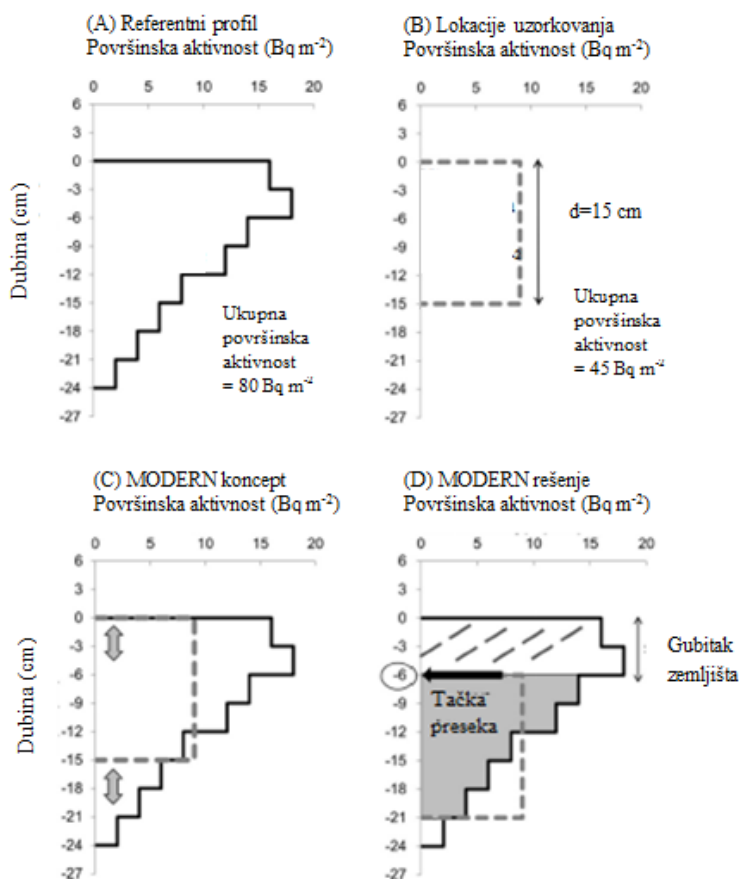
površine sa maksimalnom koncentracijom  $^{137}\text{Cs}$  i tačke gde koncentracija  $^{137}\text{Cs}$  opada na  $1/e$  maksimalne koncentracije ( $\text{kg m}^{-2}$ ).

### 3.5.3. Model MODERN

Model MODERN je razvijen za konvertovanje površinske aktivnosti radionuklida u intenzitet erozije zemljišta ( $\text{t ha}^{-1} \text{god}^{-1}$ ), i primenljiv je kako za obrađivana tako i za neobrađivana zemljišta.

Glavna prednost modela MODERN u odnosu na prethodno navedene modele jeste mogućnost da se njime opiše tačno određena vertikalna distribucija bilo kog radionuklida u zemljištu, nezavisno od oblika funkcije njegove distribucije po dubini profila [67].

Primenom modela izračunava se debljina erodovanog ili akumuliranog sloja (cm) na osnovu upoređivanja ukupne površinske aktivnosti radionuklida dobijene na lokacijama uzorkovanja (slika 12B) i referentnog profila zemljišta (slika 12A) gde tačka preseka duž profila zemljišta predstavlja rešenje modela (slika 12D).



Slika 12. Koncept modela MODERN [67]

Model MODERN referentni profil zemljišta modeluje kao funkciju raspodele  $g(x)$  koja na svakom uzorkovanom sloju  $inc$  daje vrednost  $Inv_{inc}$ . Parametar  $Inv$  predstavlja ukupnu površinsku aktivnost za profil zemljišta do ukupne dubine  $d$  (cm) na lokaciji uzorkovanja. MODERN model cilja vrednost  $x^*$  (cm) koja se nalazi u opsegu od  $x^*$  do  $x^*+d$  (cm) gde je  $\Sigma Inv_{inc} = Inv$ , i iz tog razloga  $x^*$  treba da ispuni uslove sledeće jednačine:

$$\int_{x^*}^{x^*+d} g(x)dx = Inv \quad (19)$$

U cilju pronalaženja svih mogućih rešenja, simulirani slojevi dodaju se ispod i iznad referentnog profila, da bi se procenila potencijalna erozija ili akumulacija zemljišta. Novi simulirani vertikalni profil opisuje se integralnom funkcijom  $S$ :

$$S(x) = \int_x^{x+d} g(x')dx' \quad (20)$$

Funkcija  $S$  se može rešiti kroz primitivnu funkciju  $G$  funkcije raspodele  $g(x)$ :

$$S(x) = G(x + d) - G(x) \quad (21)$$

Kao izlazni parametar model MODERN daje podatke o debljini erodovanog ili akumuliranog zemljišta  $x^*$  (cm). Za konvertovanje izlaznog podatka  $x^*$  (cm) u intenzitet erozije zemljišta ( $t \text{ ha}^{-1} \text{ god}^{-1}$ ) na lokacijama uzorkovanja korišćena je sledeća jednačina:

$$Y = 10 \times \frac{x^*xm}{d(t_1-t_0)} \quad (22)$$

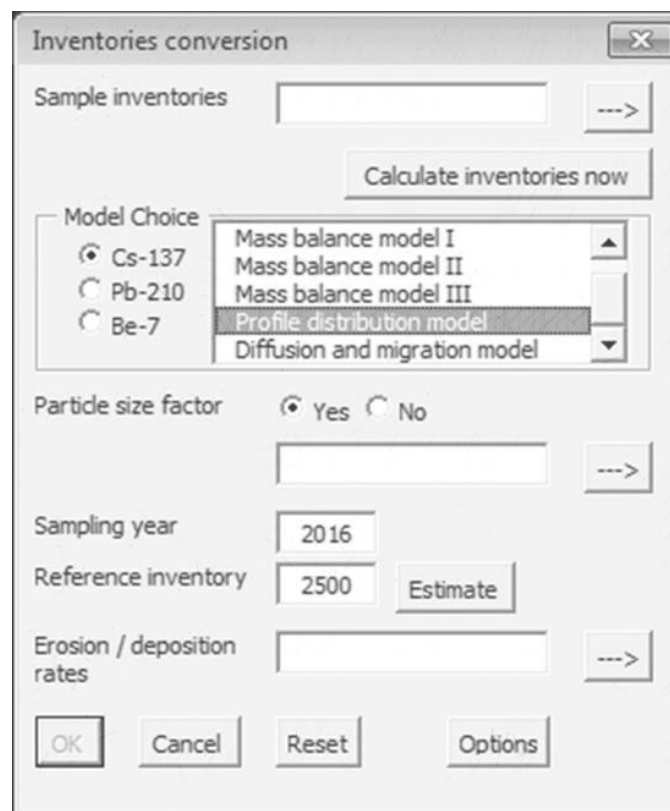
gde je  $xm$  - masa po jedinici površine ( $\text{kg m}^{-2}$ ) na lokacijama uzorkovanja,  $d$  - ukupna dubina uzorkovanja (cm) na lokacijama uzorkovanja,  $t_1$  - godina uzorkovanja (god) i  $t_0$  - referentna godina (god).

Kao i kod prethodno opisanih modela, veće vrednosti površinske aktivnosti radionuklida na lokacijama uzorkovanja u odnosu na referentno mesto, ukazuju na to da je na

posmatranoj lokaciji došlo do akumulacije zemljišta. Procena akumulacije upotrebom površinske aktivnosti radionuklida zahteva pretpostavku o poreklu uključenih slojeva zemljišta i debljini akumuliranih slojeva sedimenta [67]. Primenom modela MODERN može se razmatrati varijabilnost izvora sa različitim koncentracijama radionuklida. Iznad izmerenih vertikalnih profila može se simulirati proizvoljan broj slojeva, i mogu se definisati površinske aktivnosti svakog simuliranog akumuliranog sloja (scenario akumulacije) [67]. Izabrani scenariji nastaju iz verovatnoće da dinamika akumulacije uključuje uglavnom gornje slojeve zemljišta i ređe dublje slojeve.

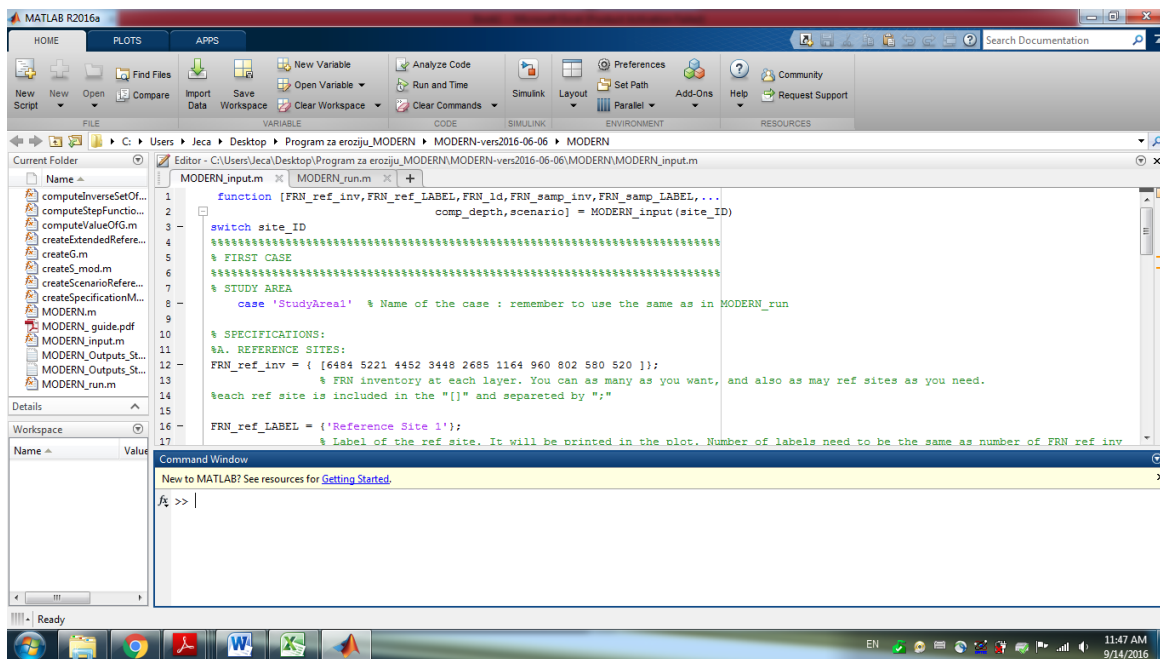
#### 3.5.4. Programi za procenu intenziteta erozije zemljišta

Program zasnovan na Excel™ razvijen je za konvertovanje površinske aktivnosti radionuklida u intenzitet erozije zemljišta kroz aplikaciju različitih modela (PM, MBM I, II i III, PD i DM). Izgled prozora programa za primenu konverzionih modela (PM, MBM I, II i III, PD i DM) prikazan je na slici 13.



Slika 13. Izgled prozora programa za implementaciju konverzionih modela - PM, MBM I, II i III, PD i DM

Program zasnovan na Matlab™ razvijen je za konvertovanje površinske aktivnosti radionuklida u intenzitet erozije zemljišta kroz aplikaciju modela MODERN. Izgled prozora programa za primenu modela MODERN prikazan je na slici 14.



Slika 14. Izgled prozora programa za implementaciju modela MODERN

### 3.5.5. Model USLE

Univerzalna jednačina gubitka zemljišta - USLE (*eng.* Universal Soil Loss Equation) predstavlja erozioni model za proračun srednjeg dugogodišnjeg intenziteta erozije, usled površinske i brazdaste erozije zemljišta [87]. Model USLE predviđa samo eroziju zemljišta, i nije u mogućnosti da predvidi taloženje nanosa čak i kada dolazi do akumulacije. Prosečni intenzitet erozije odnosi se na celu padinu ili sliv, čime se ne obezbeđuju dodatne informacije o izvorima i slivanju erodovanog materijala.

Osnovna jednačina za model USLE je [87]:

$$A = R \times K \times LS \times C \times P \quad (23)$$



gde je  $A$  - intenzitet erozije zemljišta ( $t\ ha^{-1}\ god^{-1}$ ),  $R$  - kišni erozivni faktor ili faktor erozione snage kiše ( $MJ\ mm\ ha^{-1}\ h^{-1}\ god^{-1}$ ),  $K$  - faktor erodibilnosti zemljišta ( $t\ ha\ h\ ha^{-1}\ MJ^{-1}\ mm^{-1}$ ),  $LS$  - topografski faktor,  $C$  - faktor biljnog pokrivača i  $P$  - faktor protiverozionih mera. Za potrebe ove studije za faktor biljnog pokrivača  $C$  korišćena je vrednost od 0,0435 za prirodne travnate površine preuzeta iz rada Panagos i sar. (2015) [88]. Za faktor protiverozionih mera  $P$  pretpostavljena vrednost je 1 s obzirom na to da na istraživanom prostoru ne postoje mere zaštite zemljišta od erozije.

Faktor erozione snage kiše  $R$  ( $MJ\ mm\ ha^{-1}\ h^{-1}\ god^{-1}$ )<sup>1</sup> izračunat je korišćenjem sledeće modifikovane jednačine [89-91]:

$$R = a \times P_j \quad (24)$$

gde je  $a$  - iznosi 1,3 i  $P_j$  - godišnja količina padavina (mm).

Faktor erodibilnosti zemljišta  $K$  ( $t\ ha\ h\ ha^{-1}\ MJ^{-1}\ mm^{-1}$ ) izračunat je korišćenjem sledeće jednačine [92]:

$$K = \left( \frac{2,1 \times 10^{-4} \times M^{1,14} \times (12 - OM) + 3,25 \times (s - 2) + 2,5 \times (p - 3)}{100} \right) \times 0,1317 \quad (25)$$

gde je  $M$  - sadržaj čestica zemljišta (%prah (0,002-0,05 mm) + %veoma sitan pesak (0,05-0,1 mm))  $\times$  (100 - % glina (<0,002 mm)),  $OM$  - sadržaj organskih materija (%),  $s$  - strukturna klasa zemljišta,  $p$  - klasa vodopropustljivosti zemljišta (tabela 5) i 0,1317 - faktor konverzije u SI sistem.

Razlikujemo četiri strukturne klase zemljišta s [93]: 1 (veoma ili jako sitnozrna: 1-2 mm); 2 (sitnozrna: 2-5 mm); 3 (srednje ili grubo zrnasta: 5-10 mm) i 4 (grudvasta, pločasta ili masivna: >10 mm).

---

<sup>1</sup> Faktor erozione snage kiše  $R$  ( $MJ\ mm\ ha^{-1}\ h^{-1}\ god^{-1}$ ):

$$R = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^{m_j} (EI_{30})_k$$

predstavlja proizvod kinetičke energije padavina  $E$  i njen maksimalni 30-minutni intenzitet  $I_{30}$ :  $EI_{30}$  ( $MJ\ mm\ ha^{-1}\ h^{-1}$ ), gde je  $n$  broj godina obuhvaćen podacima (god).

Tabela 5. Klase vodopropustljivosti zemljišta p [93]

Klasa permabilnosti	Tekstura
1 (brzo i veoma brzo)	Pesak
2 (umereno brzo)	Ilovasti pesak, peskovita ilovača
3 (umereno)	Ilovača, praskasta ilovača
4 (umereno sporo)	Pekovito glinasta ilovača, glinasta ilovača
5 (sporo)	Praškasto glinasta ilovača, pekovita glinuša
6 (veoma sporo)	Praškasta glinuša, glina

Topografski  $LS$  faktor izračunat je korišćenjem sledeće jednačine [94]:

$$LS = \left( \frac{x}{22,13} \right)^m (0,065 + 0,045s + 0,0065s^2) \quad (26)$$

gde je  $x$  - dužina nagiba (m),  $m$  - eksponent (tabela 6) i  $s$  - nagib padine (%).

Tabela 6. Vrednosti eksponenta  $m$  u jednačini (26) [94]

Vrednost $m$	Vrednosti nagiba padine (%)
0,5	$\geq 5$
0,4	$3 < \text{nagib} < 5$
0,3	$1 \leq \text{nagib} \leq 3$
0,2	$< 1$

## 4. REZULTATI I DISKUSIJA

### 4.1. Specifične aktivnosti $^{137}\text{Cs}$ u zemljištu istraživanog prostora

Deskriptivna statistika specifičnih aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  data u tabeli 7 prikazana je za ukupan istraživani prostor - A+B, istraživani prostor velike površine - A i istraživani prostor male površine - B:

- Ukupan istraživani prostor A+B: 44 profila zemljišta, uzorkovani do maksimalne dubine od 50 cm, po slojevima od po 5 cm dubine. Broj uzoraka po slojevima zemljišta je sledeći: 44 (0-5; 5-10; 10-15 i 15-20 cm), 41 (20-25 cm), 11 (25-30 cm), 10 (30-35; 35-40 cm), 8 (40-45; 45-50 cm) i 264 (0-50 cm).
- Istraživani prostor velike površine A: 22 profila zemljišta, uzorkovani do maksimalne dubine od 50 cm, po slojevima od po 5 cm dubine. Broj uzoraka po slojevima zemljišta je sledeći: 22 (0-5; 5-10; 10-15; 15-20 cm), 19 (20-25 cm), 11 (25-30 cm), 10 (30-35; 35-40 cm), 8 (40-45; 45-50 cm) i 154 (0-50 cm).
- Istraživani prostor male površine B: 22 profila zemljišta, uzorkovani do maksimalne dubine od 25 cm, po slojevima od po 5 cm dubine. Broj uzoraka po slojevima zemljišta je sledeći: 22 (0-5; 5-10; 10-15; 15-20; 20-25 cm) i 110 (0-25 cm).

Deskriptivna statistika obuhvata srednju vrednost (aritmetičku sredinu), medijanu, mod, standardnu devijaciju, koeficijent asimetrije, koeficijent zaobljenosti, opseg, minimalnu i maksimalnu vrednost.

Nakon černobiljskog akcidenta 1986. godine na prostoru teritorije Srbije došlo je do nehomogene površinske kontaminacije zemljišta radioizotopom  $^{137}\text{Cs}$  [22]. Na osnovu karte prostorne distribucije  $^{137}\text{Cs}$  ( $\text{Bq kg}^{-1}$ ) u površinskom sloju zemljišta Srbije, prikazane u radu Dragović i sar. (2012) [95], jasno se uočava nehomogena distribucija ovog radionuklida kao posledica uticaja geografskih faktora kao što su nadmorska visina, količina padavina i varijacija u stratosferskoj cirkulaciji [95]. Relativno visoke koncentracije  $^{137}\text{Cs}$  utvrđene su u planinskim predelima teritorije Srbije, koji su primili najveće količine padavina. Tako je dvadeset godina nakon černobiljskog akcidenta srednja vrednost specifične aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  u površinskom sloju zemljišta na planini Zlatibor iznosila  $108 \text{ Bq kg}^{-1}$  (opseg:  $73\text{-}160 \text{ Bq kg}^{-1}$ ) [95].

Tabela 7. Deskriptivna statistika vrednosti specifičnih aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  ( $\text{Bq kg}^{-1}$ ) u zemljištu istraživanih prostora A+B, A i B

Istraživani prostor	Parametar	Dubina (cm)										
		0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30 (0-25)*	30-35	35-40	40-45	45-50	0-50
A+B	Srednja vrednost	109	63	32	16	11	3,6	2,6	2,2	3,1	5,4	39
	Medijana <sup>1</sup>	91	48	22	13	8,9	1,4	1,2	1,3	1,3	2,0	15
	Mod <sup>2</sup>	21 <sup>a</sup>	0,80 <sup>a</sup>	0,83 <sup>a</sup>	0,43 <sup>a</sup>	0,30 <sup>a</sup>	0,75 <sup>a</sup>	1,3	0,46 <sup>a</sup>	0,31 <sup>a</sup>	0,29 <sup>a</sup>	0,80
	Standardna devijacija	84	54	33	15	11	4,1	3,0	2,2	3,2	9,9	57
	Koeficijent asimetrije <sup>3</sup>	0,89	1,5	2,4	2,2	2,1	2,0	1,6	1,8	0,63	2,8	2,5
	Koeficijent zaobljenosti <sup>3</sup>	0,60	2,3	7,6	6,9	5,0	4,2	1,9	3,1	-2,0	7,7	7,0
	Opseg	361	240	168	77	53	13	9,1	7,0	7,2	29	363
	Minimum	2,2	0,80	0,83	0,43	0,30	0,75	0,44	0,46	0,31	0,29	0,29
	Maksimum	363	241	169	78	53	14	9,5	7,5	7,5	30	363
A	Srednja vrednost	61	41	26	13	8,1	3,6	2,6	2,2	3,1	5,4	22
	Medijana	51	27	11	8,3	5,2	1,4	1,2	1,3	1,3	2,0	8,3
	Mod	184	0,80 <sup>a</sup>	0,83 <sup>a</sup>	0,43 <sup>a</sup>	0,30 <sup>a</sup>	0,75 <sup>a</sup>	1,3	0,46 <sup>a</sup>	0,31 <sup>a</sup>	0,29 <sup>a</sup>	0,80
	Standardna devijacija	52	41	37	17	9,2	4,1	3,0	2,2	3,2	9,9	36
	Koeficijent asimetrije	1,2	2,2	3,0	2,9	2,5	2,0	1,6	1,8	0,63	2,8	2,8
	Koeficijent zaobljenosti	1,00	5,4	11	9,9	8,1	4,2	1,9	3,1	-2,0	7,7	8,7
	Opseg	182	178	168	77	40	13	9,1	7,0	7,2	29	184
	Minimum	2,2	0,80	0,83	0,43	0,30	0,75	0,44	0,46	0,31	0,29	0,29
	Maksimum	184	179	169	78	40	14	9,5	7,5	7,5	30	184
B	Srednja vrednost	158	85	38	18	14	63					
	Medijana	154	78	38	16	9,7	30					
	Mod	21 <sup>a</sup>	17 <sup>a</sup>	8,5 <sup>a</sup>	2,5 <sup>a</sup>	1,7 <sup>a</sup>	1,7 <sup>a</sup>					
	Standardna devijacija	83	57	29	12	12	72					
	Koeficijent asimetrije	0,55	1,3	2,3	1,4	2,0	1,8					
	Koeficijent zaobljenosti	0,56	2,0	7,5	2,5	4,3	3,2					
	Opseg	343	224	132	48	52	362					
	Minimum	21	17	8,5	2,5	1,7	1,7					
	Maksimum	363	241	141	51	53	363					

<sup>a</sup> Postoji više modova. Prikazana je najmanja vrednost

\* Prikazana dubina odnosi se samo na istraživani prostor B

<sup>1</sup> Medijana je vrednost promenljive koja deli skup, u kome su podaci uređeni po veličini, na dva jednaka dela.

<sup>2</sup> Mod je vrednost promenljive koja se u datom nizu najčešće pojavljuje.

<sup>3</sup> Koeficijent asimetrije i koeficijent zaobljenosti ukazuju na veličinu odstupanja promenljivih od normalne raspodele.

U tabeli 8 dat je pregled vrednosti specifičnih aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  u zemljištu sa različitih prostora Srbije i Crne Gore. Uočava se da su prikazane srednje vrednosti specifičnih aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  na teritoriji Beograda i Vojvodine nešto niže u odnosu na ostale prikazane vrednosti.

Tabela 8. Pregled specifičnih aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  ( $\text{Bq kg}^{-1}$ ) u zemljištu u različitim delovima Srbije i Crne Gore

Oblast/grad/država	Dubina uzorkovanja (cm)	$^{137}\text{Cs}$ ( $\text{Bq kg}^{-1}$ )
Beograd [16]	0-10	23 (3-87)
Beograd [96]	0-30	15 (0,9-58)
Beograd [97]	0-50	19 (0,3-160)
Kragujevac, centralna Srbija [98]	0-10	40 (0,5-91)
Centralna Srbija [99]	0-10	72 (16-236)
Zapadna Srbija [100]	0-30	36 (2,6-87)
Vojvodina [101]	0-2	12 (1,1-55)
Srbija [95]	0-5	41 (2-160)
Srbija i Crna Gora [102]	0-5	48 (5,3-112)
Crna Gora [103]	0-15	56 (1,8-413)
Jugoistočna Srbija [ova disertacija]	0-50	39 (0,29-363)

Poređenjem vrednosti specifičnih aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  u zemljištu istraživanih prostora A i B (tabela 7) uočavaju se: (1) veće vrednosti specifičnih aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  u zemljištu istraživanog prostora B, i (2) izraženija varijabilnost specifičnih aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  u zemljištu istraživanog prostora A. Zapažanja se odnose kako na pojedinačne slojeve zemljišta, tako i na cele profile (pri čemu se svaki sloj zemljišta posmatra kao jednak).

Izražena varijabilnost specifičnih aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  u zemljištu može biti posledica velikog broja faktora kao što su: razlike u topografiji terena, nehomogene površinske kontaminacije zemljišta nakon černobiljskog akcidenta (usled razlika u količini i vrsti padavina), varijacije u vertikalnoj distribuciji  $^{137}\text{Cs}$  u zemljištu, prostornih razlika u fizičko-hemijskim i biološkim osobinama zemljišta, tipu zemljišta i vegetacionom (biljnom) pokrivaču, dejstva antropogenih aktivnosti, uticaja procesa erozije i akumulacije zemljišta [16, 19, 97, 104].

Gaspar i Navas (2013) su ukazali na to da izražena varijabilnost  $^{137}\text{Cs}$  u zemljištu može biti posledica varijacija u njegovoj vertikalnoj distribuciji kao i uticaja procesa erozije i akumulacije zemljišta [105]. U radioekološkim studijama ukazano je na vezu između količine

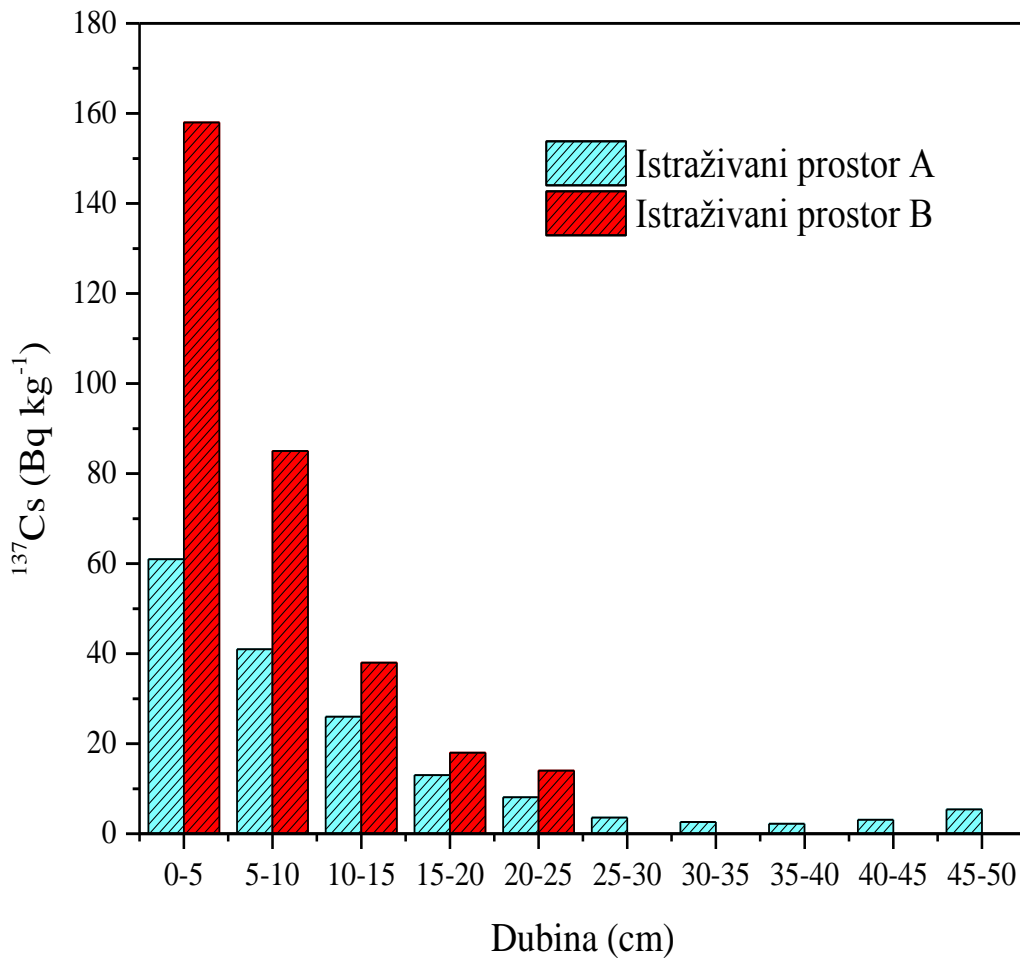
padavina i sadržaja  $^{137}\text{Cs}$  u zemljištu [106, 107]. Takada i sar. (2016) su pokazali da prostorna varijabilnost površinske aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  u zemljištu može biti posledica prostornih razlika u vegetacionom pokrivaču [108]. Marčiulioniene i sar. (2015) utvrdili su 3,3 puta veće vrednosti specifične aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  u močvarnom zemljištu ( $43 \text{ Bq kg}^{-1}$ ) u odnosu na livadsko zemljište ( $13 \text{ Bq kg}^{-1}$ ), navodeći da bi razlike u sadržaju organskih materija mogle biti uzrok [109].

Na istraživanom prostoru velike površine A može se pretpostaviti da na varijabilnost specifičnih aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  mogu uticati svi gore navedeni faktori, zbog toga što je površina istraživanog prostora A dovoljno velika (slika 7) da prostorne razlike u fizičko-hemijskim i biološkim osobinama zemljišta, tipu zemljišta i biljnom pokrivaču, topografiji terena, količini i vrsti padavina nakon černobiljskog akcidenta (što bi dovelo do nehomogene površinske kontaminacije zemljišta) mogu biti veoma izražene. Pored navedenih faktora procesi erozije i akumulacije zemljišta mogu značajno uticati na varijabilnost specifičnih aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  na istraživanom prostoru A.

Zbog veoma male površine istraživanog prostora B (slike 7 i 8) pretpostavlja se da su razlike u količini i vrsti padavina na istraživanom prostoru zanemarljive, i mogu se isključiti kao izvori varijabilnosti specifičnih aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  na istraživanom prostoru B. Varijabilnost specifičnih aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  na istraživanom prostoru male površine B može biti objašnjena uticajima mikro- i mezotopografije u kontrolisanju redistribucije ovog radionuklida procesima erozije ili akumulacije, kao i veoma malim prostornim razlikama u fizičko-hemijskim i biološkim osobinama zemljišta i biljnom pokrivaču.

Razlike u vrednostima specifičnih aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  u zemljištu istraživanih prostora A i B mogu biti posledica razlika u količini padavina odmah nakon černobiljskog akcidenta i razlika u vegetacionom pokrivaču, kao i razlika u intenzitetu erozije i akumulacije zemljišta na istraživanim prostorima.

Na slici 15 prikazana je vertikalna raspodela specifičnih aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  po slojevima zemljišta na istraživanim prostorima A i B. Na oba istraživana prostora jasno se uočava tendencija opadanja nivoa specifičnih aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  sa povećanjem dubine zemljišta. Najviše vrednosti specifičnih aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  izmerene su u površinskom sloju zemljišta (0-5 cm), dok su najmanje vrednosti izmerene u dubljim slojevima sa uočenim trendom eksponencijalnog opadanja aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  (slika 15).



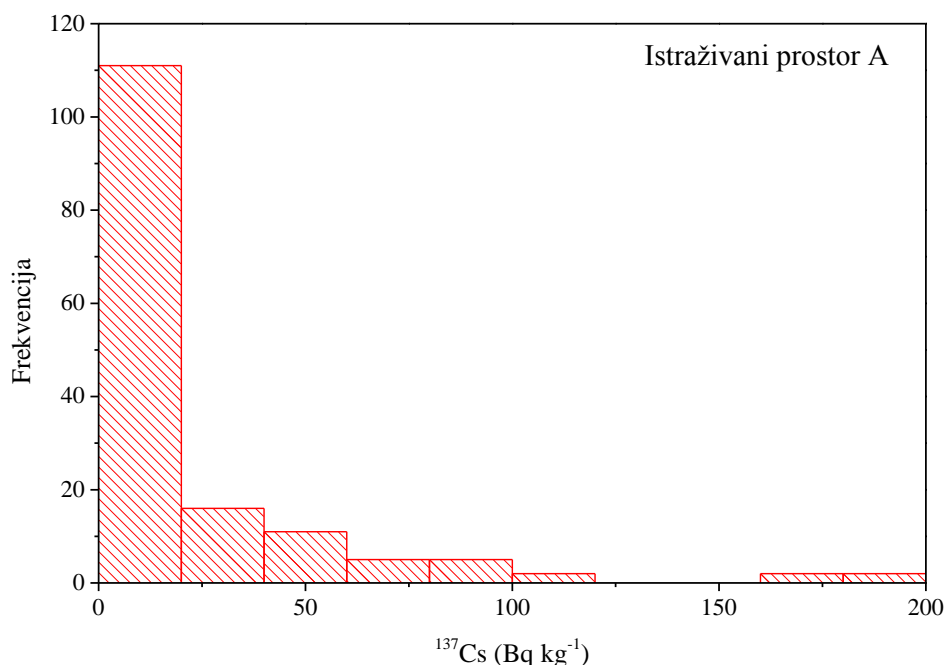
Slika 15. Vertikalna distribucija specifičnih aktivnosti radionuklida  $^{137}\text{Cs}$  ( $\text{Bq kg}^{-1}$ ) u zemljištu istraživanih prostora A i B

Na istraživanom prostoru A i B približno 66% odnosno 78%, specifične aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  zadržalo se u površinskom sloju zemljišta do 10 cm dubine. Na istraživanom prostoru velike površine A više od 95% ukupne specifične aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  nalazi se u površinskih 25 cm zemljišta. Na istraživanom prostoru A u slojevima zemljišta 40-45 cm i 45-50 cm (slika 15, tabela 7) javlja se blago povećanje vrednosti specifičnih aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  što može da ukazuje na poreklo  $^{137}\text{Cs}$  od proba nuklearnog oružja.

Ispitivanje vertikalne raspodele koncentracije  $^{137}\text{Cs}$  u zemljištu pokazalo je da se do 1996. godine černobiljski cezijum zadržao u prvih 15 cm zemljišta [22]. Na osnovu dubine na kojoj su izmerene najveće koncentracije  $^{137}\text{Cs}$  u zemljištu istraživanih prostora A i B (slika 15) može se zaključiti da detektovani  $^{137}\text{Cs}$  u najvećoj meri černobiljskog porekla.

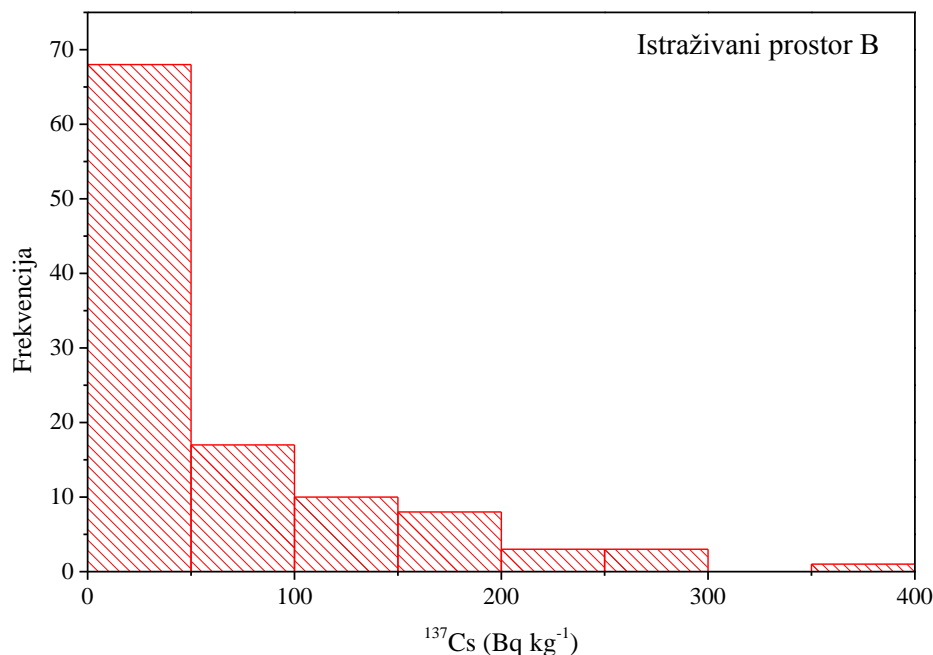
Veliki broj studija ukazao je na opadanje aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  sa dubinom zemljišta [24, 32, 97, 103, 105]. Karadeniz i Yaprak (2008) pokazali su da se 42-97%  $^{137}\text{Cs}$  zadržalo u prvih 10 cm dubine u šumskom zemljištu u Izmiru, Turska, osamnaest godina nakon černobiljskog akcidenta [110]. Pumpanen i sar. (2016) su ispitivanjem vertikalne raspodele  $^{137}\text{Cs}$  u zemljištima šumskih ekosistemima u Finskoj, Hyytiälä, i Japanu, Fukušima, ukazali na najveće zadržavanje  $^{137}\text{Cs}$  u površinskom sloju zemljišta odakle njegova koncentracija naglo opada ka dubljim slojevima [111]. Suchara i sar. (2016) ispitivanjem tri različita tipa zemljišta (*Stagnosol*, *Sandy Podzol* i *Cambisol*) u Češkoj dvadeset pet godina nakon černobiljskog akcidenta pokazali su da je specifična aktivnost  $^{137}\text{Cs}$  najveća u humusnom horizontu šumskog zemljišta [23]. Vertikalna migracija  $^{137}\text{Cs}$  u zemljištu je spor proces [16, 24, 25]. Stopa migracije zavisi od fizičkih, hemijskih i bioloških svojstava zemljišta, kao i od strukture zemljišnih horizonata i teksture zemljišta.

Primenom Šapiro-Vilkovog testa normalnosti [112] na specifične aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  uočeno je da njegova distribucija ne pokazuje normalnu raspodelu (slika 16a,b), što je očekivano s obzirom na antropogeno poreklo ovog radionuklida. Čujić (2016) i Bikit i sar. (2005) su takođe ukazali da  $^{137}\text{Cs}$  u zemljištu ne pokazuje normalnu raspodelu [12, 101].



Slika 16a. Distribucija frekvencija specifičnih aktivnosti radionuklida  $^{137}\text{Cs}$  ( $\text{Bq kg}^{-1}$ ) u zemljištu istraživanog prostora A





Slika 16b. Distribucija frekvencija specifičnih aktivnosti radionuklida  $^{137}\text{Cs}$  (Bq kg<sup>-1</sup>) u zemljištu istraživanog prostora B

#### 4.2. Fizičko-hemijske karakteristike zemljišta istraživanog prostora

Ponašanje  $^{137}\text{Cs}$  u zemljištu zavisi kako od njegovih osnovnih svojstava tako i od fizičko-hemijskih karakteristika zemljišta. Kompleksnost interakcija povećava se usled velikog broja procesa koji se dešavaju istovremeno i njihove zavisnosti od uslova životne sredine [113]. Razičiti horizonti zemljišta razlikuju se u pogledu fizičkih, hemijskih i bioloških karakteristika, što utiče na zadržavanje i migraciju  $^{137}\text{Cs}$  u zemljišnom profilu.

Deskriptivna statistika ispitivanog granulometrijskog sastava i karakteristika zemljišta (krupan pesak 2-0,2 mm, sitan pesak 0,2-0,05 mm, prah 0,05-0,002 mm, glina <0,002 mm, ukupni kapacitet izmene katjona u zemljištu - CEC, sadržaj humusa/organske materije, sadržaj karbonata - CaCO<sub>3</sub>, pH vrednost i specifična električna provodljivost - K) istraživanih prostora A+B, A i B prikazana je u tabeli 9. Na slici 17 prikazana je vertikalna distribucija analiziranih fizičko-hemijskih karakteristika zemljišta na istraživanim prostorima A i B.

Prema teksturnoj klasifikaciji USDA (*eng.* United States Department of Agriculture) [114] 62% od ukupnog broja analiziranih uzoraka na istraživanom prostoru A+B po teksturi

pripada peskovitoj ilovači, 17% pripada ilovači, 14% pripada ilovastom pesku, 4% praškatoj ilovači, 2% glinastoj ilovači i 1% pripada praškasto-glinastoj ilovači. Sadržaj peska i gline u mineralnom horizontu utiče na brzinu migracije  $^{137}\text{Cs}$  po dubini profila, u peskovitom zemljištu migracija je brža dok je u glinovitom zemljištu njegoa migracija sporija [19]. Mehaničke frakcije zemljišta - krupan pesak (2-0,2 mm), sitan pesak (0,2-0,05 mm), prah (0,05-0,002 mm) i glina (<0,002 mm) pokazuju relativno ujednačenu dubinsku distribuciju u zemljištu istraživanih prostora A i B (slika 17a-d), što je u skladu sa rezultatima prikazanim u radovima Dragović i sar. (2012) i Gaspar i Navas (2013) [97, 105].

Ukupni kapacitet izmene katjona u zemljištu - CEC u analiziranim uzorcima zemljišta kreće se od 2,0 do 104  $\text{cmol kg}^{-1}$ , dok srednja vrednost iznosi 23  $\text{cmol kg}^{-1}$  (tabela 9). Srednja vrednost CEC-a u zemljištu centralne Srbije iznosi 23  $\text{cmol kg}^{-1}$ , što je u skladu sa vrednostima dobijenim u ovom radu [99]. Nešto više vrednosti CEC-a nađene su u dubljim slojevima zemljišta (ispod 25 cm) na istraživanom prostoru velike površine A (slika 17e).

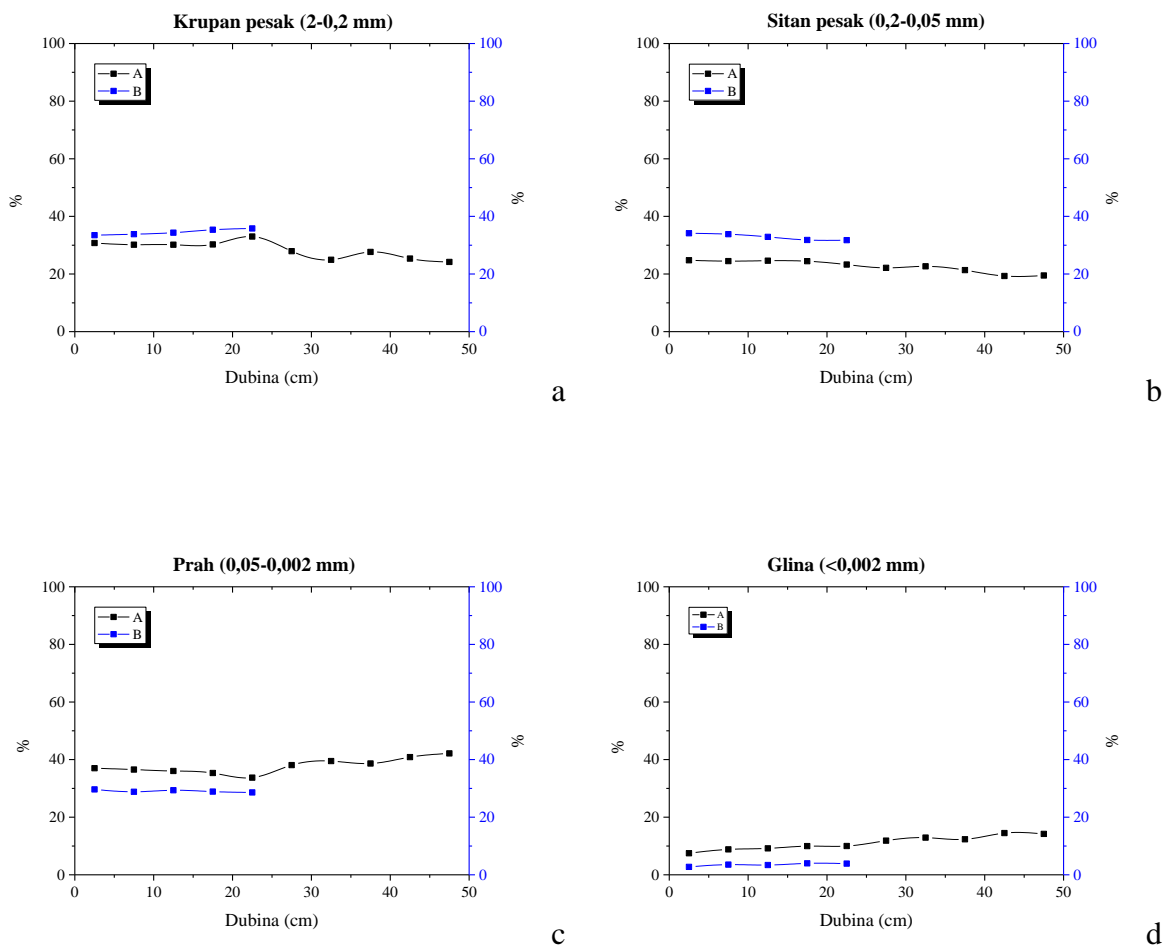
Organski ugljenik i/ili organske materije u zemljištu poboljšavaju stabilnost zemljišta usled formiranja stabilnih agregata, i na taj način doprinose održavanju strukture zemljišta i njegovoj zaštiti od erozije. Sadržaj humusa/organskih materija u analiziranim uzorcima zemljišta kreće se od 0,26 do 5,9%, dok srednja vrednost iznosi 1,9%. Od ukupnog broja analiziranih uzoraka najveći deo 63% pripada grupi slabo humoznih zemljišta (1-3%), dok svega 2% analiziranih uzoraka pripada grupi jako humoznih zemljišta (5-10%). Najveći sadržaj humusa utvrđen je u površinskom sloju zemljišta, dok sa povećanjem dubine sadržaj humusa u zemljištu opada (slika 17f), što je u saglasnosti sa radovima Gaspara i Navas (2013) i Martinez i sar. (2010) [105, 115]. Prostorna distribucija sadržaja humusa u zemljištima (0-30 cm) Srbije prikazana je na slici 18 [116].

Tabela 9. Deskriptivna statistika fizičko-hemijskih karakteristika zemljišta istraživanih prostora A+B, A i B

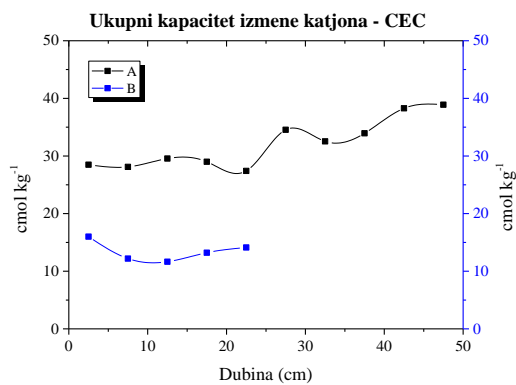
Istraživani prostor	Parametar	Krupan pesak (%)	Sitan pesak (%)	Prah (%)	Glina (%)	CEC (cmol kg <sup>-1</sup> )	Humus (%)	CaCO <sub>3</sub> (%)	pH	K (μS cm <sup>-1</sup> )
A+B	Srednja vrednost	32	27	34	7,4	23	1,9	1,2	6,73	38
	Medijana	32	28	32	4,5	14	1,6	0,68	6,4	25
	Mod	28 <sup>a</sup>	30 <sup>a</sup>	20 <sup>a</sup>	2,8	7,2 <sup>a</sup>	0,94	0,69	6,2	20
	Standardna devijacija	14	7,8	9,5	7,2	22	1,2	2,5	0,79	27
	Koeficijent asimetrije	0,13	-0,12	0,40	1,6	2,0	1,2	6,8	0,82	1,1
	Koeficijent zaobljenosti	0,08	-0,94	-0,57	1,6	3,5	0,86	48,7	-0,21	-0,06
	Opseg	69	35	48	32	102	5,7	21	4,5	105
	Minimum	4,1	12	9,1	0,36	2,0	0,26	0,14	5,46	8,7
	Maksimum	73	47	57	33	104	5,9	21	9,94	114
A	Srednja vrednost	29	23	37	10	31	1,7	1,7	7,14	48
	Medijana	28	23	37	6,1	23	1,5	0,77	7,2	42
	Mod	19 <sup>a</sup>	14 <sup>a</sup>	25 <sup>a</sup>	2,8	11 <sup>a</sup>	0,94	0,69	7,9	12,6 <sup>a</sup>
	Standardna devijacija	17	7,2	11	8,2	26	0,98	3,3	0,80	30
	Koeficijent asimetrije	0,32	0,83	-0,17	0,87	1,3	1,3	5,2	0,04	0,46
	Koeficijent zaobljenosti	-0,75	0,59	-0,97	-0,49	0,73	1,5	27	-0,52	-1,1
	Opseg	69	35	48	32	102	4,8	21	4,5	103
	Minimum	4,1	12	9,1	0,48	2,0	0,26	0,14	5,46	11
	Maksimum	73	47	57	33	104	5,1	21	9,94	114
B	Srednja vrednost	35	33	29	3,5	13	2,2	0,61	6,15	23
	Medijana	33	34	29	3,4	13	2,0	0,61	6,2	20
	Mod	32	30 <sup>a</sup>	21 <sup>a</sup>	3,1	7,2 <sup>a</sup>	2,2	0,81	6,2 <sup>a</sup>	20
	Standardna devijacija	7,8	4,7	5,1	1,3	6,0	1,3	0,23	0,19	12
	Koeficijent asimetrije	1,6	-1,5	-0,25	0,00	2,0	0,82	0,61	-0,52	2,1
	Koeficijent zaobljenosti	4,8	3,9	-0,19	0,06	6,1	0,04	1,8	0,26	4,3
	Opseg	50	27	27	7,1	35	5,6	1,3	1,0	60
	Minimum	20	14	14	0,36	4,4	0,33	0,16	5,55	8,7
	Maksimum	70	42	41	7,4	40	5,9	1,5	6,59	68

<sup>a</sup>Postoji više modova. Prikazana je najmanja vrednost

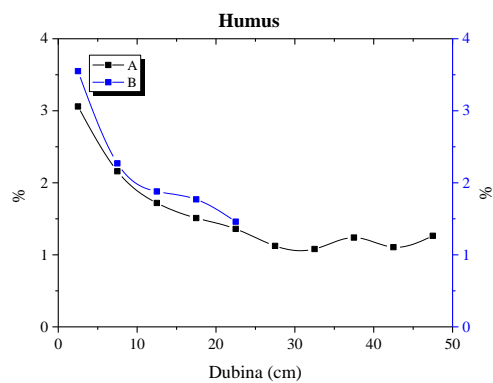
Prema srednjem sadržaju karbonata -  $\text{CaCO}_3$ , zemljište istraživanog prostora (tabela 9) pripada slabo karbonatnom tipu zemljišta (0,1-2%  $\text{CaCO}_3$ ). Malo viši sadržaj karbonata -  $\text{CaCO}_3$  utvrđen je u zemljištu do 25 cm dubine u odnosu na dublje slojeve na istraživanom prostoru velike površine A (slika 17g). Prostorna distribucija sadržaja karbonata -  $\text{CaCO}_3$  u zemljištima (0-30 cm) Srbije prikazana je na slici 18 [116].



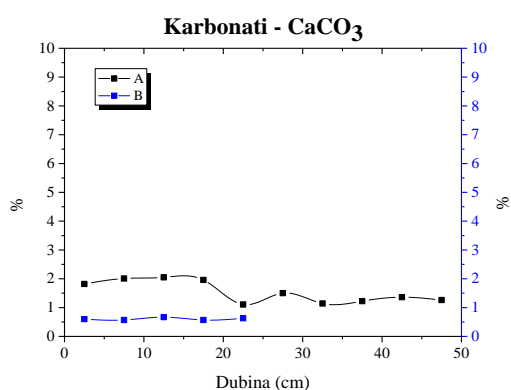
Slika 17a-d. Vertikalna distribucija analiziranih fizičko-hemijskih karakteristika zemljišta istraživanih prostora A i B



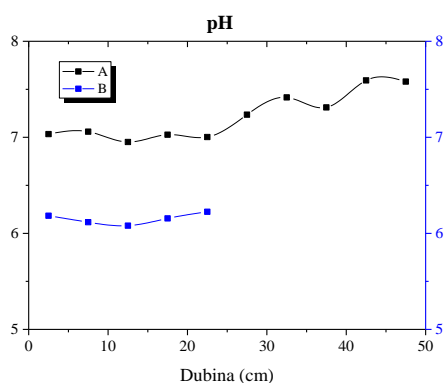
e



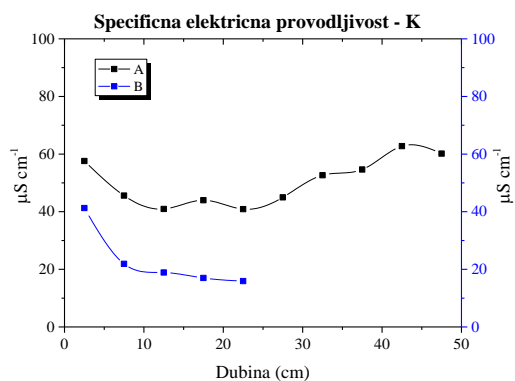
f



g



h



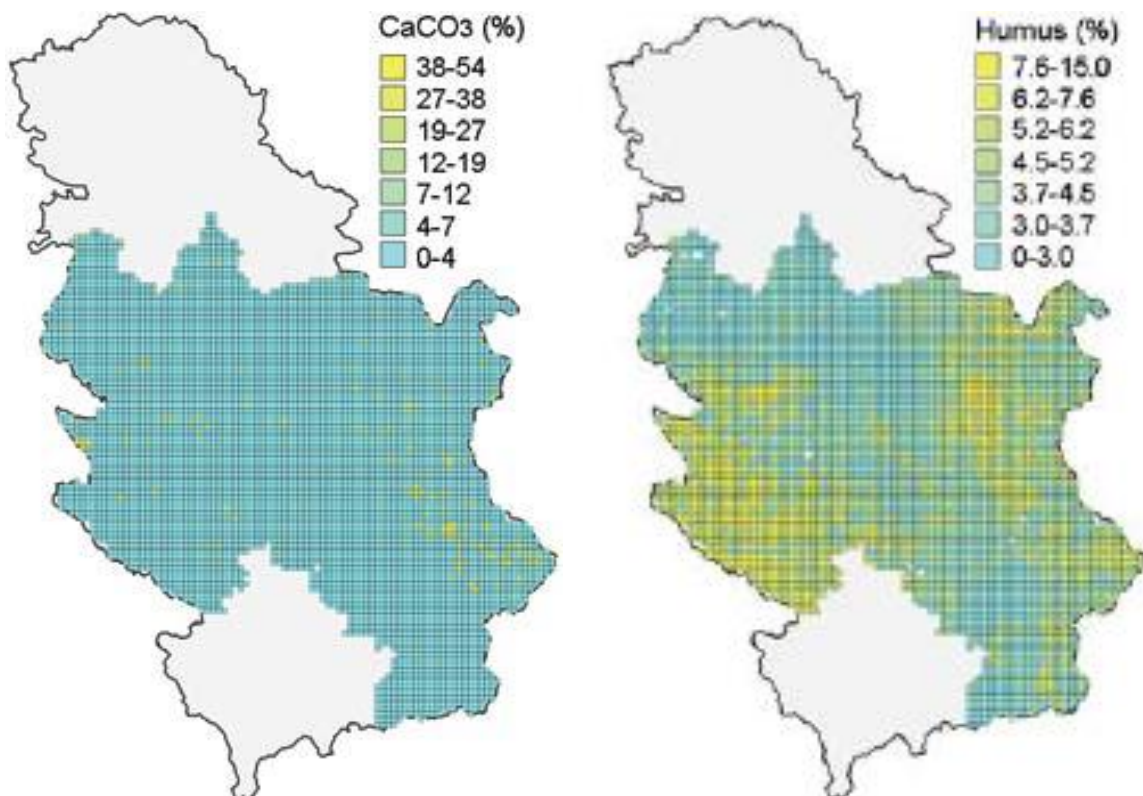
i

Slika 17e-i. Vertikalna distribucija analiziranih fizičko-hemijskih karakteristika zemljišta istraživanih prostora A i B

Giannakopoulou i sar. (2007) su ukazali na zavisnost sorpcije cezijuma od pH vrednosti zemljišta [117]. Na osnovu srednje vrednosti aktivne kiselosti (pH u H<sub>2</sub>O) zemljišta

istraživanih prostora A+B i A pripadaju klasi neutralnih zemljišta, dok zemljište istraživanog prostora B pripada klasi slabo kiselih zemljišta (tabela 9). Više vrednosti pH utvrđene su u dubljim slojevima zemljišta (ispod 25 cm) na istraživanom prostoru velike površine A (slika 17h), što je u skladu sa rezultatima Gaspara i Navas (2013) [105].

Specifična električna provodljivost - K u analiziranim uzorcima zemljišta kreće se od 8,7 do 114  $\mu\text{S cm}^{-1}$ , dok srednja vrednost iznosi 38  $\mu\text{S cm}^{-1}$  (tabela 9). Vrednosti specifične električne provodljivosti - K opadaju sa povećanjem dubine zemljišta na istraživanom prostoru male površine B (slika 17i).



Slika 18. Sadržaj CaCO<sub>3</sub> (%) i humusa (%) u zemljištima Srbije [116]

### 4.3. Korelacije i analiza grupisanja

Korelacije između specifičnih aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  i analiziranih fizičko-hemijskih karakteristika zemljišta istraživanih prostora utvrđene su na osnovu vrednosti Spirmanovih koeficijenata korelacije rangova (tabela 10). U tabeli 10 označene su značajne korelacije između  $^{137}\text{Cs}$  i fizičko-hemijskih karakteristika zemljišta istraživanih prostora A+B, A i B.

Tabela 10. Spirmanovi koeficijenti korelacije rangova između  $^{137}\text{Cs}$  i fizičko-hemijskih karakteristika zemljišta istraživanih prostora A+B, A i B

	$^{137}\text{Cs}$ ( $\text{Bq kg}^{-1}$ )		
	A+B	A	B
Krupan pesak (%)	<b>0,13*</b>	0,15	-0,19
Sitan pesak (%)	<b>0,48**</b>	<b>0,39**</b>	0,16
Prah (%)	<b>-0,19**</b>	-0,11	0,14
Glina (%)	<b>-0,53**</b>	<b>-0,46**</b>	-0,12
CEC ( $\text{cmol kg}^{-1}$ )	<b>-0,19**</b>	-0,07	0,05
Humus (%)	<b>0,54**</b>	<b>0,57**</b>	<b>0,51**</b>
$\text{CaCO}_3$ (%)	<b>-0,19**</b>	-0,09	0,09
pH	<b>-0,37**</b>	-0,14	<b>-0,22*</b>
K ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ )	0,05	0,10	<b>0,70**</b>

\*\*Korelacija značajna na nivou 0,01

\*Korelacija značajna na nivou 0,05

Sadržaj krupnog i sitnog peska pokazuje pozitivnu korelaciju sa  $^{137}\text{Cs}$  na istraživanom prostoru A+B, dok sadržaj praha i gline pokazuju negativnu korelaciju sa  $^{137}\text{Cs}$  (tabela 10). Pozitivna korelacija između sadržaja sitnog peska i  $^{137}\text{Cs}$  postoji na istraživanom prostoru velike površine A, dok je negativna korelacija nađena između sadržaja gline i  $^{137}\text{Cs}$  (tabela 10). Na istraživanom prostoru male površine B nisu utvrđene značajne korelacije između mehaničkih frakcija zemljišta i  $^{137}\text{Cs}$  (tabela 10). Ispitivanjem korelacija između površinske aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  i fizičko-hemijskih karakteristika zemljišta u erodiranoj neobrađivanoj oblasti, Iurian i sar. (2014) nisu uočili značajne korelacije između  $^{137}\text{Cs}$  i različitih mehaničkih frakcija zemljišta [118]. Takođe, Čujić (2016), Milenković i sar. (2015) i Gaspar i Navas (2013) nisu uočili značajne korelacije između različitih mehaničkih frakcija zemljišta (peska, praha i gline) i aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  [12, 98, 105]. Izostanak značajne korelacije između  $^{137}\text{Cs}$  i sadržaja gline u zemljištu Gaspar i sar. (2013) objasnili su kao posledicu ujednačene dubinske distribucije gline u zemljišnim profilima, i ograničenog opsega sadržaja gline u zemljištu

istraživanog prostora [119]. Pozitivna korelacija između specifičnih aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  i sadržaja praha i gline u zemljištu nađena je u radu Dragović i sar. (2012) [95].

Značajne pozitivne korelacije između  $^{137}\text{Cs}$  i sadržaja humusa utvrđene su u neobrađivanom zemljištu istraživanih prostora A+B, A i B (tabela 10), što je u saglasnosti sa rezultatima Ćujić (2016), Petrović i sar. (2013), Dragović i sar. (2012), Milenković i sar. (2015), Gaspar i Navas (2013), Gaspar i sar. (2013), Kim i sar. (1998), Forkapić i sar. (2016) i Lee i sar. (1997) [12, 96-98, 105, 119-122]. Ispitujući vezu između  $^{137}\text{Cs}$ , erozije zemljišta i organskog ugljenika u obrađivanom zemljištu, Ritchie i McCarty (2003) i Ritchie i sar. (2007) uočili su pozitivnu korelaciju između  $^{137}\text{Cs}$  i organskog ugljenika u zemljištu, kao i manji sadržaj organskog ugljenika u oblastima u kojima je došlo do erozije zemljišta u odnosu na oblasti u kojima je došlo do akumulacije, ukazujući da se  $^{137}\text{Cs}$  i organski ugljenik verovatno kreću duž sličnih fizičkih puteva i prema istim fizičkim mehanizmima [123, 124]. Analizirajući vezu između redistribucije zemljišta (erozije i akumulacije) korišćenjem  $^{137}\text{Cs}$  tehnike, i kretanja, skladištenja i gubitka organskog ugljenika u obrađivanom i neobrađivanom zemljištu, Martinez i sar. (2010) nisu uočili značajnu korelaciju između  $^{137}\text{Cs}$  i organskog ugljenika u neobrađivanom zemljištu ukazujući pritom na to da je prostorna distribucija organskog ugljenika verovatno posledica bioloških faktora, i da je upotreba  $^{137}\text{Cs}$  za predviđanje prostorne distribucije organskog ugljenika u neobrađivanom zemljištu problematična [115]. Iurian i sar. (2014) uočili su značajnu pozitivnu korelaciju između sadržaja organske materije i  $^{137}\text{Cs}$  u neobrađivanom erodovanom zemljištu, ukazujući da slični fizički procesi redistribucije zemljišta utiču na njih [118].

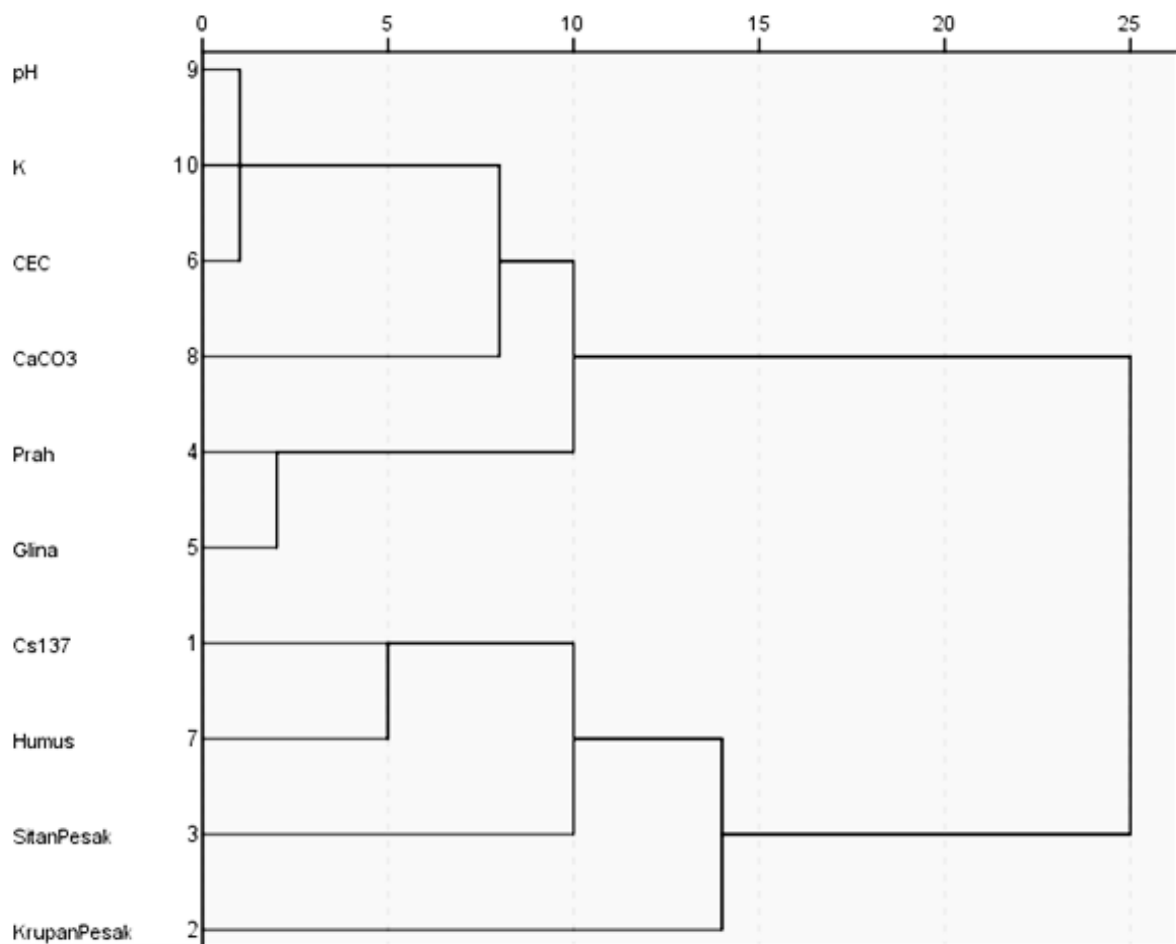
Negativne korelacije između pH vrednosti zemljišta i  $^{137}\text{Cs}$  uočene su na istraživanim prostorima A+B i B (tabela 10). Negativne korelacije između pH vrednosti zemljišta i  $^{137}\text{Cs}$  utvrđene su u sličnim studijama [105, 118]. Na istraživanom prostoru A+B negativne korelacije postoje između  $^{137}\text{Cs}$  i ukupnog kapaciteta izmene katjona - CEC i sadržaja karbonata -  $\text{CaCO}_3$  u zemljištu (tabela 10), dok je na istraživanom prostoru B utvrđena pozitivna korelacija između  $^{137}\text{Cs}$  i specifične električne provodljivosti - K (tabela 10). Na pozitivne korelacije između  $^{137}\text{Cs}$  i specifične električne provodljivosti - K i ukupnog kapaciteta izmene katjona - CEC u dominantnim tipovima zemljišta Srbije ukazali su Dragović i sar. (2012) [97]. Petrović i sar. (2013) utvrdili su pozitivnu korelaciju između  $^{137}\text{Cs}$  i specifične električne provodljivosti - K u zemljištu Beograda [96].

Rezultati hijerarhijske analize grupisanja  $^{137}\text{Cs}$  i fizičko-hemijskih karakteristika zemljišta sprovedene korišćenjem metoda najdaljeg suseda, kao pravila spajanja, i



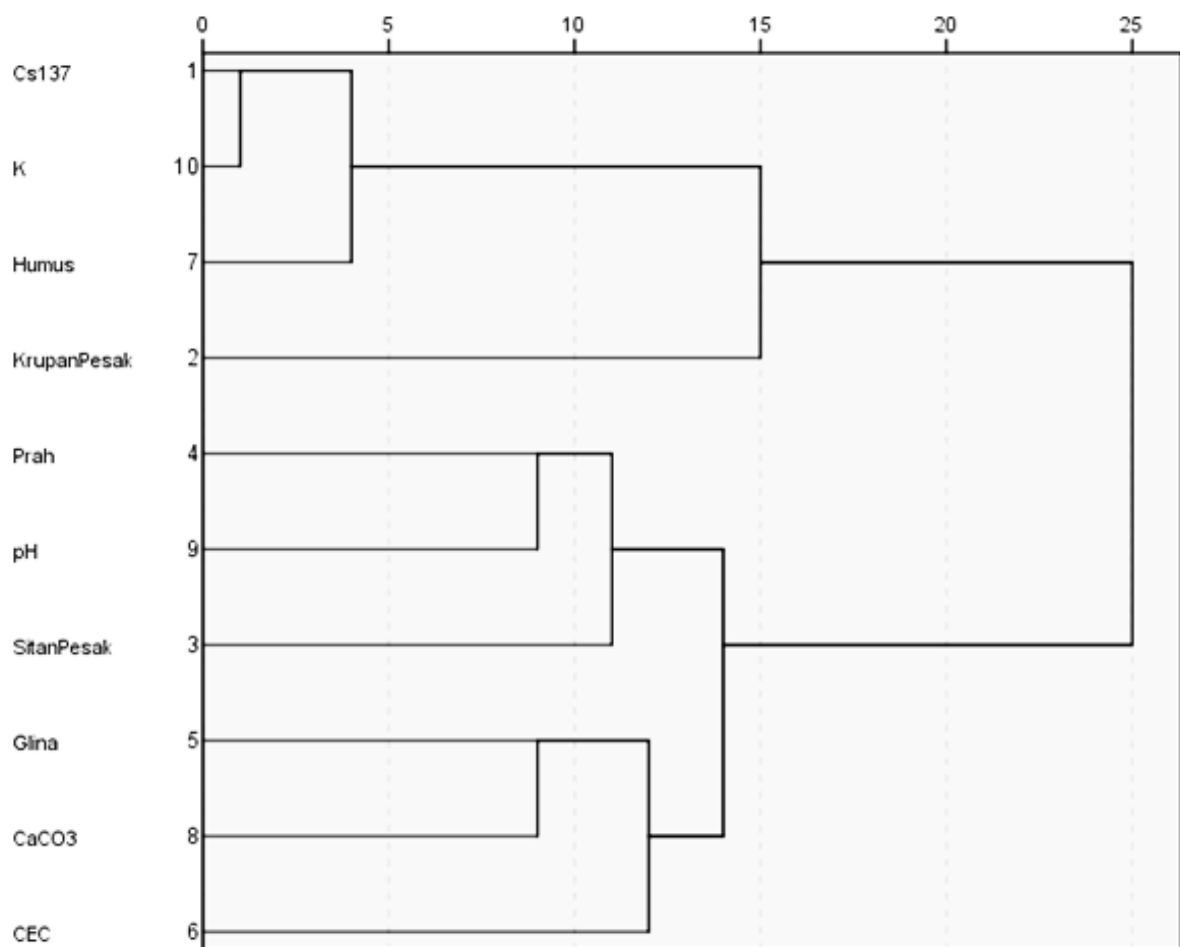
Pirsonovog koeficijenta, kao mere blizine, ilustrovani su dendrogramima prikazanim na slikama 19 i 20.

Na osnovu rezultata dobijenih primenom hijerarhijske analize grupisanja, ispitivane promenljive ( $^{137}\text{Cs}$  i fizičko-hemijske karakteristike zemljišta) sa istraživanog prostora velike površine A grupisane su u tri klastera (slika 19). Prvi klaster čine pH, specifična električna provodljivosti - K, ukupni kapacitet izmene katjona - CEC, karbonati -  $\text{CaCO}_3$ , prah i glina. Drugi klaster čine  $^{137}\text{Cs}$ , humus i sitan pesak. Dok treći klaster čini samo krupan pesak. Značajne pozitivne korelacije dobijene su između  $^{137}\text{Cs}$  i sitnog peska i sadržaja humusa na istraživanom prostoru velike površine A (tabela 10).



Slika 19. Dendrogram dobijen hijerarhijskom analizom grupisanja  $^{137}\text{Cs}$  i fizičko-hemijskih karakteristika zemljišta istraživanog prostora velike površine A

Na osnovu rezultata dobijenih primenom hijerarhijske analize grupisanja ispitivane promenljive ( $^{137}\text{Cs}$  i fizičko-hemijske karakteristike zemljišta) sa istraživanog prostora male površine B grupisane su u četiri klastera (slika 20). Prvi klaster čine  $^{137}\text{Cs}$ , specifična električna provodljivost - K i humus. Drugi klaster čini samo krupan pesak. Značajne pozitivne korelacije na istraživanom prostoru male površine B dobijene su između  $^{137}\text{Cs}$  i specifične električne provodljivosti - K i sadržaja humusa (tabela 10). Treći klaster čine prah, pH i sitan pesak, dok četvrti klaster čine glina, karbonati -  $\text{CaCO}_3$  i ukupni kapacitet izmene katjona - CEC.



Slika 20. Dendrogram dobijen hijerarhijskom analizom grupisanja  $^{137}\text{Cs}$  i fizičko-hemijskih karakteristika zemljišta istraživanog prostora male površine B

#### 4.4. Ispitivanje intenziteta erozije zemljišta na osnovu aktivnosti $^{137}\text{Cs}$ na istraživanom prostoru male površine B

Sa ciljem ispitivanja intenziteta erozije zemljišta korišćenjem radioizotopa  $^{137}\text{Cs}$  izabran je prostor male površine B (veličine  $0,05 \text{ km}^2$  ili 5 ha) (slike 7 i 8) u cilju minimiziranja uticaja velikog broja faktora (značajnijih razlika u fizičko-hemijskim i biološkim osobinama zemljišta, tipu zemljišta i biljnom pokrivaču, nehomogenosti površinske kontaminacije zemljišta istraživanog prostora posle černobiljskog akcidenta usled različite količine i vrste padavina) na varijabilnost  $^{137}\text{Cs}$  u zemljištu istraživanog prostora.

Prethodno sprovedena studija na istraživanom prostoru velike površine A (slika 7) pokazala je da se najveća količina  $^{137}\text{Cs}$  ( $\text{Bq kg}^{-1}$ ) (više od 95%) zadržala u površinskim 25 cm zemljišta. Za potrebe ispitivanja erozije zemljišta korišćenjem  $^{137}\text{Cs}$ , profili zemljišta sa istraživanog prostora male površine B (slike 7 i 8) otvarani su do 25 cm dubine. Na slici 21 prikazan je izgled istraživanog prostora male površine B.



Slika 21. Istraživani prostor male površine B

#### 4.4.1. Referentna površinska aktivnost $^{137}\text{Cs}$

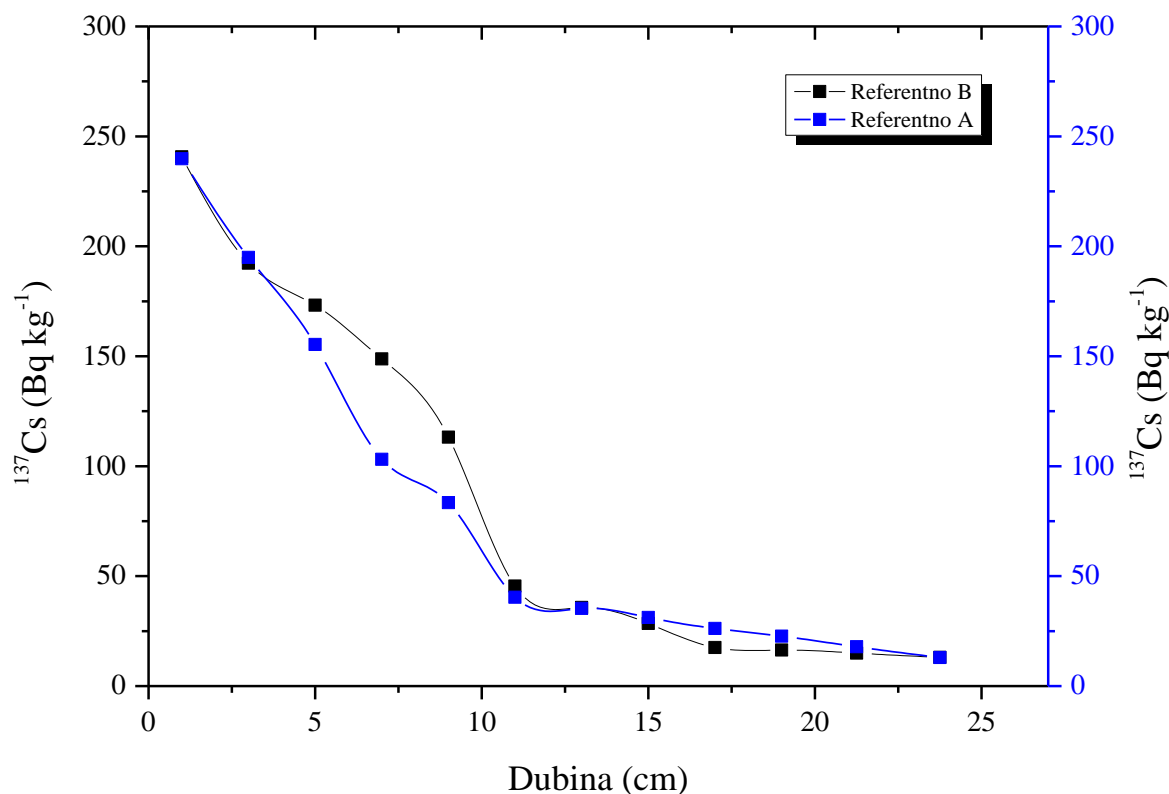
Vertikalna distribucija specifičnih aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  u referentnim profilima zemljišta otvaranim u neposrednoj blizini istraživanog prostora male površine B prikazana je na slici 22. Vertikalna distribucija specifičnih aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  u dva otvorena referentna profila zemljišta veoma je slična (slika 22). Uočava se jasno opadanje specifične aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  sa povećanjem dubine zemljišta sa maksimalnom aktivnošću u površinskom sloju zemljište dubine 0-2 cm (slika 22). U sloju do 10 cm referentnih profila zemljišta A i B nalazi se oko 80% ukupne specifične aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$ .

Slične vertikalne distribucije  $^{137}\text{Cs}$  u referentnim profilima zemljišta nađene su u brojnim studijama [104, 118, 125]. Porto i sar. (2003), Porto i sar. (2001) i Iurian i sar. (2012) u referentnim profilima utvrdili su opadanje specifične aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  sa dubinom zemljišta pri čemu je maksimum aktivnosti nađen u površinskom sloju zemljišta ili odmah ispod površinskog sloja [86, 126, 127]. Iurian i sar. (2012) utvrdili su da se 87% ukupne specifične aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  nalazi u površinskih 10 cm zemljišta, dok se na dubini ispod 25 cm  $^{137}\text{Cs}$  nije mogao detektovati [127]. Ceaglio i sar. (2012) 87% ukupne aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  uočili su u površinskih 9 cm zemljišta referentnog profila, dok ispod 12 cm dubine nisu detektovali prisutvo  $^{137}\text{Cs}$  [128]. Eksponecijalni pad aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  sa dubinom zemljišta, sa 80-90% zadržavanja  $^{137}\text{Cs}$  u sloju zemljišta do 20 cm dubine, predstavlja pokazatelj da je referentni prostor podoban [14], što je u saglasnosti sa rezultatima dobijenim u ovoj studiji.

Površinska aktivnost  $^{137}\text{Cs}$  ( $\text{Bq m}^{-2}$ ) za referentne profile zemljišta izračunata je korišćenjem jednačine (5). Srednja vrednost lokalne referentne površinske aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  za istraživani prostor male površine B iznosi  $27 \pm 5 \text{ kBq m}^{-2}$  (površinska aktivnost  $\pm$  standardna devijacija), dok koeficijent varijacije (CV) iznosi 16,7%. Slične vrednosti površinske aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  dobijene su za referentne profile zemljišta na prostoru basena reke Zuše, region Orel, Rusija, gde je nivo černobiljske kontaminacije umeren [129].

Prema studiji Owens-a i Walling-a (1996) nasumična prostorna varijabilnost, koja nastaje kao posledica malih razlika u karakteristikama zemljišta, vegetacionom pokrivaču, mikro-topografiji, korenju biljaka i aktivnosti čoveka i životinja, predstavlja glavni izvor varijabilnosti površinske aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  na referentnom prostoru [104]. Nizak koeficijent varijacije (<30%) je još jedan važan pokazatelj da je referentni prostor stabilan i neobrađivan [14]. Vrednost koeficijenta varijacije dobijena u ovom radu u skladu je sa vrednosti medijane koeficijentata varijacije od ~19% prikazane u preglednom radu Sutherland-a (1996) [130].

Vrednosti koeficijenta varijacije od ~27 i ~22% dobijene su za referentne prostore u sličnim studijama sprovedenim u oblasti Kluž u Rumuniji i severozapadnoj Italiji, redom [118, 127, 128].



Slika 22. Vertikalna distribucija specifičnih aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  ( $\text{Bq kg}^{-1}$ ) u referentnim profilima zemljišta (Ref A i Ref B)

Primenom programa razvijenog od strane Walling i sar. (2006) [26] moguće je ispitati površinsku aktivnost  $^{137}\text{Cs}$  poreklom od testiranja nuklearnog oružja na istraživanom prostoru. Za predviđanje površinske aktivnosti u određenoj godini softver koristi geografsku širinu i dužinu i godišnju količinu padavina za istraživani prostor. Korišćenjem programa dobijeno je da oko  $1,4 \text{ kBq m}^{-2}$  površinske aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  na istraživanom prostoru B u godini uzorkovanja (2014. godina) potiče od testiranja nuklearnog oružja. Poređenjem ove vrednosti sa vrednošću dobijenom za lokalnu referentnu površinsku aktivnost  $^{137}\text{Cs}$  na istraživanom prostoru B, uočava se da je površinska aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  na istraživanom prostoru u najvećem procentu černobiljskog porekla. Takođe, mora se naglasiti da u referentnim profilima (slika 22) nije uočeno povećanje vrednosti specifične aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  u dubljim

slojevima zemljišta koje bi bilo indentifikovano kao maksimum koji potiče od depozicije  $^{137}\text{Cs}$  usled testiranja nuklearnog oružja. Ovakav maksimum, odnosno povećanje vrednosti specifične aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$ , može biti prisutan u dubljim slojevima zemljišta (slika 15: 45-50 cm) ili može biti zamaskiran mnogo višim vrednostima koncentracija  $^{137}\text{Cs}$  deponovanog usled černobiljskog akcidenta kao rezultat njegove vertikalne migracije.

U studiji procene intenziteta erozije sprovedenoj u Rumuniji utvrđeno je da 72% izmerene površinske aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  na referentnom prostoru černobiljskog porekla [118]. U centralnoj Sloveniji naznačeno je da je ukupna depozicija radiocezijuma ( $^{134,137}\text{Cs}$ ) nakon černobiljskog akcidenta oko 5 puta veća u odnosu na depoziciju nakon tesiranja nuklearnog oružja [131], dok je na teritoriji Crne Gore, opština Pljevlja, prosečna kontaminacija zemljišta 10-ak puta veća nakon černobiljskog akcidenta [132]. Do 1996. godine cezijum poreklom iz Černobilja zadržao u površinskom sloju zemljišta (0-15 cm) Srbije [22].

#### **4.4.2. Površinska aktivnost $^{137}\text{Cs}$ na istraživanom prostoru male površine B**

Vertikalna distribucija specifičnih aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  ( $\text{Bq kg}^{-1}$ ) u profilima zemljišta otvaranih duž transektu na istraživanom prostoru male površine B prikazana je na slici 23a-e.

Aktivnost  $^{137}\text{Cs}$  ( $\text{Bq kg}^{-1}$ ) opada sa dubinom zemljišta u najvećem broju analiziranih profila, što pokazuje da zemljište na istraživanom prostoru nije obrađivano (slika 23a-e). Opadanje vrednosti specifičnih aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  sa dubinom zemljišta nije uočeno u samo dva profila sa istraživanog prostora, i to profila koji se nalazi na najvišoj (7) i najnižoj (11) lokaciji na transektu 2 (slika 23b). Profil zemljišta na lokaciji 7 pokazuje ujednačenu distribuciju  $^{137}\text{Cs}$  sa dubinom, dok profil zemljišta na lokaciji 11 pokazuje ujednačenu distribuciju  $^{137}\text{Cs}$  u površinskih 20 cm nakon čega dolazi do povećanja aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  u sloju 20-25 cm dubine (slika 23b). Neočekivana vertikalna distribucija  $^{137}\text{Cs}$  u dva profila zemljišta (lokacije 7 i 11) na istraživanom prostoru može biti posledica ljudskih aktivnosti u poslednjih 30 godina. Ujednačena aktivnost  $^{137}\text{Cs}$  sa dubinom profila zemljišta na lokaciji 7 ukazuje na to da je došlo do značajnog mešanja slojeva zemljišta unutar profila. Visoka aktivnost  $^{137}\text{Cs}$  u sloju zemljišta 20-25 cm profila na lokaciji 11 može biti posledica inverzije profila ili prekrivanja originalne površine zemljišta od strane akumuliranog zemljišta sa ujednačenom nižom aktivnošću. Ispitivanjem vertikalne distribucije  $^{137}\text{Cs}$  u sedimentu akumuliranom na peščanom sprudu Tanaka i sar. (2015) uočili su ujednačenu dubinsku distribuciju  $^{137}\text{Cs}$  u sloju zemljišta do 16 cm nakon čega dolazi do naglog povećanja

specifične aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  u poslednjem analiziranom sloju (18-20 cm) ukazujući da je sloj sedimenta sa najvišom aktivnošću  $^{137}\text{Cs}$  najverovatnije prekriven kasnijim deponovanjem sedimenta sa nižom aktivnošću  $^{137}\text{Cs}$  [133].

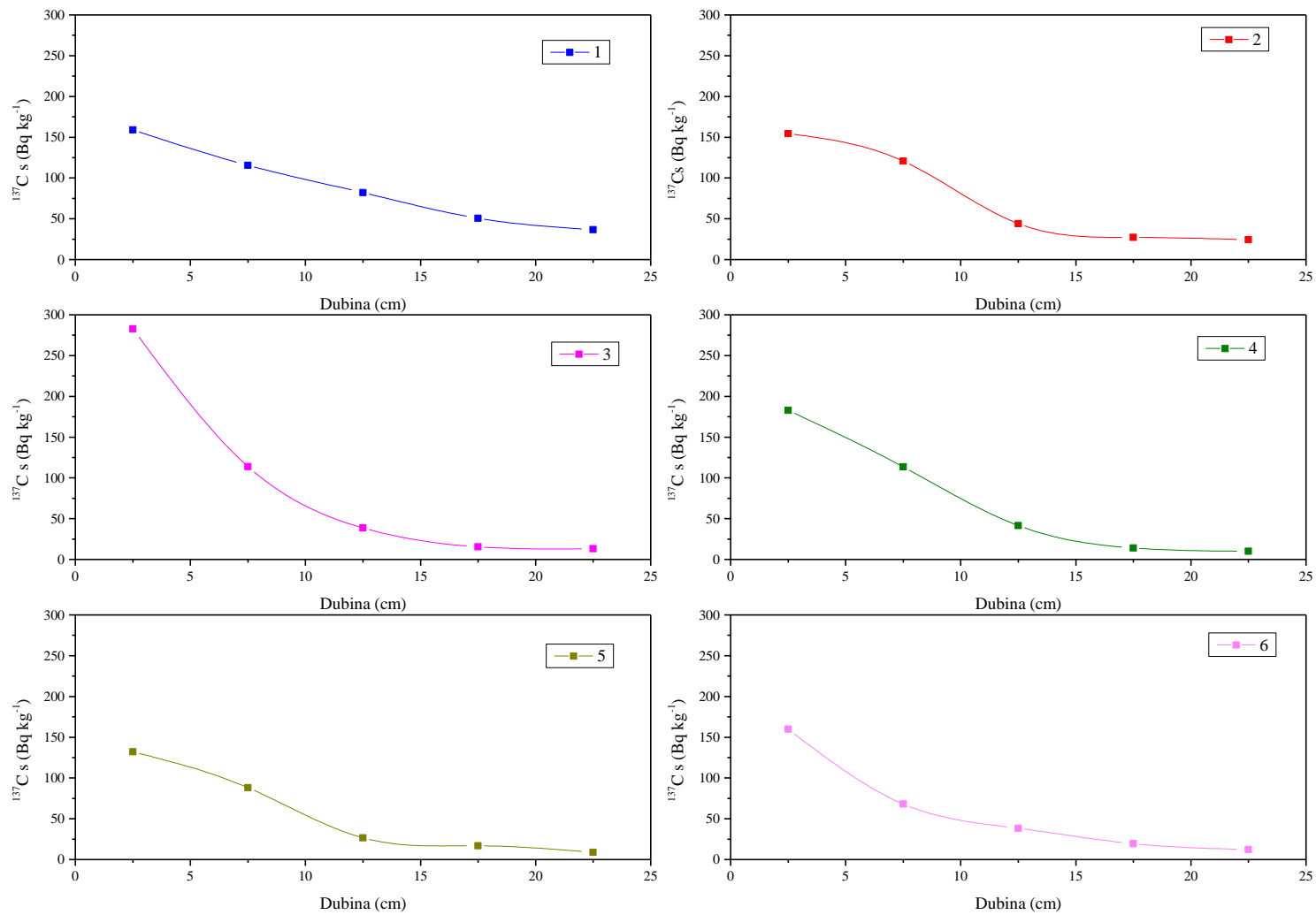
Osnovna deskriptivna statistika ukupne površinske aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  ( $\text{kBq m}^{-2}$ ) u profilima zemljišta duž pojedinačnih transekata (slika 8) prikazana je u tabeli 11.

Tabela 11. Osnovna deskriptivna statistika površinske aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  ( $\text{kBq m}^{-2}$ ) u profilima zemljišta duž pojedinačnih transekata na istraživanom prostoru male površine B

$^{137}\text{Cs}$ ( $\text{kBq m}^{-2}$ )	Transekt 1	Transekt 2	Transekt 3	Transekt 4	Transekt 5
Srednja vrednost	24	16	26	20	18
Standardna devijacija	4,4	13	19	2,4	0,33
Koeficijent varijacije (%)	18	81	72	12	1,8

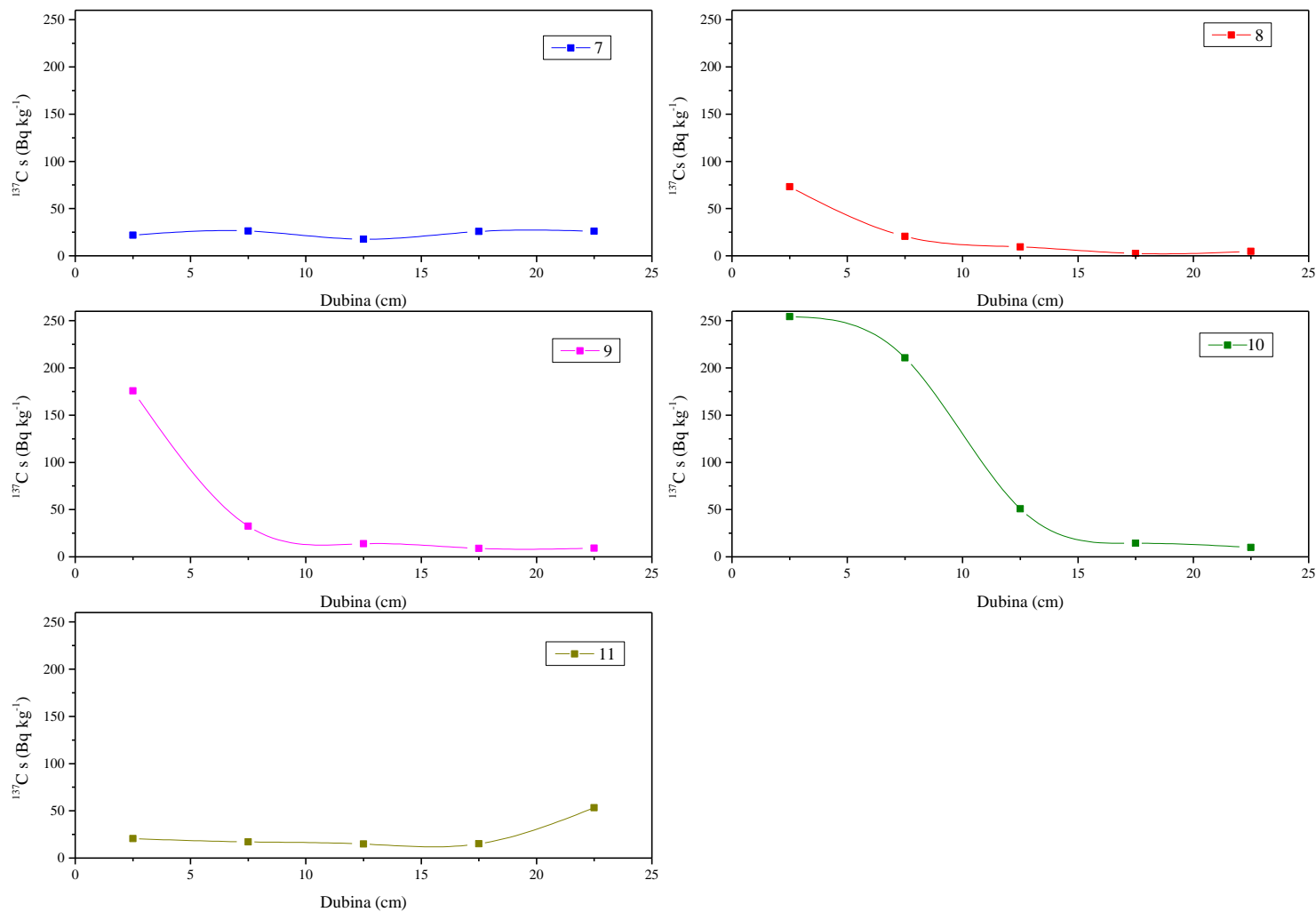
Na istraživanom prostoru male površine B srednja vrednost površinske aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  iznosi  $22 \text{ kBq m}^{-2}$ , dok koeficijent varijacije iznosi 54,2%.

Niže vrednosti površinske aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  u poređenju sa vrednošću dobijenom na istraživanom prostoru B dobijene su u sličnim vrstama studija sprovedenim na prostoru Srbije, Deliblato (od 3 do  $10 \text{ kBq m}^{-2}$ ), Rumunije, oblast Kluž (od 1 do  $5 \text{ kBq m}^{-2}$ ), Italije, Kalabrija (od  $<1$  do  $3 \text{ kBq m}^{-2}$ ) i Turske, Istanbul (od  $<1$  do  $2 \text{ Bq m}^{-2}$ ) [68, 118, 126, 127, 134], što je posledica većih vrednosti specifičnih aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  izmerenih u zemljištu istraživanog prostora B. Dok su sličnije vrednosti dobijene u studijama sprovedenim na prostoru Turske, brdo Yatağan (od  $<5$  do  $>27 \text{ kBq m}^{-2}$ ) i brdo Kirtaş (od 4 do  $16 \text{ kBq m}^{-2}$ ) kao i u studiji sprovedenoj u obrađivanoj oblasti u centralnoj Grčkoj (od 3 do  $43 \text{ kBq m}^{-2}$ ) [135-137].

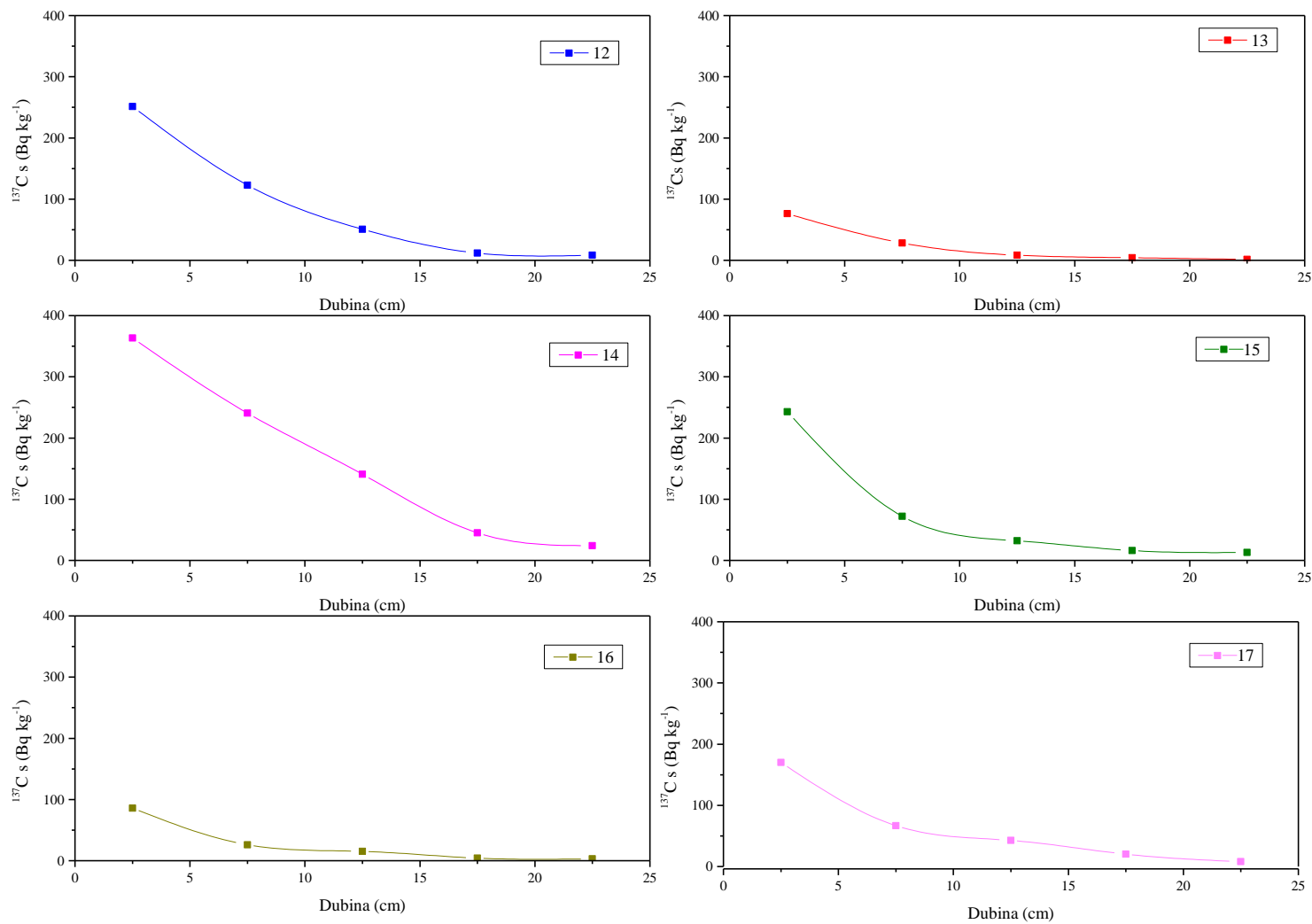


Slika 23a. Vertikalna distribucija specifičnih aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  (Bq kg $^{-1}$ ) u profilima zemljišta sakupljenih duž pojedinačnih transekata na istraživanom prostoru male površine B - **transekt 1**

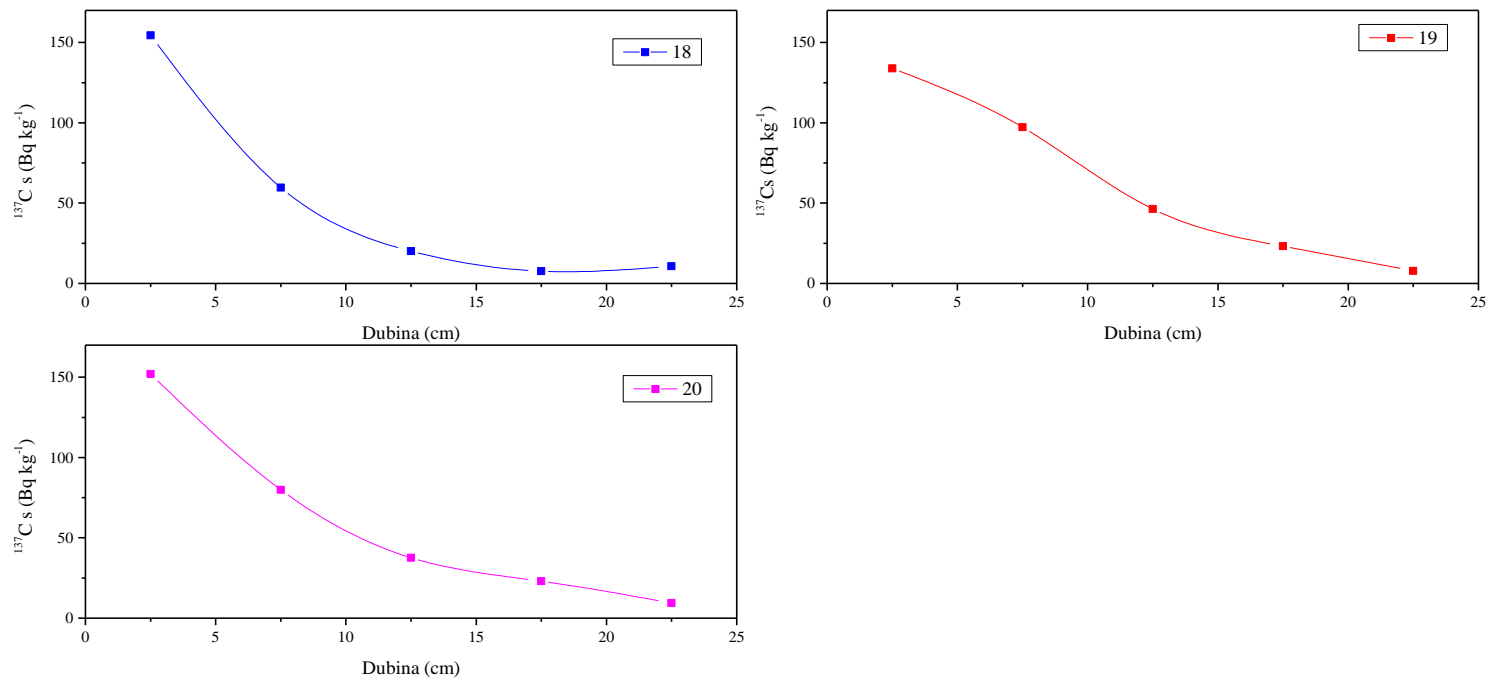




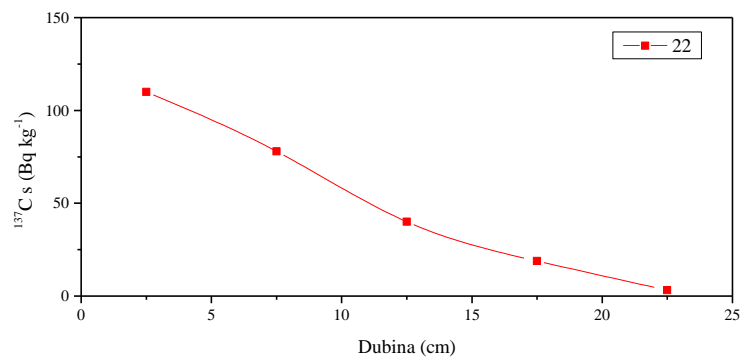
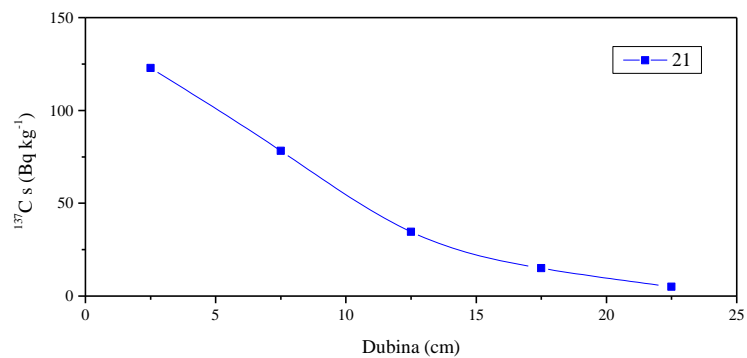
Slika 23b. Vertikalna distribucija specifičnih aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  (Bq kg $^{-1}$ ) u profilima zemljišta sakupljenih duž pojedinačnih transekata na istraživanom prostoru male površine B - **transekt 2**



Slika 23c. Vertikalna distribucija specifičnih aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  (Bq kg $^{-1}$ ) u profilima zemljišta sakupljenih duž pojedinačnih transekata na istraživanom prostoru male površine B - **transekt 3**



Slika 23d. Vertikalna distribucija specifičnih aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  ( $\text{Bq kg}^{-1}$ ) u profilima zemljišta sakupljenih duž pojedinačnih transekata na istraživanom prostoru male površine B - **transekt 4**



Slika 23e. Vertikalna distribucija specifičnih aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  (Bq kg $^{-1}$ ) u profilima zemljišta sakupljenih duž pojedinačnih transekata na istraživanom prostoru male površine B - **transekt 5**

#### 4.4.3. Intenziteti erozije izračunati primenom modela PD

Intenziteti erozije zemljišta ( $t\ ha^{-1}\ god^{-1}$ ) na istraživanom prostoru male površine B izračunati su primenom modela PD (opisan u delu 3.5.1).

Vrednosti specifične aktivnosti  $^{137}Cs$  u površinskom sloju zemljišta  $A(0)$  i parametra oblika profila  $h_0$  dobijeni su korišćenjem jednačine (11). Dobijena vrednost parametra oblika profila  $h_0$  iznosi  $96\ kg\ m^{-2}$ . Vrednost parametra oblika profila  $h_0$  u skladu je sa vrednostima dobijenim u sličnim studijama [125, 127].

Za primenu modela PD na istraživanom prostoru B, 1986. godina korišćena je kao godina ukupne depozicije  $^{137}Cs$ , umesto orginalne pretpostavke modela da se ukupna depozicija  $^{137}Cs$  dogodila 1963. godine (jednačina 9). Na taj način izvršena je optimizacija modela PD za izračunavanje srednjeg godišnjeg intenziteta erozije na istraživanom prostoru za period od 1986. do 2014. (godina uzorkovanja) godine. Istu vrstu optimizacije modela PD uradili su Ceaglio i sar. (2012) za primenu u planinskoj regiji u severozapadnoj Italiji, dolina Aoste, gde je više od 80%  $^{137}Cs$  na istraživanom prostoru černobiljskog porekla [128], gde je naglašeno da je primena modela PD u ovom slučaju najpogodnija jer je moguće pretpostaviti da je vremenski period za migracije  $^{137}Cs$  veoma kratak.

Na istraživanom prostoru male površine B srednja vrednost intenziteta erozije primenom modela PD iznosi  $-12\ t\ ha^{-1}\ god^{-1}$ , i kreće se u opsegu od 42 (akumulacija) do  $-44\ t\ ha^{-1}\ god^{-1}$  (ekscesivna erozija<sup>1</sup>). Na osnovu srednje vrednosti intenziteta erozije istraživani prostor male površine B spada u kategoriju jake ugroženosti.

Srednje vrednosti intenziteta erozije duž pojedninačnih transekata dobijene primenom modela PD prikazane su u tabeli 12. Najmanja srednja vrednost intenziteta erozije dobijena je za transekt 1 i iznosi  $-4,7\ t\ ha^{-1}\ god^{-1}$ , dok je najveća dobijena za transekt 2 i iznosi  $-25\ t\ ha^{-1}\ god^{-1}$  (tabela 12).

---

<sup>1</sup> Kategorizacija erozije izvršena je prema podeli naznačenoj u radovima Životić i sar. (2012) i Perović i sar. (2013) [142, 143]: Slaba ( $0-5\ t\ ha^{-1}\ god^{-1}$ ); Umerena ( $5-10\ t\ ha^{-1}\ god^{-1}$ ); Jaka ( $10-20\ t\ ha^{-1}\ god^{-1}$ ); Veoma jaka ( $20-40\ t\ ha^{-1}\ god^{-1}$ ); Ekscesivna ( $40-80\ t\ ha^{-1}\ god^{-1}$ ); i Veoma ekscesivna ( $>80\ t\ ha^{-1}\ god^{-1}$ )

Tabela 12. Intenziteti erozije zemljišta ( $t\ ha^{-1}\ god^{-1}$ ) na istraživanom prostoru male površine B izračunati primenom modela PD

Intenzitet erozije zemljišta ( $t\ ha^{-1}\ god^{-1}$ )	Transekt 1	Transekt 2	Transekt 3	Transekt 4	Transekt 5
Srednja vrednost	-4,7	-25	-5,9	-11	-15
Standardna devijacija	6,2	24	29	4,1	0,6
Minimum	-11	-44	-37	-15	-15
Maksimum	5,9	13	42	-6,6	-14
Kategorija erozije	Slaba	Veoma jaka	Umerena	Jaka	Jaka

Vrednosti intenziteta erozije dobijene primenom modela PD u studijama širom sveta (tabela 13) nalaze se u veoma širokom opsegu. Kao što je ranije napomenuto intenzitet erozije zavisi od velikog broja faktora, kao što su: količina i intenzitet padavina, vrsta i gustina biljnog pokrivača, nagib terene i dr. Poređenje dobijenih intenziteta erozija između različitih studija prikazanih u tabeli 13 nije sasvim relevantno zbog različitih karakteristika izučavanih terena.

Tabela 13. Intenziteti erozije zemljišta ( $t\ ha^{-1}\ god^{-1}$ ) dobijeni primenom modela PD u studijama širom sveta

Oblast	Intenzitet erozije zemljišta ( $t\ ha^{-1}\ god^{-1}$ )
Kluž, Rumunija [127]	-5,8 (od -18 do 8,3)
Zapadni Istanbul, Turska [134]	(od -16 do 4,6)
Brdo Yatağan, Turska [135]	-36 (od -3,5 do -80)
Brdo Peynirli, Turska [136]	-15
Brdo Kırtaş, Turska [136]	-27 (od 0 do -77)
Kalabriji, južna Italija [126]	(od -0,053 do -101)
Dolina Aoste, severozapadna Italija [128]	(od 13 do -32)
Sicilija, južna Italija [138]	-39 (od 16 do -110)
Jugoistočna Srbija [Ova disertacija]	-12 (od 42 do -44)

#### 4.4.4. Intenziteti erozije izračunati primenom modela DM

Intenziteti erozije zemljišta ( $t\ ha^{-1}\ god^{-1}$ ) na istraživanom prostoru male površine B izračunati su primenom modela DM (opisan u delu 3.5.2).

Za potrebe ovog modela migraciona brzina -  $V$  i difuzioni koeficijent -  $D$  izračunati su korišćenjem modifikovanih jednačina (17) i (18), gde je kao godina ukupne depozicije  $^{137}Cs$  na istraživanom prostoru uzeta 1986. umesto 1963. godine. Kako referentni profili zemljišta ne pokazuju pod-površinski maksimum aktivnosti  $^{137}Cs$ , odnosno maksimum aktivnosti  $^{137}Cs$  u oba referentna profila javlja se u površinskom sloju zemljišta 0-2 cm (slika 22), za migracionu brzinu -  $V$  pretpostavljena je vrednost  $0\ kg\ m^{-2}\ god^{-1}$ . Ova vrednost u skladu je sa jednačinom (17), ukoliko je  $V = 0\ kg\ m^{-2}\ god^{-1}$ , dubina zemljišta (izražena kao masa po jedinici površine zemljišta) sa maksimalnom aktivnošću  $^{137}Cs$  biće  $W_p = 0\ kg\ m^{-2}$ . Porto i sar. (2003) pretpostavili su istu vrednost migracione brzine s obzirom na to da u tri referentna profila zemljišta nije uočen jasan maksimum  $^{137}Cs$  u pod-površinskom sloju [86], što je u skladu sa rezultatima dobijenim u ovom radu. Dobijena vrednost za difuzioni koeficijent -  $D$  iznosi  $163\ kg^2\ m^{-4}\ god^{-1}$ . Za relaksacionu dubinu -  $H$  korišćena je vrednost od  $5,0\ kg\ m^{-2}$  preporučena od strane Walling i He (1999) [66].

Prema podacima Walling i He (1999) vrednosti difuzionog koeficijenta -  $D$  se obično nalaze u opsegu od  $20$  do  $65\ kg^2\ m^{-4}\ god^{-1}$  dok se vrednosti migracione brzine -  $V$  nalaze u opsegu od  $2$  do  $20\ kg\ m^{-2}\ god^{-1}$  [66]. Vrednosti dobijene za difuzioni koeficijent i migracionu brzinu u ovom radu, razlikuju se od prethodno prikazanih opsega zbog toga što trenutna vertikalna distribucija  $^{137}Cs$  u referentnim profilima zemljišta oslikava depoziciju koja se desila 1986. godine nakon akcidenta u Černobilju, i referentni profili zemljišta ne pokazuju maksimalne aktivnosti  $^{137}Cs$  u pod-površinskom sloju.

Za primenu modela DM u ulaznim parametrima naznačeno je da je 80% površinske aktivnosti  $^{137}Cs$  na referentnom prostoru černobiljskog porekla, jer je to maksimalna vrednost dozvoljena razvijenim programom. Kako je černobiljski  $^{137}Cs$  na istraživanom prostoru male površine B dominantan, možemo smatrati da rezultati dobijeni primenom modela DM daju procenu srednjeg godišnjeg intenziteta erozije zemljišta za period od 1986. do 2014. godine.

Na istraživanom prostoru male površine B srednja vrednost intenziteta erozije primenom modela DM iznosi  $-4,0\ t\ ha^{-1}\ god^{-1}$ , i kreće se u opsegu od 21 (akumulacija) do -13

t ha<sup>-1</sup> god<sup>-1</sup> (jaka erozija). Na osnovu dobijene srednje vrednosti intenziteta erozije istraživani prostor male površine B spada u kategoriju slabe ugroženosti.

Srednje vrednosti intenziteta erozije zemljišta duž pojedninačnih transekata dobijene primenom modela DM prikazane su u tabeli 14. Najmanja srednja vrednost intenziteta erozije dobijena je za transekt 3 i iznosi -0,62 t ha<sup>-1</sup> god<sup>-1</sup>, dok je najveća dobijena za transekt 2 i iznosi -7,5 t ha<sup>-1</sup> god<sup>-1</sup> (tabela 14).

Ispitivanjem intenziteta erozije zemljišta primenom modela DM u oblasti Kluž, Rumunija, gde 72% površinske aktivnosti <sup>137</sup>Cs izmerene na referentnom mestu ima černobiljsko poreklo, srednja vrednost intenziteta erozije za istraživani prostor iznosila je -6,6 t ha<sup>-1</sup> god<sup>-1</sup> [118].

Tabela 14. Intenziteti erozije zemljišta (t ha<sup>-1</sup> god<sup>-1</sup>) na istraživanom prostoru male površine B izračunati primenom modela DM

Intenzitet erozije zemljišta (t ha <sup>-1</sup> god <sup>-1</sup> )	Transekt 1	Transekt 2	Transekt 3	Transekt 4	Transekt 5
Srednja vrednost	-1,9	-7,5	-0,62	-4,3	-5,8
Standardna devijacija	2,7	8,6	12	1,6	0,28
Minimum	-4,6	-13	-12	-5,9	-6,0
Maksimum	2,8	6,9	21	-2,8	-5,6
Kategorija erozije	Slaba	Umerena	Slaba	Slaba	Umerena

#### 4.4.5. Intenziteti erozije izračunati primenom modela MODERN

Intenziteti erozije zemljišta (t ha<sup>-1</sup> god<sup>-1</sup>) na istraživanom prostoru male površine B izračunati su primenom modela MODERN (opisan u delu 3.5.3).

Referentni profili zemljišta uzorkovani su do 25 cm dubine po slojevima od po 2 cm do 20 cm dubine, nakon čega je dubina uzorkovanog sloja povećana na 2,5 cm. Kako model MODERN za referentni profil dozvoljava unošenje samo jednog/ujednačenog sloja, prilikom primene modela za izračunavanje intenziteta erozije zemljišta upoređivane su površinske aktivnosti <sup>137</sup>Cs između referentnih profila i lokacija uzorkovanja do 20 cm dubine, korišćenjem vrednosti površinske aktivnosti <sup>137</sup>Cs za referentne profile i lokacija uzorkovanja do naznačene dubine. Srednja vrednost površinske aktivnosti <sup>137</sup>Cs za dva referentna profila po slojevima korišćena je prilikom primene modela. Primenom modela MODERN izračunat



je srednji godišnji intenzitet erozije na istraživanom prostoru male površine B za period od 1986. do 2014. godine (jednačina 22).

Kao što je već ranije pomenuto model MODERN dozvoljava modelovanje jednog ili više mogućih scenarija akumulacije. U zavisnosti od razmatranog scenarija, model MODERN dodaje jedan ili više slojeva na vrh referentnog vertikalnog profila pri čemu je moguće definisati površinsku aktivnost radionuklida za svaki simulirani sloj.

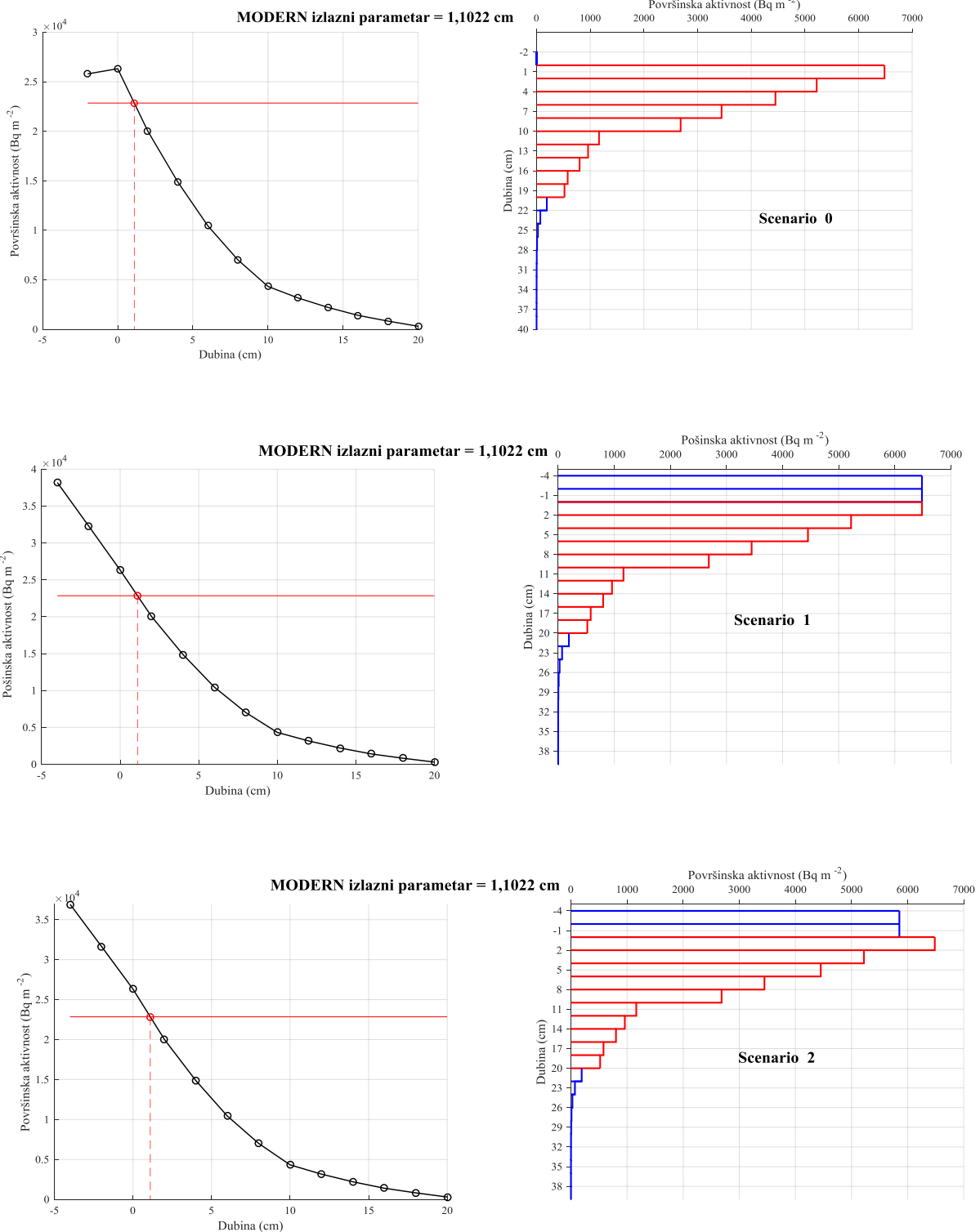
Arata i sar. (2016) su pokazali da na lokacijama na kojima je došlo do erozije zemljišta tj. na lokacijama na kojima je vrednost površinske aktivnosti radionuklida manja u odnosu na referentno mesto, model MODERN daje podatke o debljini odnetog (erodovanog) zemljišta nezavisno od pretpostavljenog scenarija [67].

Na slici 24 prikazan je uticaj različitih scenarija na dobijenu vrednost debljine odnetog (erodovanog) zemljišta na lokaciji 1 na kojoj je došlo do erozije zemljišta, tj. gde je površinska aktivnost  $^{137}\text{Cs}$  niža od vrednosti dobijene za referentni prostor. U slučaju scenarija 0 nije simuliran proces akumulacije (slika 24). U slučaju scenarija 1 pretpostavljeno je da akumulirani materijal potiče od slojeva zemljišta (prvih 2 cm) erodovanih sa površina na padini iznad lokacija uzorkovanja, zbog čega je zadato da je površinska aktivnost  $^{137}\text{Cs}$  modelovanih dodatih slojeva zemljišta jednaka površinskoj aktivnosti u prvih 2 cm referentnog profila (slika 24). U slučaju scenarija 2 pretpostavljeno je da akumulirani materijal potiče iz erodovanog sloja od 4 cm, koji je homogeno izmešan usled odvajanja i transporta, zbog čega je površinska aktivnost dodatih slojeva jednaka je prosečnoj površinskoj aktivnosti u prvih 4 cm referentnog profila (slika 24).

Dobijeni rezultati pokazuju da u slučaju lokacija na kojima je došlo do erozije zemljišta model MODERN procenjuje debljinu odnetog (erodovanog) zemljišta nezavisno od pretpostavljenog scenarija akumulacije, što je u skladu sa radom Arata et al. (2016) [67].

Integralna f-ja  $S(x)=F(\text{dubina upoređivanja})-F(x)$   
 (dubina upoređivanja=20 cm)

Referentni profil



Slika 24. Primer uticaja različitih scenarija na procenjenu debljinu odnetog (erodovanog) zemljišta primenom modela MODERN za lokaciju 1

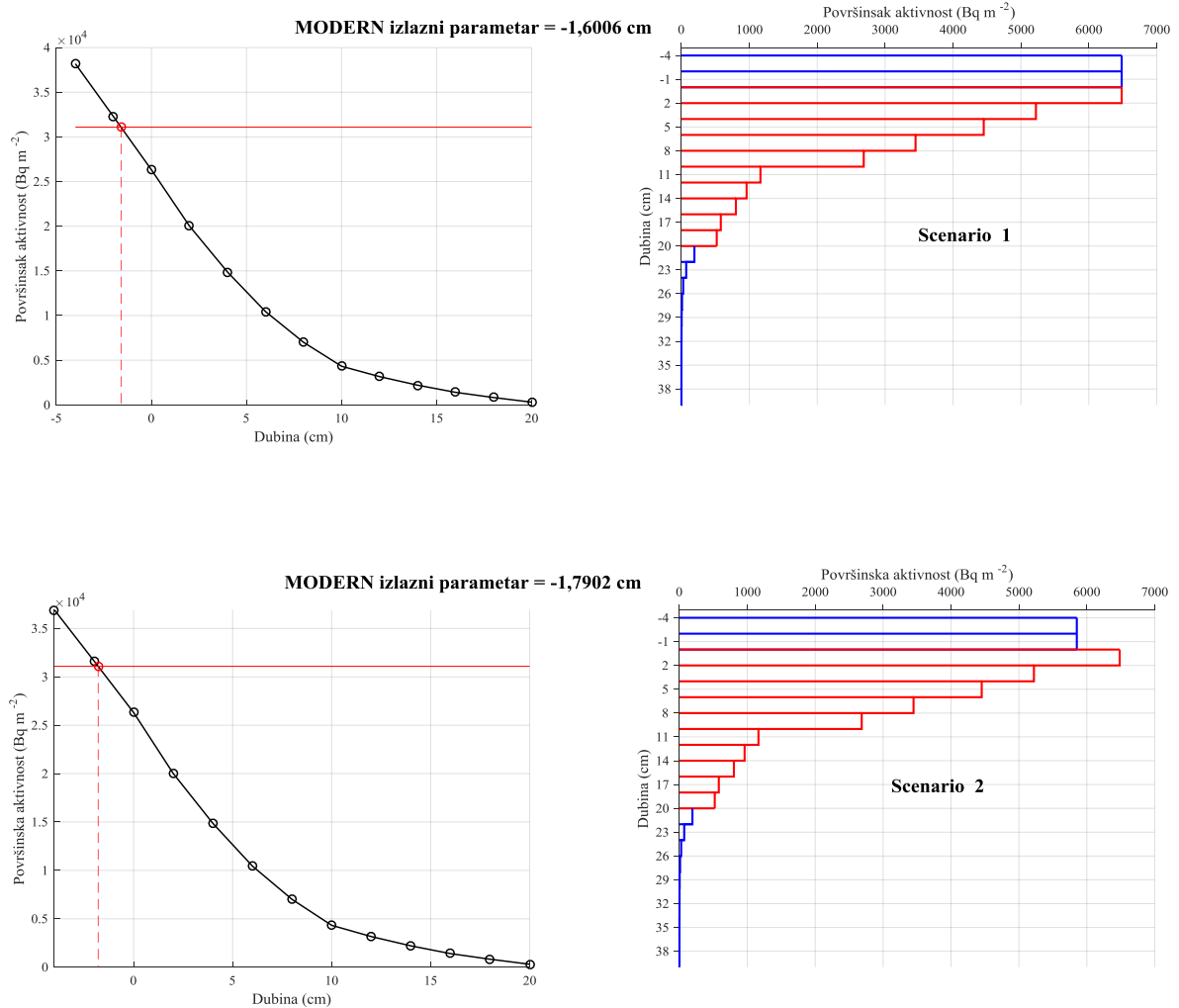
Za lokacije na kojima je došlo do donošenja (akumulacije) zemljišta tj. na lokacijama gde je vrednost površinske aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  veća u odnosu na referentno mesto, model MODERN daje podatke o debljini donetog (akumuliranog) zemljišta zavisno od pretpostavljenog scenarija [67].

Na istraživanom prostoru male površine B na lokacijama 3, 10, 12 i 14 (slika 8) vrednosti površinske aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  veće su u odnosu na referentno mesto, što ukazuje da je na naznačenim lokacijama došlo do akumulacije zemljišta. U skladu sa tim predstavljeni su različiti scenariji za svaku lokaciju na kojoj je došlo do akumulacije zemljišta (slike 25, 26, 27 i 28), odakle se može primetiti da model MODERN daje podatke o debljini donetog (akumuliranog) zemljišta zavisno od pretpostavljenog scenarija, što je u skladu sa radom Arata et al. (2016) [67].

U slučaju lokacije 10 (slika 26) scenario 2 ne daje moguće rešenje, u takvim slučajevim po preporuci Arata i sar. (2016) [67] u razmatranje se uzima drugačiji scenario, što je u ovakvom slučaju i urađeno razmatranjem scenarija 3 gde je površinska aktivnost  $^{137}\text{Cs}$  u tri simulirana sloja jednaka srednjoj vrednosti površinske aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  u prva dva sloja referentnog profila. Takođe, i su slučaju lokacije 14 ranije primenjivani scenariji nisu davali rešenje, i u tom slučaju razmatrani su prikazani scenariji 4 i 5 (slika 28). Intenziteti erozije zemljišta ( $\text{t ha}^{-1} \text{ god}^{-1}$ ) za lokacije na kojima je došlo do akumulacije zemljišta izračunati su za svaki pretpostavljeni scenario.

Integralna f-ja  $S(x)=F(\text{dubina upoređivanja})-F(x)$   
 (dubina upoređivanja=20 cm)

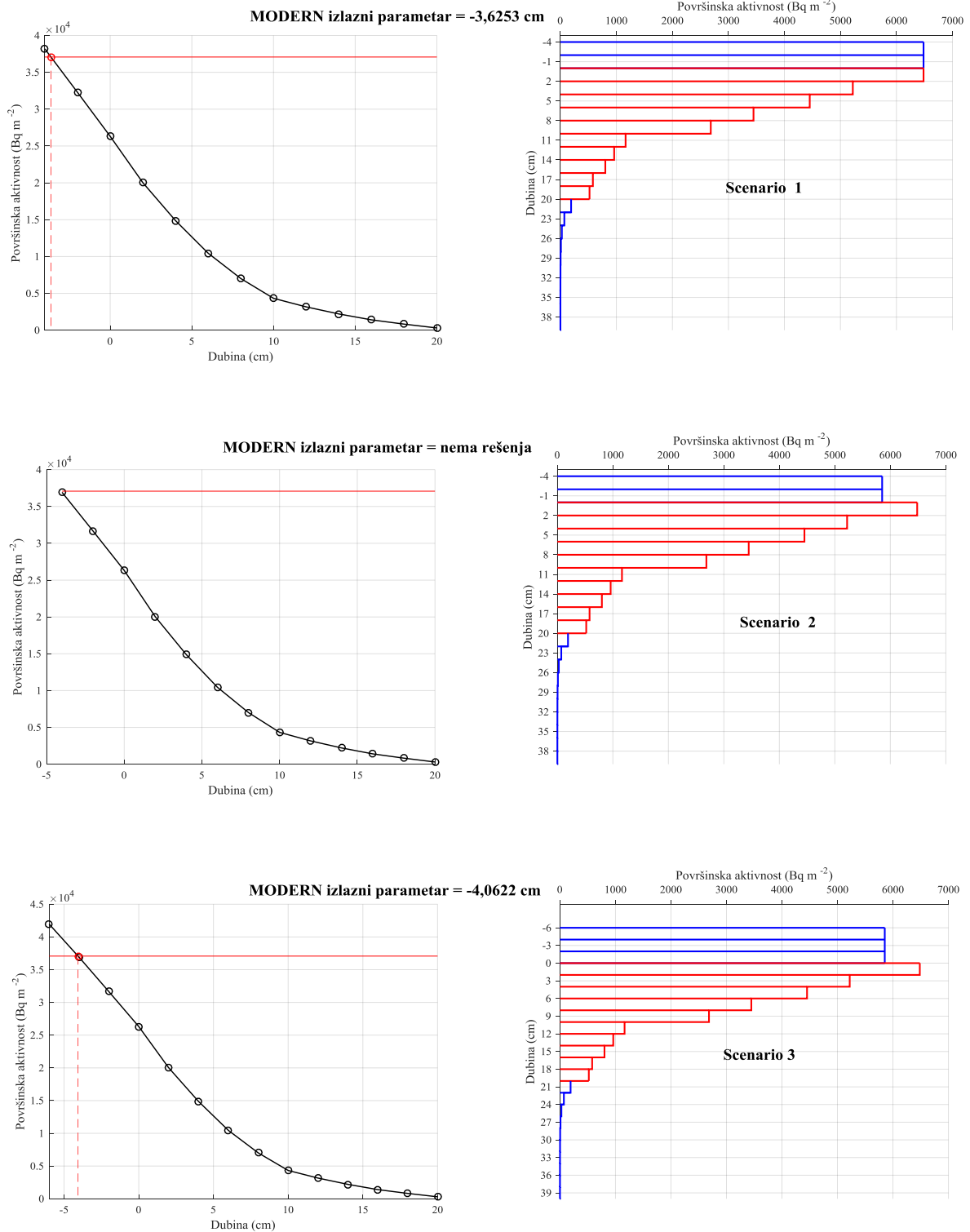
Referentni profil



Slika 25. Primer uticaja različitih scenarija na procenjenju debljinu donetog (akumuliranog) zemljišta primenom modela MODERN za lokaciju 3

Integralna f-ja  $S(x)=F(\text{dubina upoređivanja})-F(x)$   
 (dubina upoređivanja=20 cm)

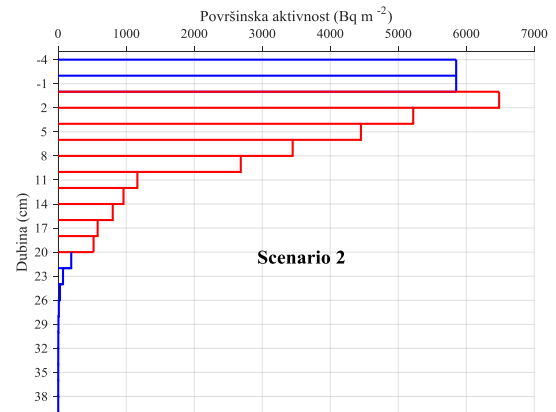
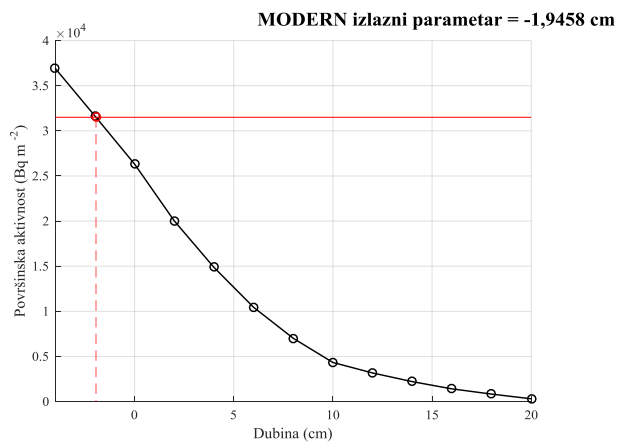
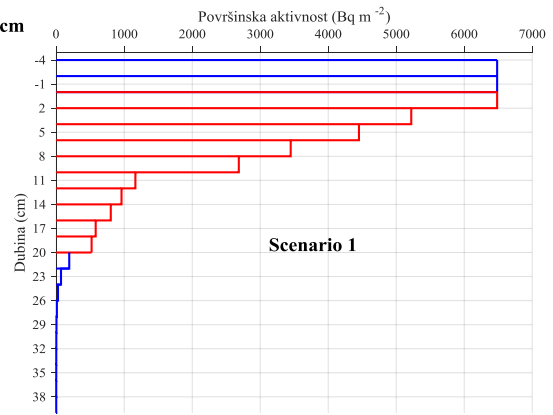
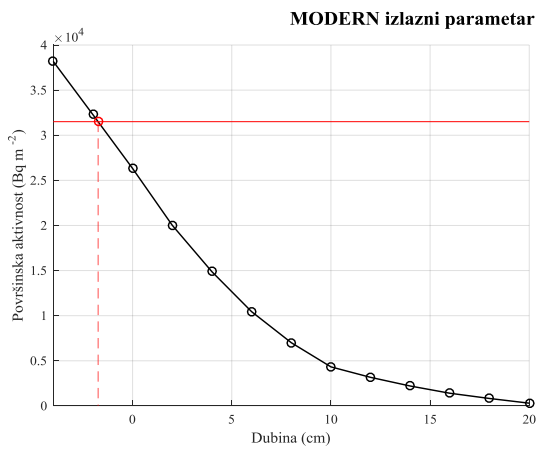
Referentni profil



Slika 26. Primer uticaja različitih scenarija na procenjenu debljinu donetog (akumuliranog) zemljišta primenom modela MODERN za lokaciju 10

Integralna f-ja  $S(x)=F(\text{dubina upoređivanja})-F(x)$   
 (dubina upoređivanja=20 cm)

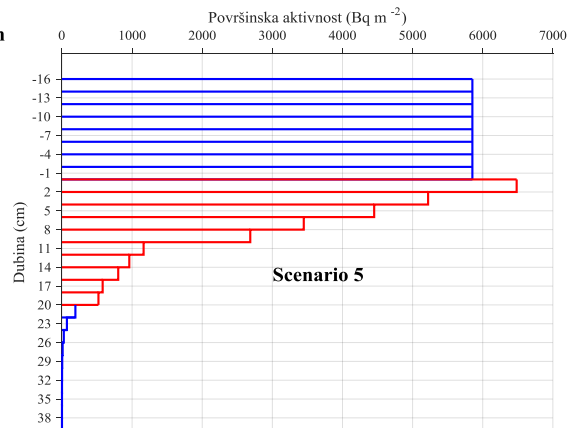
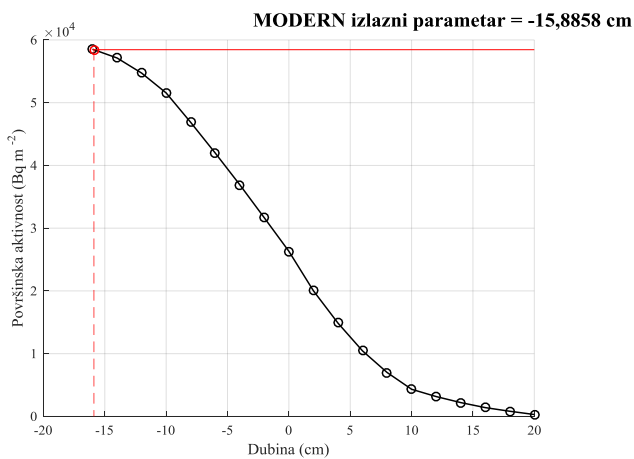
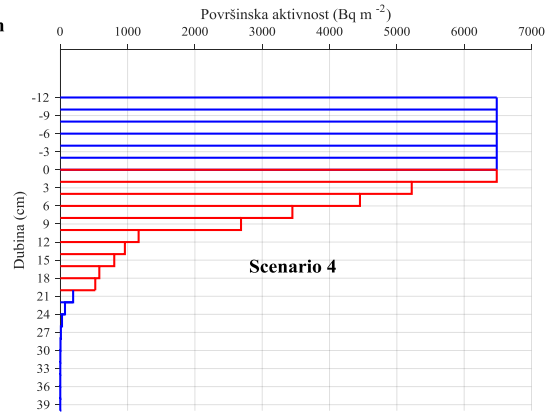
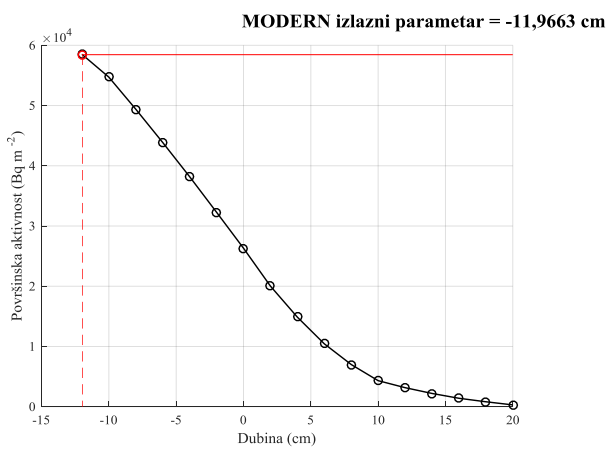
Referentni profil



Slika 27. Primer uticaja različitih scenarija na procenjenju debljinu donetog (akumuliranog) zemljišta primenom modela MODERN za lokaciju 12

Integralna f-ja  $S(x)=F(\text{dubina upoređivanja})-F(x)$   
 (dubina upoređivanja=20 cm)

Referentni profil



Slika 28. Primer uticaja različitih scenarija na procenjenu debljinu donetog (akumuliranog) zemljišta primenom modela MODERN za lokaciju 14

Na istraživanom prostoru male površine B srednja vrednost intenziteta erozije primenom modela MODERN iznosi  $-11 \text{ t ha}^{-1} \text{ god}^{-1}$ , i kreće se od 74 (akumulacija) do  $-50 \text{ t ha}^{-1} \text{ god}^{-1}$  (ekscesivna erozija). Na osnovu dobijene srednje vrednosti intenziteta erozije istraživani prostor male površine B spada u kategoriju jake ugroženosti.

Srednje vrednosti intenziteta erozije duž pojedinačne transekata dobijene primenom modela MODERN prikazane su u tabeli 15. Najmanja srednja vrednost intenziteta erozije dobijena je za transekt 3 i iznosi  $0,24 \text{ t ha}^{-1} \text{ god}^{-1}$ , što ukazuje na akumulaciju zemljišta, dok je najveća dobijena za transekt 2 i iznosi  $-25 \text{ t ha}^{-1} \text{ god}^{-1}$  (tabela 15).

Tabela 15. Intenziteti erozije zemljišta ( $\text{t ha}^{-1} \text{ god}^{-1}$ ) na istraživanom prostoru male površine B izračunati primenom modela MODERN

Intenzitet erozije zemljišta ( $\text{t ha}^{-1} \text{ god}^{-1}$ )	Transekt 1	Transekt 2	Transekt 3	Transekt 4	Transekt 5
Srednja vrednost	-4,9	-25	0,24	-11	-15
Standardna devijacija	7,4	28	40	4,5	0,42
Minimum	-12	-50	-38	-16	-15
Maksimum	8,4 <sup>1</sup>	19	74	-7,2	-15
Kategorija erozije	Slaba	Veoma jaka	Akumulacija	Jaka	Jaka

#### 4.4.6. Poređenje intenziteta erozije zemljišta primenom modela PD, DM i MODERN

Na slici 29 prikazani grafici pokazuju intenzitete erozije ( $\text{t ha}^{-1} \text{ god}^{-1}$ ) dobijene primenom modela PD, DM i MODERN za pojedinačne lokacije uzorkovane duž transekata na istraživanom prostoru male površine B.

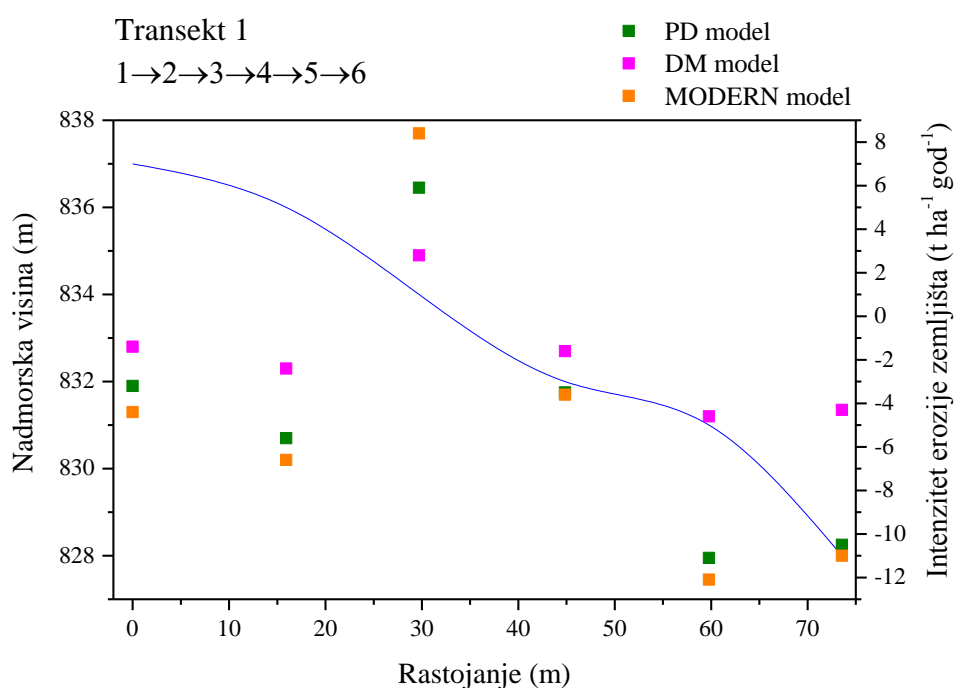
Rezultati dobijeni primenom različitih modela za izračunavanje intenziteta erozije zemljišta na istraživanom prostoru B, ukazuju na akumulaciju odnosno eroziju na istim lokacijama duž proučavanih transekata nezavisno od primenjenog modela (slika 29a-c) ali vrednosti dobijenih intenziteta erozije ( $\text{t ha}^{-1} \text{ god}^{-1}$ ) na proučavanim lokacijama zavise od primenjenog modela.

Intenziteti erozije (slika 29a-c) pokazuju nekoliko obrazaca u odnosu na lokalnu topografiju terena. U nekim slučajevima akumulacija zemljišta se javlja na mestima gde se ugao nagiba smanjuje, ali u nekim slučajevima nije određena topografijom terena. Ovakvo ponašanje je verovatno posledica prisustva prirodnih pašnjaka i pratećih lokalnih varijacija u gustini travnatog pokrivača i aktivnosti zemljišne faune. Pored toga, povremeno prisustvo zimzelenog žbunja i varijacije malih razmera u osobinama zemljišta mogu da izazovu lokalnu varijabilnost u intenzitetu erozije zemljišta.

<sup>1</sup> Prikazane su srednje vrednosti intenziteta erozije dobijene primenom različitih akumulacionih scenarija za lokacije na kojima je došlo do akumulacije zemljišta.

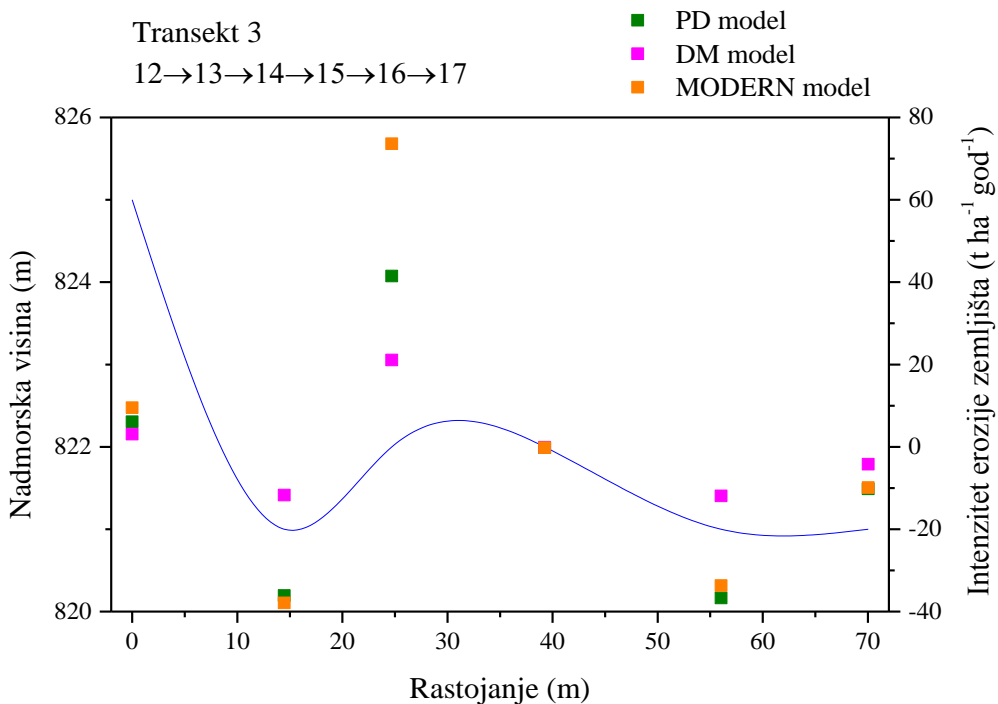
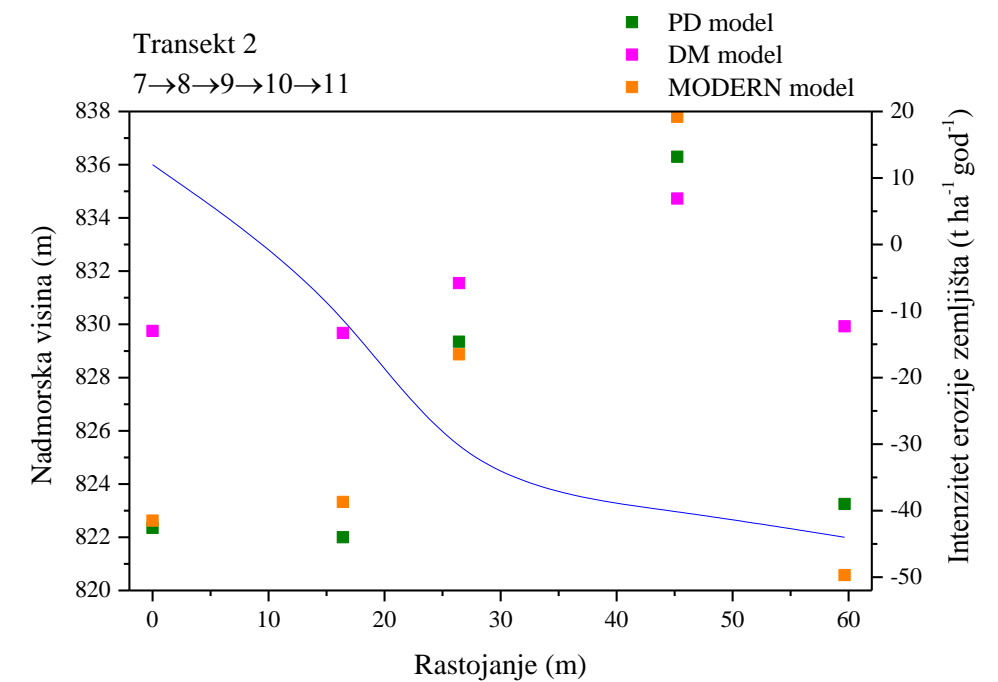


Porto i sar. (2001) su ukazali na veoma blisku vezu između intenziteta erozije zemljišta i varijacija u gustini vegetacionog pokrivača u malom pošumljenom drenažnom basenu u Kalabriji, južna Italija [126]. Iurian i sar. (2012) takođe su ukazali da trajni vegetacioni pokrivač može bitno uticati na vrednosti intenziteta erozije zemljišta [127]. Saç i sar. (2008) utvrdili su niže vrednosti intenziteta erozije na prostoru sa homogenim vegetacionim pokrivačem [136].

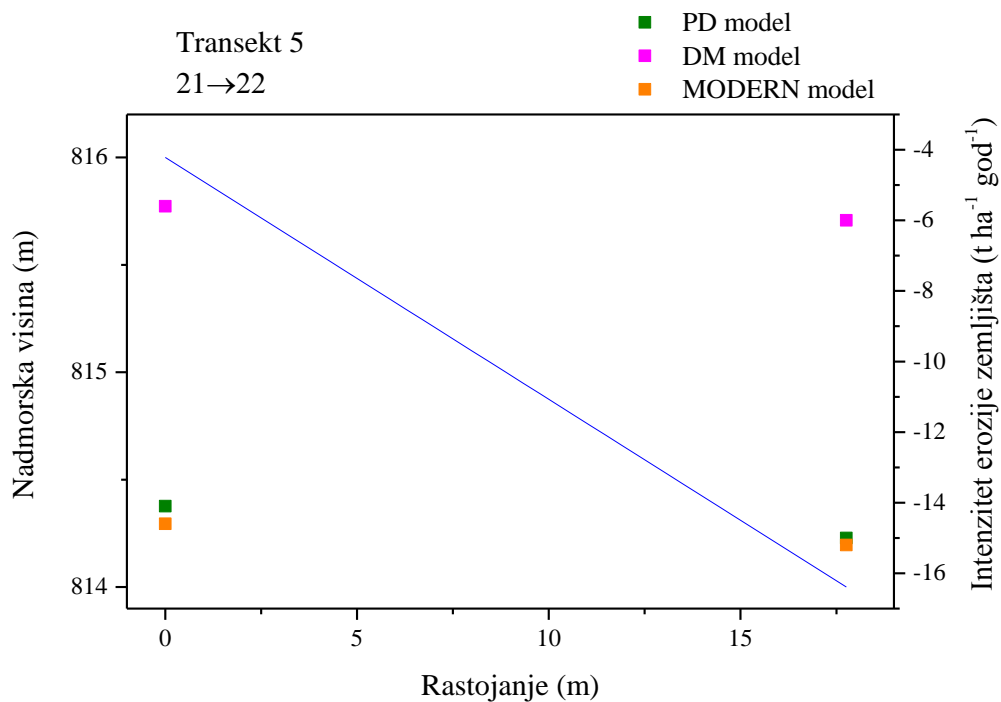
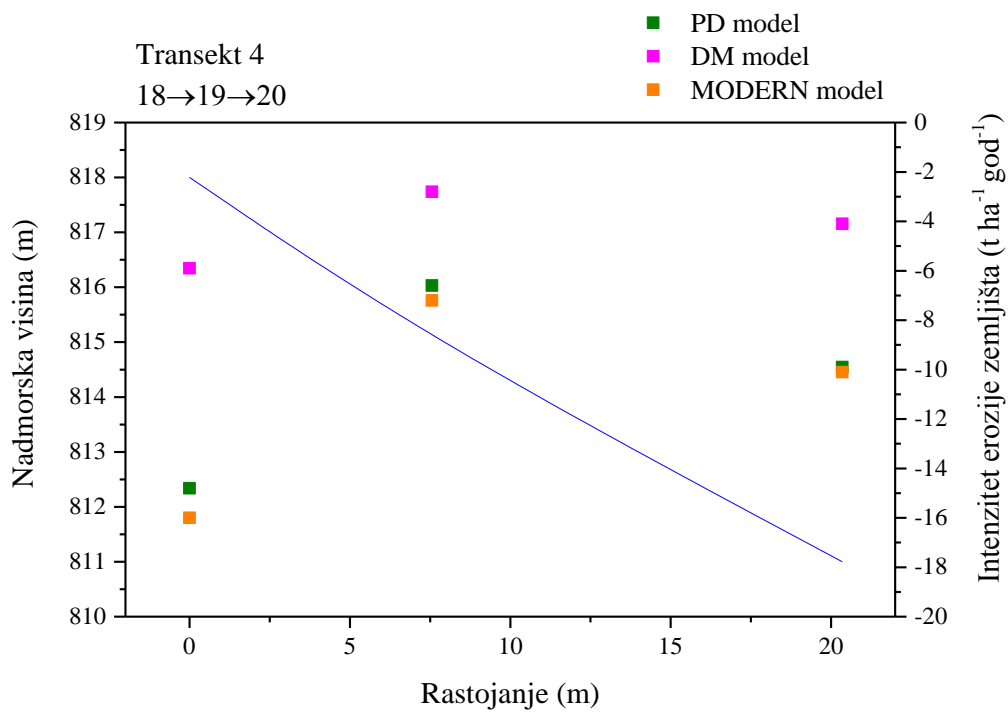


Slika 29a. Intenzitet erozije ( $t\ ha^{-1}\ god^{-1}$ ) duž transektta 1 na istraživanom prostoru male površine B izračunat primenom modela PD, DM i MODERN<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Rastojanje (x osa) predstavlja razmak (m) između tačaka (lokacija) uzorkovanih duž padine (transektta). Nadmorska visina (Y osa - levo) prikazana je plavom linijom u okviru slike i prikazuje promenu nadmorske visine duž padine (transektta) tj. profil terena. Intenzitet erozije zemljišta (Y osa - desno) prikazan je za svaku pojedinačnu tačku (lokaciju) kvadratićem različite boje (koje se odnose na primenjene modele prikazane u gornjem desnom uglu slike) u okviru slike.



Slika 29b. Intenzitet erozije ( $t\ ha^{-1}\ god^{-1}$ ) duž transekata 2 i 3 na istraživanom prostoru male površine B izračunat primenom modela PD, DM i MODERN



Slika 29c. Intenzitet erozije ( $t\ ha^{-1}\ god^{-1}$ ) duž transekt 4 i 5 na istraživanom prostoru male površine B izračunat primenom modela PD, DM i MODERN

Poređenjem vrednosti intenziteta erozije dobijene primenom različitih modela na istraživanom prostoru može se uočiti da su vrednosti intenziteta erozije zemljišta dobijene primenom modela MODERN slične vrednostima dobijenim primenom modela PD, što je u skladu sa rezultatima Arata i sar. (2016) [67]. Vrednosti intenziteta erozije zemljišta dobijene primenom modela DM niže su od vrednosti dobijene primenom modela PD i MODERN. Mabit i sar. (2008) kao i Walling i sar. (2006) naznačili su da model DM daje pouzdanije vrednosti intenziteta erozije zemljišta u odnosu na PD model [18, 26]. Porto i sar. (2003) ispitivanjem intenziteta zemljišta u dva mala sliva (1,38 i 1,65 ha) u Kalabriji, južna Italija, ukazali su da model PD daje pouzdanije rezultate u slivovima sa većim intenzitetom erozije, dok model DM daje bolje rezultate u slivovima gde je intenzitet erozije manji [86].

#### **4.4.7. Intenziteti erozije procenjeni primenom tradicionalnog modela USLE**

Model USLE se koristi za predviđanje gubitka zemljišta usled brazdaste i površinske erozije uzrokovane padavinama. Intenzitet erozije zemljišta ( $t\ ha^{-1}\ god^{-1}$ ) na istraživanom prostoru male površine B izračunat je primenom modela USLE (jednačina 23).

Faktor erozije snage kiše  $R$  (jednačina 24) izračunat je korišćenjem podataka o prosečnoj godišnjoj količini padavina za period od 1991. do 2014. godine iz Meteorološkog godišnjaka, Republičkog hidrometeorološkog zavoda Srbije, za dve klimatološke stanice Bujanovac i Trgovište koje su najbliže istraživanom prostoru [72]. Vrednost faktora erozije snage kiše  $R$  za istraživani prostor iznosi  $827\ MJ\ mm\ ha^{-1}\ h^{-1}\ god^{-1}$ . Srednja vrednost faktora  $R$  za zemlje Evropske unije uključujući i Švajcarsku iznosi  $722\ MJ\ mm\ ha^{-1}\ h^{-1}\ god^{-1}$ , vrednosti  $>1000\ MJ\ mm\ ha^{-1}\ h^{-1}\ god^{-1}$  dobijene su u Austriji, Švajcarskoj, Hrvatskoj, Italiji, Malti i Sloveniji, dok su vrednosti  $<500\ MJ\ mm\ ha^{-1}\ h^{-1}\ god^{-1}$  dobijene u Danskoj, Estoniji, Finskoj, Litvaniji, Letoniji, Holandiji i Švedskoj [139].

Faktor erodibilnosti zemljišta  $K$  (jednačina 25) za istraživani prostor male površine B kreće se od 0,04 do 0,05  $t\ ha\ h\ ha^{-1}\ MJ^{-1}\ mm^{-1}$ , dok srednja vrednost iznosi  $0,04\ t\ ha\ h\ ha^{-1}\ MJ^{-1}\ mm^{-1}$ . Srednja vrednost faktora  $K$  za zemlje Evropske unije iznosi  $0,032\ t\ ha\ h\ ha^{-1}\ MJ^{-1}\ mm^{-1}$ , i kreće se u opsegu od 0,004 do 0,076  $t\ ha\ h\ ha^{-1}\ MJ^{-1}\ mm^{-1}$  [93].

Topografski  $LS$  faktor (jednačina 26) kreće se od 6,4 za transekt 2 do 1,5 za transekt 3, dok srednja vrednost za istraživani prostor male površine B iznosi 3,7. Srednja vrednost topografskog  $LS$  faktora za zemlje Evropske unije iznosi 1,63 (opseg: od 0 do 99), vrednost

*LS* faktora veća od 25 nađena je na 0,1% ukupne teritorije Evropske Unije, pre svega u Austriji, Grčkoj, Italiji i Sloveniji [140].

Za faktor biljnog pokrivača *C* na istraživanom prostoru male površine *B* korišćena je vrednost za prirodne travnate površine (0,0435) preuzeta iz rada Panagos et al. (2015) [88]. Srednja vrednost faktora biljnog pokrivača *C* za zemlje Evropske unije iznosi 0,1043, pri čemu je naznačen veoma širok opseg vrednosti [88]. Šume imaju najmanju vrednost faktora biljnog pokrivača, 0,00116, dok najviše vrednosti faktora biljnog pokrivača imaju oranična područja kao i područja pokrivena oskudnom vegetacijom 0,233 i 0,2651, redom [88].

Kako na istraživanom prostoru male površine *B* ne postoje mere zaštite zemljišta za faktor protiverozivnih mera *P* za istraživani prostor pretpostavljena je vrednost 1. Srednja vrednost faktora protiverozivnih mera *P* za zemlje Evropske unije iznosi 0,9702 [141].

Srednja vrednost intenziteta erozije zemljišta na istraživanom prostoru male površine *B* primenom modela USLE iznosi  $-5,8 \text{ t ha}^{-1} \text{ god}^{-1}$ . Intenziteti erozije dobijeni za pojedinačne transekte 1, 2, 3, 4, i 5 iznose  $-3,3$ ;  $-9,2$ ;  $-2,2$ ;  $-7,3$ ; i  $-7,2 \text{ t ha}^{-1} \text{ god}^{-1}$ , redom. Najveća vrednost intenziteta erozije dobijena je za transekt 2, a najmanja za transekt 3, što je u skadu sa vrednostima dobijenim primenom modela DM i MODERN.

Poređenjem srednje vrednosti intenziteta erozije dobijene primenom modela USLE na istraživanom prostoru male površine *B*, može se videti da su vrednosti veoma bliske srednjim vrednostima dobijenim primenom tri prethodno prikazana modela (PD, DM i MODERN) na istraživanom prostoru male površine *B*.

Model USLE korišćen je za procenu intenziteta vodne erozije u Srbiji [91, 142, 143]. Životić i sar. (2012) su istraživanjem intenziteta erozije u brdsko-planinskom slivu reke Nišave, jugoistočna Srbija, pokazali da prosečan godišnji gubitak zemljišta za ceo istraživani prostor iznosi  $13,1 \text{ t ha}^{-1} \text{ god}^{-1}$  [142]. Na 44,1% istraživanog prostora utvrdili su prosečan godišnji gubitak zemljišta  $<5 \text{ t ha}^{-1} \text{ god}^{-1}$ , dok su na 5,9% istraživanog prostora ( $168 \text{ km}^2$ ) našli prosečan godišnji gubitak zemljišta od 40 do  $80 \text{ t ha}^{-1} \text{ god}^{-1}$ , i na 1,3% istraživanog prostora ( $35,9 \text{ km}^2$ ) našli su prosečan godišnji gubitak zemljišta veći od  $80 \text{ t ha}^{-1} \text{ god}^{-1}$  [142]. Najviše vrednosti prosečnog godišnjeg gubitka zemljišta utvrđene su na obrađivanim kosim terenima [142]. Perović i sar. (2013) našli su nešto veću vrednost prosečnog godišnjeg gubitka zemljišta od  $27 \text{ t ha}^{-1} \text{ god}^{-1}$  u slivu reke Nišave, jugoistočna Srbija, u odnosu na prethodnu studiju Životić i sar. (2012) sprovedenu na istom prostoru [142, 143]. Perović i sar. (2016) ispitali su intenzitet erozije zemljišta na teritoriji opštine grada Niša, korišćenjem

USLE metoda i GIS-a [91]. Prosečan godišnji gubitak zemljišta izazvan vodnom erozijom na njihovom istraživanom prostoru iznosi  $8,48 \text{ t ha}^{-1} \text{ god}^{-1}$ , pri čemu je najveći prosečan godišnji gubitak zemljišta od  $>40 \text{ t ha}^{-1} \text{ god}^{-1}$  utvrđen na  $23,37 \text{ km}^2$  istraživanog prostora, dok je na  $466,63 \text{ km}^2$  istraživanog prostora nađen veoma slab ( $0\text{-}3 \text{ t ha}^{-1} \text{ god}^{-1}$ ) i slab intenzitet erozije zemljišta ( $3,1\text{-}10 \text{ t ha}^{-1} \text{ god}^{-1}$ ) [91].

Korišćenjem modifikovane verzije modela RUSLE (RUSLE2015) za ispitivanje vodne erozije (površinske i brazdaste erozije) Panagos i sar. (2015) su izradili kartu intenziteta vodne erozije za zemlje Evropske unije za referentnu 2010. godinu [144]. Prosečan godišnji gubitak zemljišta pod dejstvom vodne erozije za zemlje Evropske unije iznosi  $2,46 \text{ t ha}^{-1} \text{ god}^{-1}$ , što dovodi do ukupnog gubitka zemljišta od 970 Mt godišnje. Najviši prosečni godišnji gubici zemljišta (na nivou države) nađeni su u Italiji ( $8,46 \text{ t ha}^{-1}$ ), Sloveniji ( $7,43 \text{ t ha}^{-1}$ ) i u Austriji ( $7,19 \text{ t ha}^{-1}$ ), dok su najniži prosečni godišnji gubici zemljišta (na nivou države) nađeni u Finskoj ( $0,06 \text{ t ha}^{-1}$ ), Estoniji ( $0,21 \text{ t ha}^{-1}$ ) i u Holandiji ( $0,27 \text{ t ha}^{-1}$ ) [144]. Prema karti erozije Evropske unije [144] 75,8% ispitivanog prostora ima prosečan godišnji gubitak zemljišta  $<2 \text{ t ha}^{-1} \text{ god}^{-1}$ , dok svega 0,4% ispitivanog prostora ima prosečan godišnji gubitak zemljišta  $>50 \text{ t ha}^{-1} \text{ god}^{-1}$ .

## 5. ZAKLJUČAK

Analizirana je vertikalna distribucija  $^{137}\text{Cs}$  u 44 profila neobrađivanog zemljišta (ukupno 264 uzoraka) sakupljenog sa prostora jugoistočne Srbije, u dolini reka Pčinje i Južna Morave, u periodu od 2013. do 2015. godine i fizičkohemijских karakteristika zemljišta.

- Ispitivanjem vertikalne distribucije specifičnih aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  u neobrađivanim zemljišnim profilima sa istraživanih prostora A i B, uočeno je opadanje vrednosti specifičnih aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  sa dubinom zemljišta. Na istraživanom prostoru A i B približno 66% odnosno 78%, od ukupne specifične aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  nađeno je u površinskom sloju zemljišta do 10 cm dubine.
- Prema teksturnoj klasifikaciji USDA 62% od ukupnog broja analiziranih uzoraka na istraživanom prostoru A+B po teksturi pripada peskovitoj ilovači, 17% pripada ilovači, 14 % pripada ilovastom pesku, 4% praškastoj ilovači, 2% glinastoj ilovači i 1% pripada praškasto-glinastoj ilovači.
- Ispitivanjem vertikalne distribucije fizičkohemijских karakteristika zemljišta uočena je relativno ujednačena distribucija mehaničkih frakcija zemljišta. Sadržaj humusa opada sa dubinom zemljišta. Ukupni kapacitet izmene katjona - CEC i pH vrednost zemljišta pokazuju blagi porast ispod 25 cm dubine profila na istraživanom prostoru A, dok je veći sadržaj karbonata -  $\text{CaCO}_3$  utvrđen u zemljištu do 25 cm dubine na istraživanom prostoru A. Na istraživanom prostoru B uočeno je smanjenje vrednosti specifične električne provodljivosti - K sa dubinom zemljišta.

Primenom Spirmanovog koeficijenta korelacije rangova određene su međusobne korelacije između specifičnih aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  i vrednosti ispitivanih fizičkohemijских karakteristika zemljišta.

- Na istraživanom prostoru A+B pozitivne korelacije dobijene su između  $^{137}\text{Cs}$  i sledećih fizičkohemijских karakteristika zemljišta: krupnog peska, sitnog peska i humusa; dok su negativne korelacije dobijene između  $^{137}\text{Cs}$  i sledećih fizičkohemijских karakteristika zemljišta: praha, gline, CEC-a,  $\text{CaCO}_3$  i pH. Na istraživanom prostoru A pozitivne korelacije dobijene su između  $^{137}\text{Cs}$  i sledećih fizičkohemijских karakteristika zemljišta: sitnog peska i humusa; dok je negativna

korelacija dobijena između  $^{137}\text{Cs}$  i gline. Na istraživanom prostoru B pozitivne korelacije dobijene su između  $^{137}\text{Cs}$  i sledećih fizičko-hemijskih karakteristika zemljišta: humusa i specifične električne provodljivosti - K; dok je negativna korelacija dobijena između  $^{137}\text{Cs}$  i pH vrednosti zemljišta.

Ispitivanje intenziteta erozije zemljišta korišćenjem radioizotopa  $^{137}\text{Cs}$  sprovedeno je na istraživanom prostoru male površine B. Intenzitet erozije izračunat je korišćenjem optimizovanih modela PD, DM, u kojima je 1986. godina naznačena kao godina depozicije  $^{137}\text{Cs}$  na istraživanom prostoru. Takođe je primenjen i model MODERN za izračunavanje srednjeg godišnjeg intenziteta erozije zemljišta ( $\text{t ha}^{-1} \text{ god}^{-1}$ ) za period od 1986. do 2014. godine. Intenziteta erozije zemljišta izračunat je i primenom modela USLE.

- Ispitivani profili zemljišta sa referentnog prostora pokazuju veoma sličnu dubinsku distribuciju, specifična aktivnost  $^{137}\text{Cs}$  opada sa dubinom zemljišta sa maksimumom aktivnosti u površinskom sloju (0-2 cm), u sloju do 10 cm nalazi se oko 80% ukupne aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  ( $\text{Bq kg}^{-1}$ ). Vrednost lokalne referentne površinske aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  za istraživani prostor B iznosila je  $27 \pm 5 \text{ kBq m}^{-2}$ , dok je koeficijent varijacije iznosio 16,7%.
- U najvećem broju ispitivanih profila zemljišta sa istraživanog prostora male površine B specifična aktivnost  $^{137}\text{Cs}$  opada sa dubinom zemljišta. Srednja vrednost površinske aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  za istraživani prostor male površine B iznosila je  $22 \text{ kBq m}^{-2}$ , i kretala se od  $16 \text{ kBq m}^{-2}$  za transekt 2 do  $26 \text{ kBq m}^{-2}$  za transekt 3.
- Primenom modela PD srednja vrednost intenziteta erozije na istraživanom prostoru iznosila je  $-12 \text{ t ha}^{-1} \text{ god}^{-1}$  (jaka erozija) i kretala se od 42 (akumulacija) do  $-44$  (ekscesivna erozija)  $\text{t ha}^{-1} \text{ god}^{-1}$ . Srednje vrednosti intenziteta erozije po transektima iznosile su: (1)  $-4,7 \text{ t ha}^{-1} \text{ god}^{-1}$  → (3)  $-5,9 \text{ t ha}^{-1} \text{ god}^{-1}$  → (4)  $-11 \text{ t ha}^{-1} \text{ god}^{-1}$  → (5)  $-15 \text{ t ha}^{-1} \text{ god}^{-1}$  → (2)  $-25 \text{ t ha}^{-1} \text{ god}^{-1}$ .
- Primenom modela DM srednja vrednost intenziteta erozije na istraživanom prostoru iznosila je  $-4,0 \text{ t ha}^{-1} \text{ god}^{-1}$  (slaba erozija) i kretala se od 21 (akumulacija) do  $-13$  (jaka erozija)  $\text{t ha}^{-1} \text{ god}^{-1}$ . Srednje vrednosti intenziteta erozije po transektima iznosile su: (3)  $-0,62 \text{ t ha}^{-1} \text{ god}^{-1}$  → (1)  $-1,9 \text{ t ha}^{-1} \text{ god}^{-1}$  → (4)  $-4,3 \text{ t ha}^{-1} \text{ god}^{-1}$  → (5)  $-5,8 \text{ t ha}^{-1} \text{ god}^{-1}$  → (2)  $-7,5 \text{ t ha}^{-1} \text{ god}^{-1}$ .



- Primenom modela MODERN srednja vrednost intenziteta erozije na istraživanom prostoru iznosila je  $-11 \text{ t ha}^{-1} \text{ god}^{-1}$  (jaka erozija) i kretala se od 74 (akumulacija) do  $-50$  (ekscesivna erozija)  $\text{t ha}^{-1} \text{ god}^{-1}$ . Srednje vrednosti intenziteta erozije po transektima iznosile su: (3)  $0,24 \text{ t ha}^{-1} \text{ god}^{-1} \rightarrow$  (1)  $-4,9 \text{ t ha}^{-1} \text{ god}^{-1} \rightarrow$  (4)  $-11 \text{ t ha}^{-1} \text{ god}^{-1} \rightarrow$  (5)  $-15 \text{ t ha}^{-1} \text{ god}^{-1} \rightarrow$  (2)  $-25 \text{ t ha}^{-1} \text{ god}^{-1}$ .
- Rezultati dobijeni primenom modela PD, DM i MODERN za izračunavanje intenziteta erozije zemljišta na istraživanom prostoru male površine B, ukazuju na akumulaciju (donošenje zemljišnog materijala) odnosno eroziju (odnošenje zemljišnog materijala) na istim lokacijama duž proučavanih transekata nezavisno od primenjenog modela ali da vrednosti dobijenih intenziteta erozije ( $\text{t ha}^{-1} \text{ god}^{-1}$ ) na proučavanim lokacijama zavise od primenjenog modela.
- Poređenjem vrednosti intenziteta erozije dobijene primenom različitih modela na istraživanom prostoru može se uočiti da su vrednosti intenziteta erozije zemljišta dobijene primenom modela MODERN sličnije vrednostima dobijenim primenom modela PD na istraživanom prostoru male površine B, dok su vrednosti intenziteta erozije zemljišta dobijene primenom modela DM nešto niže.
- Primenom modela USLE srednja vrednost intenziteta erozije zemljišta na istraživanom prostoru B iznosila je  $-5,8 \text{ t ha}^{-1} \text{ god}^{-1}$ . Vrednosti intenziteta erozije po transektima iznosile su: (3)  $-2,2 \text{ t ha}^{-1} \text{ god}^{-1} \rightarrow$  (1)  $-3,3 \text{ t ha}^{-1} \text{ god}^{-1} \rightarrow$  (5)  $-7,2 \text{ t ha}^{-1} \text{ god}^{-1} \rightarrow$  (4)  $-7,3 \text{ t ha}^{-1} \text{ god}^{-1} \rightarrow$  (2)  $-9,2 \text{ t ha}^{-1} \text{ god}^{-1}$ .
- Vrednosti intenziteta erozije dobijene primenom modela USLE na istraživanom prostoru B duž pojedinačnih transekata, veoma su bliske srednjim vrednostima duž transekata koje su dobijene primenom sva tri prethodno prikazana modela (PD, DM i MODERN).

Dobijeni rezultati daju detaljan prikaz vertikalne distribucije specifičnih aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  na erodovanom neobrađivanom prostoru jugoistočne Srbije. Ispitivanjem korelacija između  $^{137}\text{Cs}$  i analiziranih fizičko-hemijskih karakteristika zemljišta utvrđen je uticaj različitih fizičko-hemijskih karakteristika zemljišta na njegovo ponašanje u zemljištu istraživanog prostora. U ovom radu izvršena je i procena srednjeg godišnjeg intenziteta erozije zemljišta korišćenjem površinske aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  na jednom prostoru na teritoriji Srbije primenom modela PD, DM i MODERN za period od 1986. do 2014. godine, ali i tradicionalnog modela USLE. Usled dominantne depozicije  $^{137}\text{Cs}$  poreklom od černobiljskog

akcidenta na istraživanom prostoru male površine B, modeli PD i DM su optimizovani za izračunavanje srednjeg intenziteta erozije za period od 1986. do 2014. godine. Rezultati ovog rada mogu dati važan doprinos nekim praktičnim aspektima, posebno u domenu procene intenziteta erozije zemljišta, što može biti od značaja za poljoprivredu, šumarstvo i vodoprivredu. U budućem radu trebalo bi ispitati intenzitet erozije zemljišta na prostorima sa različitim geološkim, hidrogeološkim i klimatskim karakteristikama.

## 6. LITERATURA

- [1] R. Lazarević, Karta erozije SR Srbije 1:500 000, Beograd, Srbija: Institut za šumarstvo i drvenu industriju, Odeljenje za eroziju i melioraciju, 1983.
- [2] Izveštaj o stanju životne sredine u Republici Srbiji za 2010. godinu, Beograd, Srbija: Ministarstvo životne sredine, rudarstva i prostornog planiranja, Agencija za zaštitu životne sredine, 2011.
- [3] Š. S. Miljanić, Udžbenik nuklearne hemije - Skripta (za internu upotrebu), Beograd, Srbija: Univerzitet u Beogradu, Fakultet za fizičku hemiju, 2008.
- [4] UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation), Sources and effects of ionizing radiation, UNSCEAR 2008 Report to the General Assembly with Scientific Annexes, Volume II Scientific Annexes C, D and E, New York: United Nations Publication, 2011.
- [5] Q.-H. Hu, J.-Q. Weng and J.-S. Wang, Sources of anthropogenic radionuclides in the environment: a review, *Journal of Environmental Radioactivity*, 101, 426-437, 2010.
- [6] UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation), Sources and effects of ionizing radiation, UNSCEAR 2008 Report to the General Assembly with Scientific Annexes, Volume I, New York: United Nations Publication, 2010.
- [7] N.-O. Bergkvist and R. Ferm, Nuclear Explosions 1945 -1998, Stockholm, Sweden: Defence Research Establishment Division of Systems and Underwater Technology SE-172 90, 2000.
- [8] IAEA (International Atomic Energy Agency), Environmental Consequences of the Chernobyl Accident and their Remediation: Twenty Years of Experience, Report of the Chernobyl Forum Expert Group 'Environment', Vienna: International Atomic Energy Agency, STI/PUB/1239, 2006.
- [9] Nivoi radioaktivne kontaminacije čovekove sredine i ozračenost stanovništva Jugoslavije 1986. godine usled havarije nuklearne elektrane u Černobilju, Beograd,

- Srbija: Savezni komitet za rad, zdravstvo i socijalnu zaštitu, 1987.
- [10] IAEA (International Atomic Energy Agency), The Fukushima Daiichi Accident, Report by the Director General, Vienna, Austria: International Atomic Energy Agency, STI/PUB/1710, 2015.
- [11] I. Bikit, D. Mrda, N. Todorovic, J. Nikolov, M. Krmar, M. Veskovic, J. Slivka, J. Hansman, S. Forkapic and N. Jovancevic, Airborne radioiodine in northern Serbia from Fukushima, *Journal of Environmental Radioactivity*, 114, 89-93, 2012.
- [12] M. Čujić, Radionuklidi i teški metali u zemljištu u okolini termoelektrane "Nikola Tesla" u Obrenovcu: faktori koji utiču na njihovu migraciju – prostorna distribucija – procena radijacionog uticaja na živi svet (doktorska disertacija), Beograd, Srbija: Univerzitet u Beogradu, Fakultet za fizičku hemiju, 2016.
- [13] Lj. Janković-Mandić, Radioaktivnost zemljišta Beograda: distribucija prirodnih i veštačkih radionuklida i procena radijacionog izlaganja stanovništva (doktorska disertacija), Beograd, Srbija: Univerzitet u Beogradu, Fakultet za fizičku hemiju, 2011.
- [14] L. Mabit, S. Chhem-Kieth, P. Dornhofer, A. Toloza, M. Benmansour, C. Bernard, E. Fulajtar and D. E. Walling,  $^{137}\text{Cs}$ : A widely used and validated medium-term soil tracer, in *Guidelines for Using Fallout Radionuclides to Assess Erosion and Effectiveness of Soil Conservation Strategies*, Vienna, Austria, IAEA-TECDOC-1741, 2014, pp. 27-77.
- [15] [Na mreži]. Available: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/NucEne/fisfrag.html>. [Poslednji pristup November 2016].
- [16] Lj. J. Janković-Mandić, R. M. Dragović, M. M. Đorđević, M. B. Đolić, A. E. Onjia, S. D. Dragović i G. G. Bačić, Prostorna varijabilnost  $^{137}\text{Cs}$  u zemljištu Beograda (Srbija), *Hemijska Industrija*, 68(4), 449-455, 2014.
- [17] S. Dragović, Specifičnost lokalizacije i distribucije  $^{137}\text{Cs}$  u mahovinama (magistarski rad), Beograd, Srbija: Univerzitet u Beogradu, Fakultet za fizičku hemiju, 2002.
- [18] L. Mabit, M. Benmansour and D. E. Walling, Comparative advantages and limitations

- of the fallout radionuclides  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  and  $^7\text{Be}$  for assessing soil erosion and sedimentation, *Journal of Environmental Radioactivity*, 99, 1799-1807, 2008.
- [19] P. L. Nimis, Radiocesium in plants of forest ecosystems, *Studia Geobotanica*, 15, 3-49, 1996.
- [20] J. C. Ritchie and J. R. McHenry, Application of radioactive fallout cesium-137 for measuring soil erosion and sediment accumulation rates and patterns: A Review, *Journal of Environmental Quality*, 19, 215-233, 1990.
- [21] M. De Cort, G. Dubois, S. D. Fridman, M. G. Germenchuk, Y. A. Izrael, A. Janssens, A. R. Jones, G. N. Kelly, E. V. Kvasnikova, I. I. Matveenko, I. M. Nazarov, Y. M. Pokumeiko, V. A. Sitak, E. O. Stukin, L. Y. Tabachny, Y. S. Tsaturov and S. I. Avdyushin, Atlas of Caesium Deposition on Europe After the Chernobyl Accident, Luxembourg: EUR Report 16733. EC, Office for Official Publications of the European Communities, 1998.
- [22] D. Popović i V. Spasić-Jokić, Posledice nuklearne nesreće u Černobilju na teritoriji Republike Srbije, *Vojnosanitetski Pregled*, 63(5), 481-487, 2006.
- [23] I. Suchara, J. Sucharová, M. Holá, H. Pilátová and P. Rulík, Long-term retention of  $^{137}\text{Cs}$  in three forest soil types with different soil properties, *Journal of Environmental Radioactivity*, 158-159, 102-113, 2016.
- [24] G. Arapis, E. Petrayev, E. Shagalova, O. Zhukova, G. Sokolik and T. Ivanova, Effective migration velocity of  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{90}\text{Sr}$  as a function of the type of soils in Belarus, *Journal of Environmental Radioactivity*, 34(2), 171-185, 1997.
- [25] K. Rosén, I. Öborn and H. Lönsjö, Migration of radiocesium in Swedish soil profiles after the Chernobyl accident, 1987-1995, *Journal of Environmental Radioactivity*, 46, 45-66, 1999.
- [26] D. E. Walling, Y. Zhang and Q. He, Models for converting measurements of environmental radionuclide inventories ( $^{137}\text{Cs}$ , Excess  $^{210}\text{Pb}$ , and  $^7\text{Be}$ ) to estimates of soil erosion and deposition rates (Including software for model implementation), Exeter, EX4 4RJ U.K.: Department of Geography, University of Exeter, 2006.

- [27] D. Krstić, D. Nikezić, N. Stevanović and M. Jelić, Vertical profile of  $^{137}\text{Cs}$  in soil, *Applied Radiation and Isotopes*, 61, 1487-1492, 2004.
- [28] M. Isaksson, B. Erlandsson and S. Mattsson, A 10-year study of the  $^{137}\text{Cs}$  distribution in soil and a comparison of Cs soil inventory with precipitation-determined deposition, *Journal of Environmental Radioactivity*, 55, 47-59, 2001.
- [29] G. Matisoff, M. E. Keterer, K. Rosén, J. W. Mietelski, L. F. Vitko, H. Person and E. Lokas, Downward migration of Chernobyl-derived radionuclides in soil in Poland and Sweden, *Applied Geochemistry*, 26, 105-115, 2011.
- [30] P. Bossew and G. Kirchner, Modeling the vertical distribution of radionuclides in soil. Part 1. The converse dispersion equation revisited, *Journal of Environmental Radioactivity*, 73, 127-150, 2004.
- [31] J. Petrović, S. Dragović, R. Dragović, M. Đorđević, M. Đokić and M. Čujić, Spatial and vertical distribution of  $^{137}\text{Cs}$  in soils in the erosive area of southeastern Serbia (Pčinja and South Morava River Basins), *Journal of Soils and Sediments*, 16, 1168-1175, 2016.
- [32] M. S. Al-Masri, Vertical distribution and inventories of  $^{137}\text{Cs}$  in the Syrian soils of the eastern Mediterranean region, *Journal of Environmental Radioactivity*, 86, 187-198, 2006.
- [33] C. Dumat, M. V. Cheshire, A. R. Fraser, C. A. Shand and S. Staunton, The effect of removal of soil organic matter and iron on the adsorption of radiocaesium, *European Journal of Soil Science*, 48, 675-683, 1997.
- [34] A. Nakao, S. Funakawa, H. Tsukada and T. Kosaki, The fate of caesium-137 in a soil environment controlled by immobilization on clay minerals, *Environmental Journal for the Global Community*, 6, 17-29, 2012.
- [35] C. Dumat and S. Staunton, Reduced adsorption of caesium on clay minerals caused by various humic substances, *Journal of Environmental Radioactivity*, 46, 187-200, 1999.
- [36] S. Staunton, C. Dumat and A. Zsolnay, Possible role of organic matter in radiocaesium

- adsorption in soils, *Journal of Environmental Radioactivity*, 58, 163-173, 2002.
- [37] A. Rigol, M. Vidal and G. Rauret, An overview of the effect of organic matter on soil-radiocaesium interaction: implications in root uptake, *Journal of Environmental Radioactivity*, 58, 191-216, 2002.
- [38] G. Šekularac, M. Djurić, M. Aksić, M. Jelić i T. Jakšić, Erozija zemljišta malog sliva Matijevića potok (zapadna Srbija), *XX Savetovanje o biotehnologiji, zbornik radova*, 20(22), 587-593, 2015.
- [39] V. Đukić i S. Petković, Mogućnost modeliranja erozionih i transportnih procesa u rečnim slivovima, *Vodoprivreda*, 41(240-242), 117-125, 2009.
- [40] A. Jha, Quantification of short-term erosion rates using the cosmogenic radionuclide <sup>7</sup>Be, Berlin: Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Naturwissenschaften dem Fachbereich Physik/ Elektrotechnik der Universität Bremen vorgelegt von, 2012.
- [41] [Na mreži]. Available: <http://slideplayer.com/slide/8061216/>. [Poslednji pristup November 2016].
- [42] S. Gavrilović, Proračun srednje godišnje količine nanosa prema potencijalu erozije, Beograd, Srbija: Glasnik Šumarskog fakulteta br. 26, 1962.
- [43] S. Gavrilović, Određivanje režima nanosa bujičnog područja i izrada karte erozije, Beograd, Srbija: DGA-750, 1965.
- [44] M. Stefanović, Z. Gavrilović i R. Bajčetić, Lokalna zajednica i problematika bujičnih poplava, Priručnik za lokalnu zajednicu i organizacije civilnog društva, Srbija: Organizacija za evropsku bezbednost i saradnju, Misija u Srbiji, 2014.
- [45] S. Dragicevic, D. Filipovic, S. Konstadinov, R. Ristic, I. Novakovic, N. Zivkovic, G. Andjelkovic, B. Abolmasov, V. Secerov and S. Djurdjic, Natural hazard assessment for land-use planning in Serbia, *International Journal of Environmental Research*, 5(2), 371-380, 2011.

- [46] Izveštaj o stanju životne sredine u Republici Srbiji za 2012. godinu, Beograd, Srbija: Republika Srbija, Ministarstvo energetike, razvoja i zaštite životne sredine, Agencija za zaštitu životne sredine, 2013.
- [47] Statistika životne sredine, Zaštita od štetnog dejstva vode u Republici Srbiji, 2014. Prethodni rezultati. Republika Srbija, Republički zavod za statistiku, Saopštenje broj 121, 2015.
- [48] J. C. Ritchie and C. A. Ritchie,  $^{137}\text{Cs}$  use in erosion and sediment deposition studies: promises and problems, in *Use of nuclear techniques in studying soil erosion and siltation*, IAEA-TECDOC-828, 1995, pp. 111-201.
- [49] D. E. Walling and T. A. Quine, The use of fallout radionuclide in soil erosion investigations, in *Nuclear Techniques in Soil-Plant Studies for Sustainable Agriculture and Environmental Preservation*, IAEA Publ. ST1/PUB/947, 1995, pp. 597-619.
- [50] D. Walling, Y. Zhang and Q. He, Models for deriving estimates of erosion and deposition rates from fallout radionuclide (caesium-137, excess lead-210, and beryllium-7) measurements and the development of user-friendly software for model implementation, in *Impact of Soil Conservation Measures on Erosion Control and Soil Quality*, Vienna, IAEA-TECDOC-1665, 2011, pp. 11-33.
- [51] F. Zapata, Handbook for the Assessment of Soil Erosion and Sedimentation Using Environmental Radionuclides, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [52] Y. Zhang, Y. Long, J. An, X. Yu and X. Wang, Spatial patterns of  $^{137}\text{Cs}$  inventories and soil erosion from earth-banked terraces in the Yimeng Mountains, China, *Journal of Environmental Radioactivity*, 136, 1-9, 2014.
- [53] X. Zhang, Y. Long, X. He, J. Fu and Y. Zhang, A simplified  $^{137}\text{Cs}$  transport model for estimating erosion rates in undisturbed soil, *Journal of Environmental Radioactivity*, 99, 1242-1246, 2008.
- [54] Z. Xinbao, D. L. Higgitt and D. E. Walling, A preliminary assessment of the potential for using caesium-137 to estimate rates of soil erosion in the Loess Plateau of China, *Hydrological Sciences - Journal - des Sciences Hydrologiques*, 35(3), 243-252, 1990.



- [55] F. Zapata and E. García-Agudo, Future prospects for the  $^{137}\text{Cs}$  technique for estimating soil erosion and sedimentation rates, *Acta Geologica Hispanica*, 35, 197-205, 2000.
- [56] F. Zapata, The use of environmental radionuclides as tracers in soil erosion and sedimentation investigations: recent advances and future developments, *Soil & Tillage Research*, 69, 3-13, 2003.
- [57] P. Du and D. E. Walling, Using  $^{137}\text{Cs}$  measurements to investigate the influence of erosion and soil redistribution on soil properties, *Applied Radiation and Isotopes*, 69, 717-726, 2011.
- [58] H.-J. Fang, X.-M. Yang, X.-P. Zhang and A.-Z. Liang, Using  $^{137}\text{Cs}$  tracer technique to evaluate erosion and deposition of black soil in Northeast China, *Pedosphere*, 16(2), 201-209, 2006.
- [59] T. Fukuyama, C. Takenaka and Y. Onda,  $^{137}\text{Cs}$  loss via soil erosion from a mountainous headwater catchment in central Japan, *Science of the Total Environment*, 350, 238-247, 2005.
- [60] X. Bai, Assessment of sediment and erosion rates by using the caesium-137 technique in a Chinese polygonal karst depression, *Environmental Earth Sciences*, 64(2), 2151-2158, 2011.
- [61] A. C. Andrello, C. R. Appoloni, P. S. Parreira and M. F. Guimarães, A preliminary survey of soil erosion in a small basin in the Parana State by using  $^{137}\text{Cs}$  methodology, *Radiation Physics and Chemistry*, 61, 635-636, 2001.
- [62] IAEA (International Atomic Energy Agency), Use of  $^{137}\text{Cs}$  in the study of soil erosion and sedimentation, Vienna: IAEA-TECDOC-1028, 1998.
- [63] J. Petrović, S. Dragović, R. Dragović, M. Đorđević, M. Đokić, B. Zlatković and D. Walling, Using  $^{137}\text{Cs}$  measurements to estimate soil erosion rates in the Pčinja and South Morava River Basins, southeastern Serbia, *Journal of Environmental Radioactivity*, 158-159, 71-80, 2016.
- [64] D. E. Walling, Recent advances in the use of environmental radionuclides in soil

- erosion investigations (IAEA-SM-363/89), in *Nuclear techniques in integrated plant nutrient, water and soil management*, Austria, IAEA-CSP-11/P, 2002, pp. 279-301.
- [65] D. E. Walling, Y. Zhang and Q. He, Conversion models and related software, in *Guidelines for Using Fallout Radionuclides to Assess Erosion and Effectiveness of Soil Conservation Strategies*, Austria, IAEA-TECDOC-1741, 2014, pp. 125-148.
- [66] D. E. Walling and Q. He, Improved models for estimating soil erosion rates from cesium-137 measurements, *Journal of Environmental Quality*, 28, 611-622, 1999.
- [67] L. Arata, K. Meusburger, E. Frenkel, A. A'Campo-Neuen, A.-R. Iurian, M. E. Ketterer, L. Mabit and C. Alewell, Modelling Deposition and Erosion rates with RadioNuclides (MODERN) Part 1: A new conversion model to derive soil redistribution rates from inventories of fallout radionuclides, *Journal of Environmental Radioactivity*, 162-163, 45-55, 2016.
- [68] M. Krmar, M. Velojić, J. Hansman, R. Ponjarac, A. Mihajlović, N. Todorović, M. Vučinić-Vasić and R. Savić, Wind erosion on Deliblato (the largest European continental sandy terrain) studied using  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{137}\text{Cs}$  measurements, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 303, 2511-2515, 2015.
- [69] R. Tošić, S. S. Dragičević, I. S. Bikit, S. Forkapić, D. Mrdja, N. Todorović and B. Blagojević, Estimating the soil erosion and deposition rate using  $^{137}\text{Cs}$  tracer method in the catchment of Drenova reservoir (B&H), *Nuclear Technology & Radiation Protection*, 27(3), 247-253, 2012.
- [70] M. Dimitrijević, Geološka karta i tumač. Geološki atlas Srbije 1:2 000 000, Beograd: Ministarstvo životne sredine i prostornog planiranja Republike Srbije, 2002.
- [71] M. Babović i D. Cvetković, Trgovište sa Radomirom, u *Osnovna Geološka karta 1:100 000*, Beograd, Socijalistička Federativna republika Jugoslavija. Savezni geološki zavod, 1977, pp. 34-57.
- [72] Meteorološki kodišnjak, kumatološki podaci, Beograd: Republički hidrometeorološki zavod, Republika Srbija, 1991-2014.

- [73] B. Zlatković, Flora i fitogeografska pripadnost doline reke Pčinje u jugoistočnoj Srbiji (doktorska disertacija), Niš: Univerzitet u Nišu, Prirodno-matematički fakultet, 2011.
- [74] G. Dugalić i B. Gajić, Pedologija, Univerzitet u Kragujevcu, 2012.
- [75] World reference base for soil resources, Rome: FAO Viale delle Terme di Caracalla, 2006.
- [76] IAEA (International Atomic Energy Agency), Measurement of Radionuclides in Food and the Environment; Technical Report Series 295., Vienna, 1989.
- [77] ORTEC, Gamma Vision 32, Gamma-Ray Spectrum Analysis and MCA Emulation, Version 5.3., Oak Ridge, USA, 2001.
- [78] W. Kutsch, M. Bahn and A. Heinemeyer, Soil Carbon Dynamics: An Integrated Methodology, Cambridge University Press, 2009.
- [79] D. L. Rowell, Bodenkunde. Untersuchungsmethoden und ihre Anwendungen, Berlin: Springer, 1997.
- [80] H. Kappen, Die Bodenaziditat, Berlin: Springer Verlag, 1929.
- [81] V. N. Simakov, Application of phenylanthranilic acid in determining humus, the method of Tyurin, vol. 8, 1957, pp. 72-73.
- [82] ISO 10693, Soil Quality-Determination of carbonate content-Volumetric Method, Geneva: International Standard Organization, 1995.
- [83] ISO 11265, Soil Quality-Determination of the Specific Electrical Conductivity, Geneva: International Standard Organization, 1994.
- [84] ISO 10390, Soil Quality-Determination of pH, Geneva: International Standard Organization, 2005.
- [85] SPSS, Statistical Package for the Social Sciences, 16.0, Chicago, Illinois, USA.
- [86] P. Porto, D. Walling, V. Ferro and C. Di Stefano, Validating erosion rate estimates provided by caesium-137 measurements for two small forested catchments in Calabria,

- Southern Italy, *Land Degradation and Development*, 14, 389-408, 2003.
- [87] S. D. Warren, H. Mitasova, M. G. Hohmann, S. Landsberger, F. Y. Iskander, T. S. Ruzycki and G. M. Senseman, Validation of a 3-D enhancement of the Universal Soil Loss Equation for prediction of soil erosion and sediment deposition, *Catena*, 64, 281-296, 2005.
- [88] P. Panagosa, P. Borrelli, K. Meusburger, C. Alewell, E. Lugato and L. Montanarella, Estimating the soil erosion cover-management factor at the European scale, *Land Use Policy*, 48, 38-50, 2015.
- [89] M. Grimm, R. J. A. Jones, E. Rusco and L. Montanarella, Soil Erosion Risk in Italy: a revised USLE approach. European Soil Bureau Research Report No.11, EUR 20677 EN, Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2003, p. 28.
- [90] J. M. van der Knijff, R. J. A. Jones and L. Montanarella, Soil Erosion Risk Assessment in Europe. EUR 19044 EN, 2000.
- [91] V. Perovic, D. Jaramaz, L. Zivotic, D. Cakmak, V. Mrvic, M. Milanovic and E. Saljnikov, Design and implementation of WebGIS technologies in evaluation of erosion intensity in the municipality of NIS (Serbia), *Environmental Earth Sciences*, 75, 211, 2016.
- [92] W. Wischmeier and D. Smith, Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning. Agricultural Handbook No. 537., Washington DC, USA: U.S. Department of Agriculture, 1978.
- [93] P. Panagos, K. Meusburger, C. Ballabio, P. Borrelli and C. Alewell, Soil erodibility in Europe: A high-resolution dataset based on LUCAS, *Science of the Total Environment*, 479-480, 189-200, 2014.
- [94] M. Kirkby and R. Morgan, Soil Erosion, John Wiley and Sons, Ltd., 1980.
- [95] S. Dragović, L. Janković-Mandić, R. Dragović and M. Đorđević, Natural and man-made radionuclides in soil as sources of radiation exposure, in *Radiation Exposure:*

*Sources, Impacts and Reduction Strategies*, New York, Nova Science Publishers, Inc., 2012, pp. 1-42.

- [96] J. Petrović, M. Čujić, M. Đorđević, R. Dragović, B. Gajić, Š. Miljanić and S. Dragović, Spatial distribution and vertical migration of  $^{137}\text{Cs}$  in soils of Belgrade (Serbia) 25 years after the Chernobyl accident, *Environmental Science Processes & Impacts*, 15, 1279-1289, 2013.
- [97] S. Dragović, B. Gajić, R. Dragović, Lj. Janković-Mandić, L. Slaković-Beškoski, N. Mihailović, M. Momčilović and M. Čujić, Edaphic factors affecting the vertical distribution of radionuclides in the different soil types of Belgrade, Serbia, *Journal of Environmental Monitoring*, 14, 127-137, 2012.
- [98] B. Milenkovic, J. M. Stajic, Lj. Gulan, T. Zeremski and D. Nikezic, Radioactivity levels and heavy metals in the urban soil of Central Serbia, *Environmental Science and Pollution Research*, 22, 16732-16741, 2015.
- [99] G. Djelic, D. Krstic, J. M. Stajic, B. Milenkovic, M. Topuzovic, D. Nikezic, D. Vucic, T. Zeremski, M. Stankovic and D. Kostic, Transfer factors of natural radionuclides and  $^{137}\text{Cs}$  from soil to plants used in traditional medicine in central Serbia, *Journal of Environmental Radioactivity*, 158-159, 81-88, 2016.
- [100] G. Dugalic, D. Krstic, M. Jelic, D. Nikezic, B. Milenkovic, M. Pucarevic and T. Zeremski-Skoric, Heavy metals, organics and radioactivity in soil of western Serbia, *Journal of Hazardous Materials*, 177, 697-702, 2010.
- [101] I. Bikit, J. Slivka, Lj. Čonkić, M. Krmar, M. Vesković, N. Žikić-Todorović, E. Varga, S. Čurčić and D. Mrdja, Radioactivity of the soil in Vojvodina (northern province of Serbia and Montenegro), *Journal of Environmental Radioactivity*, 78, 11-19, 2005.
- [102] S. Dragović and A. Onjia, Classification of soil samples according to their geographic origin using gamma-ray spectrometry and principal component analysis, *Journal of Environmental Radioactivity*, 89, 150-158, 2006.
- [103] N. M. Antovic, P. Vukotic, N. Svrakota and S. K. Andrukhovich, Pu-239+240 and Cs-137 in Montenegro soil: their correlation and origin, *Journal of Environmental*

- Radioactivity*, 110, 90-97, 2012.
- [104] P. N. Owens and D. E. Walling, Spatial variability of cesium-137 inventories at reference sites: an example from two contrasting sites in England and Zimbabwe, *Applied Radiation and Isotopes*, 47, 699-707, 1996.
- [105] L. Gaspar and A. Navas, Vertical and lateral distributions of  $^{137}\text{Cs}$  in cultivated and uncultivated soils on Mediterranean hillslopes, *Geoderma*, 207-208, 131-143, 2013.
- [106] K. Hirose, Y. Kikawada, Y. Igarashi, H. Fujiwara, D. Jugder, Y. Matsumoto, T. Oi and M. Nomura, Plutonium,  $^{137}\text{Cs}$  and uranium isotopes in Mongolian surface soils, *Journal of Environmental Radioactivity*, 166, 97-103, 2017.
- [107] L. R. Basher and K. M. Matthews, Relationship between  $^{137}\text{Cs}$  in some undisturbed New Zealand soils and rainfall, *Australian Journal of Soil Research*, 31, 655-663, 1993.
- [108] M. Takada, T. Yamada, T. Takahara and T. Okuda, Spatial variation in the  $^{137}\text{Cs}$  inventory in soils in a mixed deciduous forest in Fukushima, Japan, *Journal of Environmental Radioactivity*, 161, 35-41, 2016.
- [109] D. Marčiulionienė, B. Lukšienė and O. Jefanova, Accumulation and translocation peculiarities of  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{40}\text{K}$  in the soil - plant system, *Journal of Environmental Radioactivity*, 150, 86-92, 2015.
- [110] Ö. Karadeniz and G. Yaprak, Vertical distributions and gamma dose rates of  $^{40}\text{K}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$  and  $^{137}\text{Cs}$  in the selected forest soils in Izmir, Turkey, *Radiation Protection Dosimetry*, 131, 346-355, 2008.
- [111] J. Pumpanen, M. Ohashi, I. Endo, P. Hari, J. Bäck, M. Kulmala and N. Ohte,  $^{137}\text{Cs}$  distributions in soil and trees in forest ecosystems after the radioactive fallout - Comparison study between southern Finland and Fukushima, Japan, *Journal of Environmental Radioactivity*, 161, 73-81, 2016.
- [112] S. S. Shapiro and M. B. Wilk, An analysis of variance test for normality (complete samples), *Biometrika*, 52 (3-4), 591-611, 1965.

- [113] A.-R. Iurian, M. O. Phaneuf and L. Mabit, Mobility and Bioavailability of Radionuclides in Soils, in *Radionuclides in the Environment, Influence of chemical speciation and plant uptake on radionuclide migration*, Springer International Publishing, 2015, pp. 37-59.
- [114] USDA (United States Department of Agriculture), Soil Taxonomy. A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys, Handbook No. 436., Washington DC: Soil Survey Staff, 1999.
- [115] C. Martinez, G. R. Hancock and J. D. Kalma, Relationships between  $^{137}\text{Cs}$  and soil organic carbon (SOC) in cultivated and never-cultivated soils: An Australian example, *Geoderma*, 158, 137-147, 2010.
- [116] Izveštaj o stanju zemljišta u Republici Srbiji, Beograd: Republika Srbija, Ministarstvo životne sredine i prostornog planiranja, Agencija za zaštitu životne sredine, 2009.
- [117] F. Giannakopoulou, C. Haidouti, A. Chronopoulou and D. Gasparatos, Sorption behavior of cesium on various soils under different pH levels, *Journal of Hazardous Materials*, 149(3), 553-556, 2007.
- [118] A.-R. Iurian, L. Mabit and C. Cosma, Uncertainty related to input parameters of  $^{137}\text{Cs}$  soil redistribution model for undisturbed fields, *Journal of Environmental Radioactivity*, 136, 112-120, 2014.
- [119] A. Gaspar, A. Navas, D. E. Walling, J. Machín and J. Gómez Arozamena, Using  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{210}\text{Pb}$  to assess soil redistribution on slopes at different temporal scales, *Catena*, 102, 46-54, 2013.
- [120] C. S. Kim, M. H. Lee, C. K. Kim and K. H. Kim,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{239+240}\text{Pu}$  and  $^{238}\text{Pu}$  concentrations in surface soils of Korea, *Journal of Environmental Radioactivity*, 40, 75-88, 1998.
- [121] S. Forkapic, J. Vasin, I. Bikit, D. Mrdja, K. Bikit and S. Milić, Correlations between soil characteristics and radioactivity content of Vojvodina soil, *Journal of Environmental Radioactivity*, 1-8, 2016.

- [122] M. H. Lee, C. W. Lee and B. H. Boo, Distribution and characteristics of  $^{239,240}\text{Pu}$  and  $^{137}\text{Cs}$  in the soil of Korea, *Journal of Environmental Radioactivity*, 37, 1-16, 1997.
- [123] J. C. Ritchie and G. W. McCarty,  $^{137}\text{Cesium}$  and soil carbon in a small agricultural watershed, *Soil & Tillage Research*, 69, 45-51, 2003.
- [124] J. C. Ritchie, G. W. McCarty, E. R. Venteris and T. Kaspar, Soil and soil organic carbon redistribution on the landscape, *Geomorphology*, 89, 163-171, 2007.
- [125] S. J. Rodway-Dyer and D. E. Walling, The use of  $^{137}\text{Cs}$  to establish longer-term soil erosion rates on footpaths in the UK, *Journal of Environmental Management*, 91, 1952-1962, 2010.
- [126] P. Porto, D. E. Walling and V. Ferro, Validating the use of caesium-137 measurements to estimate soil erosion rates in a small drainage basin in Calabria, Southern Italy, *Journal of Hydrology*, 248, 93-108, 2001.
- [127] A.-R. Iuriana, R. Begy, I. Căținaș and C. Cosma, Results of medium-term soil redistribution rates in Cluj county, Romania, using  $^{137}\text{Cs}$  measurements, *Procedia Environmental Sciences*, 14, 22-31, 2012.
- [128] E. Ceaglio, K. Meusburger, M. Freppaz, E. Zanini and C. Alewell, Estimation of soil redistribution rates due to snow cover related processes in a mountainous area (Valle d'Aosta, NW Italy), *Hydrology and Earth System Sciences*, 16, 517-528, 2012.
- [129] V. N. Golosov, V. R. Belyaev and M. V. Markelov, Application of Chernobyl-derived  $^{137}\text{Cs}$  fallout for sediment redistribution studies: lessons from European Russia, *Hydrological Processes*, 27, 781-794, 2013.
- [130] R. A. Sutherland, Caesium-137 soil sampling and inventory variability in reference locations: A literature survey, *Hydrological Processes*, 10, 43-53, 1996.
- [131] A. R. Byrne, Radioactivity in fungi in Slovenia, Yugoslavia, following the Chernobyl Accident, *Journal of Environmental Radioactivity*, 6, 177-183, 1988.
- [132] P. Vukotić, J. Žic, S. Jovanović i S. Dapčević, Cs-137 u zemljišu području Pljevala, u *Černobilj, 10 godina posle - zbornika radova*, Beograd, Jugoslovensko drštvo za zaštitu



od začenja, 1996, pp. 73-78.

- [133] K. Tanaka, H. Kondo, A. Sakaguchi and Y. Takahashi, Cumulative history recorded in the depth distribution of radiocesium in sediments deposited on a sandbar, *Journal of Environmental Radioactivity*, 150, 213-219, 2015.
- [134] S. Hacıyakupoglu, T. Ahmet Ertek, D. E. Walling, Z. Fatih Ozturk, G. Karahan, A. Evren Erginal and N. Celebi, Using caesium-137 measurements to investigate soil erosion rates in western Istanbul (NW Turkey), *Catena*, 64, 222-231, 2005.
- [135] A. Uğur, M. M. Saç, G. Yener, Ü. Altınbaş, Y. Kurucu, M. Bolca and B. Özden, Vertical distribution of the natural and artificial radionuclides in various soil profiles to investigate soil erosion, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 295, 265-270, 2004.
- [136] M. M. Saç, A. Uğur, G. Yener and B. Özden, Estimates of soil erosion using cesium-137 tracer models, *Environmental Monitoring and Assessment*, 136, 461-467, 2008.
- [137] S. P. Theocharopoulos, H. Florou, D. E. Walling, H. Kalantzakos, M. Christou, P. Tountas and T. Nikolaou, Soil erosion and deposition rates in a cultivated catchment area in central Greece, estimated using the  $^{137}\text{Cs}$  technique, *Soil & Tillage Research*, 69, 153-162, 2003.
- [138] S. Grauso, F. Onori, M. Esposito, M. Neri, G. Armiento, P. Bartolomei, C. Crovato, F. Felici, M. Marcinno, P. Regina and C. Tebano, Soil-erosion assessment at basin scale through  $^{137}\text{Cs}$  content analysis based on pedo-morphological units, *Environmental Geology*, 54, 235-247, 2008.
- [139] P. Panagos, C. Ballabio, P. Borrelli, K. Meusburger, A. Klik, S. Rousseva, M. Perčec Tadić, S. Michaelides, M. Hrabalíková, P. Olsen, J. Aalto, M. Lakatos, A. Rymaszewicz, A. Dumitrescu, S. Beguería and C. Alewell, Rainfall erosivity in Europe, *Science of the Total Environment*, 511, 801-814, 2015.
- [140] P. Panagos, P. Borrelli and K. Meusburger, A new European slope length and steepness factor (LS-Factor) for modeling soil erosion by water, *Geosciences*, 5, 117-126, 2015.

- [141] P. Panagos, P. Borrelli, K. Meusburger, E. H. van der Zanden, J. Poesen and C. Alewell, Modelling the effect of support practices (P-factor) on the reduction of soil erosion by water at European scale, *Environmental Science & Policy*, 51, 23-34, 2015.
- [142] L. Životić, V. Perović, D. Jamaraz, A. Đorđević, R. Petrović and M. Todorović, Application of USLE, GIS, and remote sensing in the assessment of soil erosion rates in Southeastern Serbia, *Polish Journal of Environmental Studies*, 21(6), 1929-1935, 2012.
- [143] V. Perović, L. Životić, R. Kadović, A. Đorđević, D. Jaramaz, V. Mrvić and M. Todorović, Spatial modelling of soil erosion potential in a mountainous watershed of South-eastern Serbia, *Environmental Earth Sciences*, 68, 115-128, 2013.
- [144] P. Panagos, P. Borrelli, J. Poesen, C. Ballabio, E. Lugato, K. Meusburger, L. Montanarella and C. Alewell, The new assessment of soil loss by water erosion in Europe, *Environmental Science & Policy*, 54, 438-447, 2015.

**Prilog 1.**

**Изјава о ауторству**

Потписани-а: Јелена М. Петровић

број индекса: 2011/0309

**Изјављујем**

да је докторска дисертација под насловом:

**Оптимизација конверзионих модела за израчунавање интензитета ерозије земљишта на основу активности радиоизотопа  $^{137}\text{Cs}$**

- 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 кршио/ла ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

**Потпис докторанда**

У Београду,

\_\_\_\_\_

**Prilog 2.**

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

Име и презиме аутора: Јелена М. Петровић

Број индекса: 2011/0309

Студијски програм: Докторске студије физичке хемије

Наслов рада: Оптимизација конверзионих модела за израчунавање интензитета ерозије земљишта на основу активности радиоизотопа  $^{137}\text{Cs}$

Ментори:

др Шћепан Миљанић, редовни професор, Факултет за физичку хемију, Универзитет у Београду

др Снежана Драговић, научни саветник, Институт за нулеарне науке Винча, Универзитет у Београду

Потписани/а Јелена М. Петровић

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла 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,

\_\_\_\_\_

### Prilog 3.

## Изјава о коришћењу

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

Оптимизација конверзионих модела за израчунавање интензитета ерозије земљишта на основу активности радиоизотопа <sup>137</sup>Cs

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла 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 одлучио/ла.

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,

\_\_\_\_\_

## Biografija kandidata

Jelena (Miodrag) Petrović je rođena 16. novembra 1987. godine u Beloj Crkvi. Završila je gimnaziju „Jovan Cvijić” u Beloj Crkvi 2006. godine.

Osnovne akademske studije na Fakultetu za fizičku hemiju, Univerzitet u Beogradu, završila je dana 26. novembra 2010. godine. Master studije završila je na Fakultetu za fizičku hemiju, Univerzitet u Beogradu, dana 11. novembra 2011. godine odbranom master rada pod nazivom „Prostorna distribucija  $^{137}\text{Cs}$  u zemljištima Beograda”. U toku školske 2011/2012. godine, upisala je doktorske studije na matičnom fakultetu.

U periodu od 01. januara 2012. do 30. aprila 2016. godine radila je kao istraživač-pripravnik a potom i istraživač-saradnik u Institutu za primenu nuklearne energije - INEP, Univerzitet u Beogradu, u Odeljenju za radioekologiju i agrohemiju.

Od 01. maja 2016. godine Jelena M. Petrović zaposlena je kao istraživač-saradnik u Institutu za nuklearne nauke „Vinča”, Univerzitet u Beogradu, u Laboratoriji 060 za hemijsku dinamiku i permanentno obrazovanje.

Od 01. januara 2012. godine angažovana je na projektu Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoj Republike Srbije pod nazivom „Nove tehnologije za monitoring i zaštitu životnog okruženja od štetnih hemijskih supstanci i radijacionog opterećenja”, evidencioni broj III43009.

Istraživački rad Jelene Petrović odvija se uglavnom u oblasti radiohemije/radioekologije i odnosi se na: ispitivanje vertikalne i horizontalne distribucije radionuklida i teških metala u zemljištu; proučavanje uticaja fizičko-hemijskih karakteristika zemljišta na distribuciju teških metala i radionuklida; i ispitivanje intenziteta erozije zemljišta na osnovu aktivnosti radioizotopa  $^{137}\text{Cs}$ .

U toku svog dosadašnjeg rada imala je priliku da učestvuje na različitim obukama:

- MAAE, RER/9/122 - Supporting Safe Management of Uranium Production Legacy Sites, Regional Workshop on Developing Environmental Impact Assessments (DEIA) for Uranium Production Legacy Sites (UPLS), Sofija, Bugarska, 12-15. novembar 2012.

- Low Dose Research towards Multidisciplinary Integration - DOREMI i Strategy for Allied Radioecology - STAR, Environmental Radiobiology, The Norwegian University of Life Sciences (UMB), Oslo, Norveška, 24-28. jun 2013. godine;
- MAAE, RER/9/122 - Supporting Safe Management of Uranium Production Legacy Sites, Regional Workshop on Completion Reports for Uranium Production Legacy Sites, Beč, Austrija, 11-13. decembar 2013. godine;
- MAAE, RER/9/122 - Supporting Safe Management of Uranium Production Legacy Sites, Regional Workshop on Long Term Monitoring and Surveillance Plans (LTSP) for Uranium Production Legacy Sites (UPLS), Bessines sur Gartempe, Francuska, 12-15. maj 2014. godine;
- MAAE i Argonne National Laboratory, The Theory and Practical Application of RESRAD-BIOTA and Other Codes in the RESRAD Family for the Determination of Dose, Risk and Authorized Limits at Radioactively Contaminated Sites, Čikago, Illinois, SAD, 6-17. oktobar 2014. godine;
- MAAE, RER/9/121 - Supporting Remediation in European Member States, Regional Workshop on Technology Selection and Deployment in Environmental Remediation Projects, Obninsk, Rusija, 10-14. novembra 2014. godine.

## **Naučni doprinos kandidata:**

### ***M13 - Monografska studija/poglavlje u knjizi M11 ili rad u tematskom zborniku vodećeg međunarodnog značaja***

1. Snežana Dragović, Mirjana Čujić, Jelena Petrović, Ranko Dragović, Milan Đorđević and Ljiljana Janković-Mandić, *Biomonitoring of Atmospheric Pollution using Mosses: Recent Developments and Future Prospects*, In: Moss: Classification, Development and Growth and Functional Role in Ecosystems, J. Mohamed (Eds.), Nova Science Publishers, Inc., ISBN: 978-1-63117-396-7, New York, USA, 2014, pp. 171-197.
2. Ljiljana Janković-Mandić, Maja Đolić, Jelena Petrović, Mirjana Čujić and Snežana Dragović, *Mosses as Biomonitors of Atmospheric Pollution: Review of Methodologies*, In: Advances in Environmental Research, Justin A. Daniels (Eds.), Nova Science Publishers, Inc., ISBN 978-1-63463-602-5, New York, USA, 2015, pp. 159-178.
3. Snežana Dragović, Jelena Petrović, Ranko Dragović, Milan Đorđević, Mrđan Đokić, and Boško Gajić, *The Influence of Edaphic Factors on Spatial and Vertical Distribution of Radionuclides in Soil*, In: Radionuclides in the Environment Influence of chemical speciation and plant uptake on radionuclide migration, C. Walther, D.K. Gupta (Eds.), Springer International Publishing, ISBN 978-3-319-22170-0, Switzerland 2015, pp. 61-80.

### ***M21 - Rad vrhunskom međunarodnom časopisu***

1. Jelena Petrović, Snežana Dragović, Ranko Dragović, Milan Đorđević, Mrđan Đokić and Mirjana Čujić, *Spatial and vertical distribution of <sup>137</sup>Cs in soils in the erosive area of southeastern Serbia (Pčinja and South Morava River Basins)*, Journal of Soils and Sediments, 2016, 16:1168-1175.

### ***M22 - Rad u istaknutom međunarodnom časopisu***

1. Jelena Petrović, Mirjana Čujić, Milan Đorđević, Ranko Dragović, Boško Gajić, Šćepan Miljanić and Snežana Dragović, *Spatial distribution and vertical migration of*



*<sup>137</sup>Cs in soils of Belgrade (Serbia) 25 years after the Chernobyl accident*, Environmental Science Processes & Impacts, 2013, 15(6), 1279-1289.

2. Jelena Petrović, Snežana Dragović, Ranko Dragović, Milan Đorđević, Mrđan Đokić, Bojan Zlatković and Desmond Walling, *Using <sup>137</sup>Cs measurements to estimate soil erosion rates in the Pčinja and South Morava River Basins, southeastern Serbia*, Journal of Environmental Radioactivity, 2016, 158-159:71-80.

#### **M51 - Rad u vodećem časopisu nacionalnog značaja**

1. Ljiljana Janković-Mandić, Jelena Petrović, Mirjana Čujić, Ranko Dragović, Milan Đorđević, Milena Nikolić and Snežana Dragović, *Content of <sup>137</sup>Cs in soil of Belgrade with assessment of corresponding absorbed dose rate*, Ecologica, 2014,76, 800-804.

#### **M45 - Poglavlje u knjizi M42 ili rad u tematskom zborniku nacionalnog značaja**

1. Mirjana Čujić, Ana Čučulović, Jelena Petrović and Snežana Dragović, *Analysis of the activity concentrations of <sup>137</sup>Cs in mushrooms from the territory of Serbia after Chernobyl accident until today*, U: Černobilj 30 godina posle, G. Pantelić (Urednik), Štamparija Instituta za nuklearne nauke „Vinča”, ISBN 978-86-7306-138-2, Beograd, Srbija, 2016., pp. 145-154.
2. Jelena Petrović, Ljiljana Janković-Mandić, Mirjana Čujić and Snežana Dragović, *Spatial and vertical distribution of <sup>137</sup>Cs in the soil of Serbia*, U: Černobilj 30 godina posle, G. Pantelić (Urednik), Štamparija Instituta za nuklearne nauke „Vinča”, ISBN 978-86-7306-138-2, Beograd, Srbija, 2016., pp. 175-185.

#### **M33 - Saopštenje sa međunarodnog skupa štampano u celini**

1. Heleny Florou, Snežana Dragović, Georgia Trabidou, Mirjana Čujić, Panayotis Kritidis, Jelena Petrović, Maria Sotiropoulou and Jovan Kovačević, *Comparative radiological impact assessment in areas of elevated natural radioactivity in Greece and Serbia*, 11<sup>th</sup> International Conference on Fundamental and Applied Aspects of Physical Chemistry, Belgrade, Serbia, September 24-28, 2012, Proceedings, pp. 645-647, ISBN 978-86-82475-28-6 (Volume II).
2. Mirjana Čujić, Jelena Petrović, Milan Đorđević, Ranko Dragović and Snežana Dragović, *The radiological hazard due to naturally occurring radionuclides in soil*

*around thermoelectric power plant*, The Second International Conference on Radiation and Dosymetry in Various Fields of Research, RAD 2014, Niš, Serbia, May 27-30, 2014, Proceedings, pp. 87-90, ISBN 978-86-6125-101-6.

3. Jelena Petrović, Ranko Dragović, Boško Gajić, Mirjana Čujić and Snežana Dragović, *Vertical distribution pattern of  $^{137}\text{Cs}$  in undisturbed arenosoils of Banat Sands, Serbia*, The Second International Conference on Radiation and Dosymetry in Various Fields of Research, RAD 2014, Niš, Serbia, May 27-30, 2014, Proceedings, pp. 231-234, ISBN 978-86-6125-101-6.
4. Jelena Petrović, Ranko Dragović, Milan Đorđević, Mrđan Đokić, Milena Nikolić, Mirjana Čujić and Snežana Dragović, *Vertical distribution of  $^{137}\text{Cs}$  in the undisturbed soil profiles in the basin of Pčinja River, southeastern Serbia*, 12<sup>th</sup> International Conference on Fundamental and Applied Aspects of Physical Chemistry, Belgrade, Serbia, September 22-26, 2014, Proceedings, pp. 877-880, ISBN 978-86-82475-32-3.
5. Mirjana Čujić, Jelena Petrović, Ljiljana Janković-Mandić and Snežana Dragović, *Assessment of heavy metal content in soils of some urban and rural environments in Serbia*, 13<sup>th</sup> International Conference on Fundamental and Applied Aspects of Physical Chemistry, Belgrade, Serbia, September 26-30, 2016, Proceedings, Volume II, pp. 707-710, ISBN 978-86-82475-33-0.

### **M63 - Saopštenje sa skupa nacionalnog značaja štampano u celini**

1. Jelena Petrović, Ljiljana Janković-Mandić, Mirjana Čujić and Snežana Dragović, *External effective gamma dose rates originating from  $^{137}\text{Cs}$  in surface soils of Belgrade urban area*, XXVII Symposium Society for Radiation Protection of Serbia and Montenegro, Vrnjačka Banja, Serbia, October 2-4, 2013, Proceedings, pp. 80-82, ISBN 978-86-7306-115-3.
2. Mirjana Čujić, Jelena Petrović and Ana Čučulović, *Gamaspectrometry analysis of radionuclides in aerosol sample for the purposes of interlaboratory comparison*, XXVIII Symposium Society for Radiation Protection of Serbia and Montenegro, Vršac, Serbia, 30 September - 02 October, 2015, Proceedings, pp. 487-491, ISBN 978-86-7306-135-1.