

Друштво за заштиту од зрачења Србије и Црне Горе

**Монографија**  
**ЧЕРНОБИЉ**  
**30 година после**

Уредник  
др Гордана Пантелић

Београд  
2016

Монографија: **ЧЕРНОБИЉ 30 година после**

Издавач: Институт за нуклеарне науке „Винча“, Лабораторија за заштиту од зрачења и заштиту животне средине „Заштита“  
Друштво за заштиту од зрачења Србије и Црне Горе

За издавача: др Борислав Грубор

Рецензенти: др Оливера Цирај Бјелац  
др Иштван Бикит  
др Владимир Удовичић  
др Невенка Антовић  
др Ивана Вуканац  
др Драгослав Никезић  
др Душан Мрђа  
др Марија Јанковић  
др Јелена Крнета Николић

Уредник: др Гордана Пантелић

Лектор/коректор: Мариола Пантелић, MSc

Објављивање монографије помогли:  
Министарство просвете, науке и технолошког развоја

ISBN 978-86-7306-138-2

Штампа: Штампарија Института за нуклеарне науке „Винча“, 522,  
11001 Београд, Тел. 011-8066-746

Тираж: 150 примерака

# PROSTORNA I VERTIKALNA DISTRIBUCIJA $^{137}\text{Cs}$ U ZEMЉIŠTU SRBIJE

**Jelena PETROVIĆ, Ljiljana JANKOVIĆ-MANDIĆ, Mirjana ČUJIĆ i Snežana DRAGOVIĆ**

*Univerzitet u Beogradu, Institut za nuklearne nauke Vinča, Beograd, Srbija  
petrovicj@vinca.rs*

## Rezime

*U ovom radu prikazane su specifične aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  u zemljištu Srbije u periodu od 2006. do 2014. godine. Predstavljena je prostorna distribucija ovog radionuklida, distribucija po dubini zemljišnog profila za različite tipove zemljišta i veza sa fizičko-hemijskim karakteristikama zemljišta. Ovi rezultati daju uvid u glavne faktore koji utiču na migraciju  $^{137}\text{Cs}$  u zemljištu, što doprinosi saznanjima o ponašanju ovog radionuklida u životnoj sredini i faktorima koji regulišu njegovu mobilnost unutar kopnenih ekosistema.*

## 1. UVOD

U toku nadzemnih proba nuklearnog oružja (od 1950. do 1970. godine, čiji je maksimum dostignut 1963. godine) i nuklearnih akcidenata u Černobilju, tadašnji SSSR, (1986. godine) i Fukušimi, Japan, (2011. godine), značajne količine  $^{137}\text{Cs}$  dospele su u životnu sredinu. U toku černobiljskog akcidenta  $^{137}\text{Cs}$  nije dospeo do gornjih slojeva atmosfere i nije ostao dovoljno dugo u vazduhu da bi se cirkulacijom vazдушnih masa distribuirao u sve delove sveta. Depozicija se dogodila u ograničenom vremenskom periodu od svega nekoliko nedelja nakon akcidenta. Naveći deo  $^{137}\text{Cs}$  deponovan je direktno sa padavinama (vlažna depozicija), dok je mnogo manji deo deponovan suvom depozicijom. Distribucija  $^{137}\text{Cs}$  odražava se nepravilnom distribucijom kišnih padavina, u kratkom periodu nakon černobiljskog akcidenta. Nakon akcidenta radioaktivnim oblakom zahvaćena je i teritorija Srbije. Prema podacima iz 1986. godine srednja vrednost aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  u zemljištu na teritoriji SFRJ iznosila je  $13940 \text{ Bq/m}^2$ , krećući se od  $766 \text{ Bq/m}^2$  u zoni minimalne kontaminacije do  $83400 \text{ Bq/m}^2$  u zoni maksimalne kontaminacije [1]. Nivo aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  u zemljištu Srbije pre 1986. godine bio je manji od  $5 \text{ Bq/kg}$ , dok se u najvećem broju biljaka, izuzev mahovina i lišajeva, nije mogao detektovati [2]. Značajne depozicije  $^{137}\text{Cs}$  nakon havarije u nuklearnoj elektrani u Fukušimi 2011. godine u Srbiji nije bilo [3].

Cezijum-137 je veoma značajan veštački radionuklid u životnoj sredini zbog dugog vremena poluraspada od oko 30 godina i ponašanja analognom kalijumu u biološkim sistemima. U zemljište  $^{137}\text{Cs}$  dospeva procesima suve i vlažne depozicije iz atmosfere. Na distribuciju  $^{137}\text{Cs}$  u zemljištu utiče veliki broj faktora, kao što su: količina i intenzitet padavina, fizičko-hemijske karakteristike zemljišta (sadržaj organskih materija, pH, poroznost i mehanički sastav zemljišta i dr.), tip zemljišta, vegetacioni pokrivač, hemijski oblik u kome se deponovani cezijum nalazi, kao i veliki broj bioloških faktora [4]. Dosadašnja istraživanja pokazala su da se  $^{137}\text{Cs}$  vezuje uglavnom za površinski sloj zemljišta (do 10 cm) odakle migrira ka dubljim slojevima, kao i da se njegova aktivnost smanjuje sa dubinom zemljišta [5-10]. Opadanje koncentracije  $^{137}\text{Cs}$  sa dubinom

zemljišta je veoma spor process i procenjuje se da brzina migracije  $^{137}\text{Cs}$  kroz profile zemljišta iznosi 0,1-1 cm godišnje [11].

Cilj rada je analiza distribucije  $^{137}\text{Cs}$ , prostorne i po dubini zemljišnog profila; i korelacija  $^{137}\text{Cs}$  sa fizičko-hemijskim karakteristikama zemljišta.

## 2. MATERIJAL I METODE

### 2.1. Istraživani prostor

Specifične aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  (Bq/kg) određene su u uzorcima neobradivog zemljišta sakupljenog sa različitih prostora Srbije u periodu od 2006. do 2014. godine:

- sa teritorije grada Beograda, u periodu od 2006. do 2010. godine, do dubine od 10 cm [11] i u maju 2008. godine, do dubine od 50 cm (sa inkrementom od 5 cm) [12];
- u okolini termoelektrane „Nikola Tesla”, opština Obrenovac, u periodu od 2011. do 2013. godine, do dubine od 20 cm (sa inkrementom od 10 cm);
- sa teritorije grada Subotice, u toku 2013. godine, do dubine od 10 cm; i
- sa teritorije jugoistočne Srbije, slivovi reka Pčinje i Južne Morave, u periodu od 2013. do 2014. godine, do dubine od 20 cm (sa inkrementom od 5 cm).
- 

### 2.2. Eksperimentalne analize

U laboratoriji uzorci zemljišta su očišćeni (od kamenčića i delova biljnog materijala), sušeni do konstantne mase, homogenizovani, prosejani kroz sito sa otvorima prečnika 2 mm i zapakovani u Marineli posude. Specifična aktivnost  $^{137}\text{Cs}$  (661,66 keV) određena je korišćenjem gamaspektrometra ORTEC-AMETEK sa 8192 kanala, rezolucije 1,85 i relativne efikasnosti 34% na 1,33 MeV za  $^{60}\text{Co}$ . Za obradu spektara korišćen je softver Gamma Vision-32 [13].

Za određivanje mehaničkih frakcija zemljišta, korišćena je metoda pipetiranja [14-15]. Vrednost pH i specifična električna provodljivost određene su iz suspenzije zemljište-voda u odnosu 1:5 na instrumentu WTW inoLab pH/Cond 720 [16-17]. Sadržaj ukupnog organskog ugljenika određen je prema modifikovanoj metodi Tjurina rastvorom Morove soli [18-19]. Sadržaj humusa određen je metodom Walkley-Black [20]. Količina karbonata određena je volumetrijski koristeći Šajblerov kalcimetar [21]. Ukupni kapacitet izmene katjona u zemljištu određen je kao suma hidrolitičke kiselosti i adsorbovanih baznih katjona [22]. Suva zapreminska gustina zemljišta određena je korišćenjem cilindra poznate zapremine ( $100\text{ cm}^3$ ) [23]. Gustina čestica određena je korišćenjem piknometra [23]. Za određivanje zasićene hidraulične provodljivosti korišćena je metoda Klutea i Dirksena (1986) [24].

## 3. REZULTATI I DISKUSIJA

### 3.1. Specifična aktivnost $^{137}\text{Cs}$ u zemljištu različitih prostora Srbije

Deskriptivna statistika specifične aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  (Bq/kg) u uzorcima zemljišta sakupljenih sa različitih prostora Srbije u periodu od 2006. do 2014. godine prikazana je u tabeli 1. Najveće vrednosti specifične aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  nađene su u zemljištu (do 20 cm dubine) sakupljenom sa prostora jugoistočne Srbije, odnosno u slivovima reka Pčinje i Južne Morave, dok su najniže vrednosti nađene u zemljištu (do 10 cm dubine) sakupljenom sa teritorije grada Subotice (tabela 1).

Janković-Mandić i sar. (2014) uočili su izraženu prostornu varijabilnost specifičnih aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  u uzorcima zemljišta do 10 cm dubine sakupljenog sa teritorije grada Beograda u periodu od 2006. do 2010. godine [11]. Specifične aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  varirale su u opsegu od 3,0 Bq/kg (Bežanija i Senjak) do 87 Bq/kg (Kosmaj), dok je srednja vrednost iznosila 23 Bq/kg (tabela 1). Znatno više vrednosti specifične aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  nađene su u uzorcima zemljišta iz južnog dela grada (na prostoru oko Kosmaja i Avale), u odnosu na uzorke iz severozapadnog dela grada (na prostoru opština Bežanija, Novi Beograd, Surčin) (slika 1). Janković-Mandić i sar. (2014) ukazali su da uočena prostorna varijabilnost  $^{137}\text{Cs}$  na teritoriji grada Beograda može biti posledica topografskih razlika, nehomogene površinske kontaminacije zemljišta posle černobiljskog akcidenta, prostornih razlika u fizičko-hemijskim i biološkim osobinama zemljišta, tipu zemljišta, kao i biljnom pokrivaču [11]. Nešto niža srednja vrednosti specifične aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  od 19 Bq/kg dobijena je u studiji Dragović i sar. (2012) za zemljište sakupljeno do 50 cm dubine sa teritorije Beograda [12]. Na uočene razlike u vrednostima specifičnih aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  prikazanim u studijama Janković-Mandić i sar. (2014) i Dragović i sar. (2012) pored gore navedenih faktora može uticati i razlika u dubini uzorkovanja zemljišta [11-12]. Slične vrednosti specifične aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  dobijene su u okviru sistematskog ispitivanja sadržaja radionuklida u toku 2007. godine u neobradivom zemljištu u Beogradu, gde je srednja vrednost specifične aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  iznosila 27 Bq/kg, opseg: od 4 (Dunavac) do 52 Bq/kg (Zeleno brdo) [25].

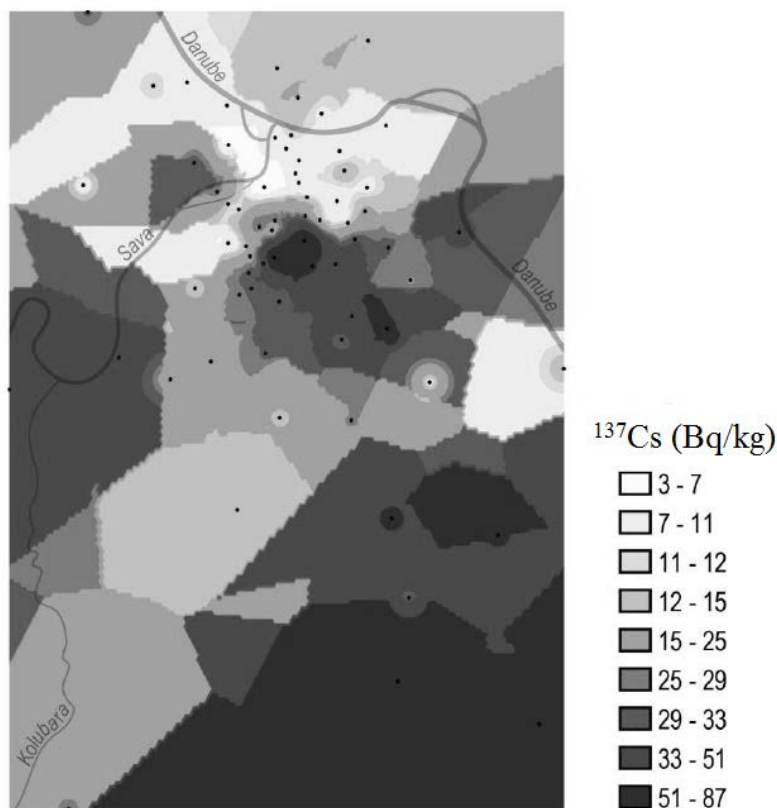
**Tabela 1. Deskriptivna statistika specifične aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  (Bq/kg) u uzorcima zemljišta sakupljenog sa teritorije Srbije u periodu 2006-2014. godine**

	Beograd 2006-2010. godina [11]	Beograd maj 2008. godina [12]	Termoelektrana „Nikola Tesla” 2011-2013. godina	Subotica 2013. godina	Jugoistočna Srbija 2013-2014. godina
Parametar	0-10 cm	0-50 cm	0-20 cm	0-10 cm	0-20 cm
Srednja vrednost	23	19	29	2,6	46
Standardna devijacija	20	33	21	1,4	48
Medijana	15	4,4	26	2,9	27
Opseg	84	160	91	4,1	183
Mod	11	0,5	2,8	0,8	0,4
Minimum	3,0	0,3	2,8	0,8	0,4
Maksimum	87	160	94	4,9	184

Srednja vrednost specifične aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  u uzorcima neobradivog zemljišta sakupljenog na prostoru oko termoelektrane „Nikola Tesla” u periodu od 2011. do 2013. godine iznosila je 29 Bq/kg, u opsegu od 2,8 do 94 Bq/kg (tabela 1). Na istraživanom prostoru uočena je heterogena distribucija  $^{137}\text{Cs}$  u zemljištu (slika 2) [26], što je tipična distribucija za supstancije antropogenog porekla.

Srednja vrednost specifične aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  u analiziranim uzorcima neobradivog zemljišta sakupljenog sa teritorije grada Subotice u toku 2013. godine iznosila je 2,6 Bq/kg, u opsegu od 0,8 do 4,9 Bq/kg (tabela 1). Dobijeni rezultati u skladu su sa vrednostima specifičnih aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  na Paliću (8,3 Bq/kg) i Horgošu (1,1 Bq/kg) [27]. Dobijene niže vrednosti specifične aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  u zemljištu na teritoriji grada

Subotice u poređenju sa vrednostima specifičnih aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  za druge delove Srbije prikazanim u ovom radu (tabela 1) mogu biti posledica manje kontaminacije severnog dela Srbije nakon černobiljskog akcidenta.

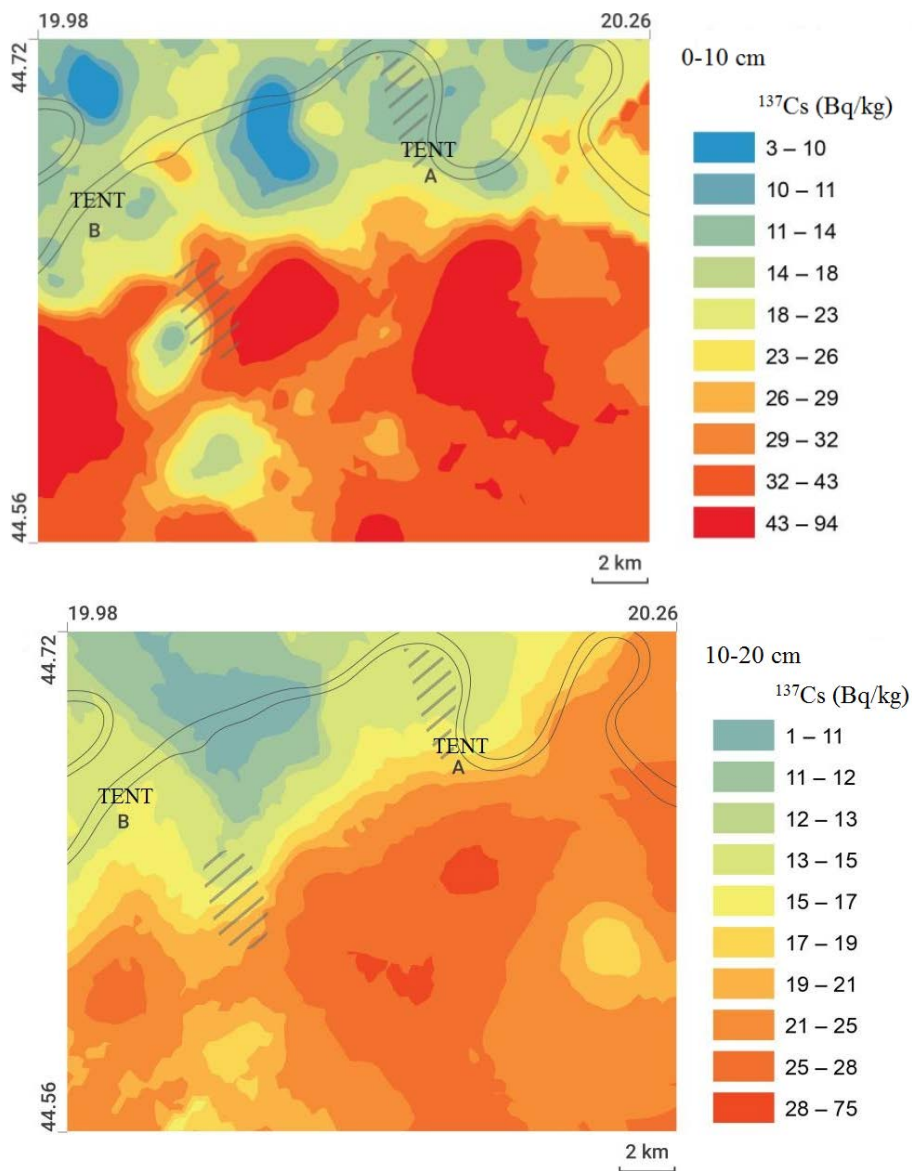


Slika 1. Prostorna distribucija specifičnih aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  (Bq/kg) u zemljištu Beograda [11]

Srednja vrednost specifične aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  u uzorcima neobradivog zemljišta sakupljenog sa prostora jugoistočne Srbije, slivovi reka Pčinje i Južne Morave, u periodu od 2013. do 2014. godine iznosila je 46 Bq/kg u opsegu od 0,4 do 184 Bq/kg (tabela 1). Srednja vrednost  $^{137}\text{Cs}$  od 36 Bq/kg dobijena je u zemljištu (do 30 cm dubine) zapadne Srbije [28]. Slična vrednost specifične aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  od 40 Bq/kg dobijena je u studiji Milenkovic i sar. (2015) za zemljište (do 10 cm dubine) sakupljeno sa teritorije grada Kragujevca, centralna Srbija [29]. U toku 2003. godine uzorci površinskog zemljišta (do 5 cm dubine) sakupljeni su sa područja Srbije i Crne Gore, srednja vrednost  $^{137}\text{Cs}$  iznosila je 48,3 Bq/kg, u opsegu od 5,25 do 112 Bq/kg [30], što je u skladu sa vrednostima dobijenim za zemljište jugoistočne Srbije. Istraživani prostor jugoistočne Srbije zahvaćen je intenzivnom vodnom erozijom, pa tako procesi akumulacije i erozije zemljišta mogu značajno uticati na prostornu varijabilnost  $^{137}\text{Cs}$  u zemljištu istraživanog prostora.

Uočene prostorne razlike u specifičnim aktivnostima  $^{137}\text{Cs}$  u zemljištu mogu biti posledice velikog broja faktora, kao što su: razlike u topografiji terena, nehomogene površinske kontaminacije zemljišta posle černobiljskog akcidenta (usled razlika u količini i vrsti padavina), većih i manjih prostornih razlika u fizičko-hemijskim i

biološkim osobinama zemljišta, tipu zemljišta i biljnom pokrivaču, uticaja mikro i mezo-topografiji u kontrolisanju redistribucije  $^{137}\text{Cs}$  procesima erozije ili akumulacije, dejstva antropogenih aktivnosti (aktivnosti životinja i ljudi), kao i razlika u dubini i godini uzorkovanja zemljišta.



Slika 2. Prostorna distribucija specifičnih aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  (Bq/kg) u zemljištu (na dubinama: 0-10 cm i 10-20 cm) u okolini termoelektrane „Nikola Tesla” [26]

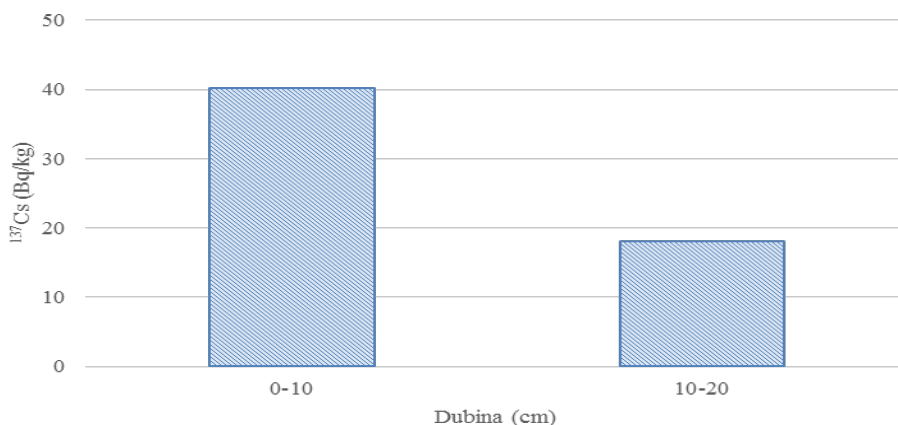
### 3.2. Vertikalna distribucija $^{137}\text{Cs}$ u zemljištu različitih prostora Srbije

U ispitivanim profilima zemljišta Beograda, Dragović i sar. (2012) ukazali su na opadanje specifične aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  sa dubinom zemljišta [12]. U površinskom sloju (0-5 cm) specifične aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  su varirale su u opsegu od 8,3 do 160 Bq/kg, dok su

u sloju od 5-10 cm varirale u opsegu od 8,4 do 120 Bq/kg [12]. Na dubini do 10-15 cm nađene su najveće vrednosti specifičnih aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$ , ovakav rezultat u skladu je sa velikim brojem studija koje su pokazale da se  $^{137}\text{Cs}$  najvećim delom zadržava u površinskom sloju zemljišta [30-32]. Antović i sar. (2012) su na osnovu analiza uzoraka neobradivog zemljišta sakupljenog sa teritorije Crne Gore ukazali na trend opadanja specifične aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  sa dubinom zemljišta, u površinskom sloju 0-5 cm našli su veliki opseg specifične aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  od 1,82 do 413,25 Bq/kg, dok je srednja vrednost iznosila 81,11 Bq/kg [33]. Gaspar i Navas (2013) pokazali su da se više od 80% ukupne aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  nalazi u sloju dubine do 12 cm [34].

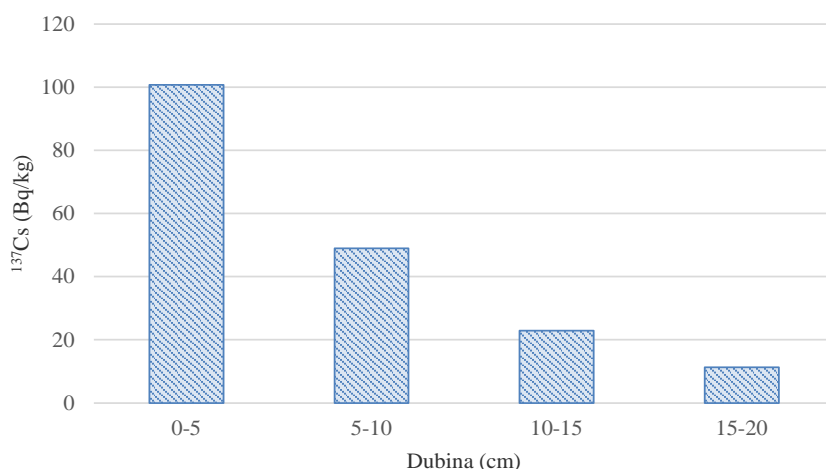
Na slikama 3 i 4 prikazana je vertikalana distribucija  $^{137}\text{Cs}$  u neobradivom zemljištu u okolini termoelektrane „Nikola Tesla” i jugoistočnoj Srbiji, redom. Jasno se uočava tendencija opadanja nivoa specifične aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  sa povećanjem dubine zemljišta, najviše vrednosti specifične aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  nađene su u površinskom sloju zemljišta, dok su najmanje vrednosti izmerene u dubljim slojevima sa uočenim trendom eksponencijalnog opadanja specifične aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$ .

Ispitivanjem vertikalne raspodele specifične aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  u zemljištu utvrđeno je da se do 1996. godine černobiljski cezijum zadržao u prvih 15 cm zemljišta [2]. Na osnovu dubine na kojoj se nalazi najveća koncentracija  $^{137}\text{Cs}$  i njegove vertikalne raspodele u zemljištu istraživanih prostora Srbije (slika 3 i 4) može se pretpostaviti da je detektovani  $^{137}\text{Cs}$  najvećim delom poreklom iz černobiljskog akcidenta.



**Slika 3. Vertikalna distribucije specifičnih aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  (Bq/kg) u zemljištu u okolini termoelektrane „Nikola Tesla”**





Slika 4. Vertikalna distribucije specifičnih aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  (Bq/kg) u zemljištu jugoistočne Srbije

### 3.3. Korelaciona analiza

Dragović i sar. (2012) ukazali su na pozitivnu korelaciju između  $^{137}\text{Cs}$  i frakcija zemljišta fine strukture - praha i gline (tabela 2) [12]. Na brzinu migracije  $^{137}\text{Cs}$  u profilima zemljišta utiče relativni odnos frakcija peska i gline u zemljištu. U peskovitom zemljištu  $^{137}\text{Cs}$  migrira brže, dok je u glinovitom zemljištu njego migracija usporena usled smanjene brzine infiltriranja u slojevima gline i njenog većeg kapaciteta izmene [4]. Radionuklidi se adsorbuju na površini gline ili se ugrađuju u njenu kristalnu rešetku. Adsorpcija je visoko specifična, naročito na mineralima ilita, koji sadrže mali procenat defekata unutar kristalne strukture, koja imaju veliki afinitet prema  $^{137}\text{Cs}$  [35]. Značajne pozitivne korelacije su takođe utvrđene između specifične aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  i sledećih karakteristika zemljišta: sadržaja organskih materija, kapaciteta izmene katjona, zasićene hidraulične i specifične električne provodljivosti (tabela 2) [12]. Za adsorpciju  $^{137}\text{Cs}$  organske materije u zemljištu imaju važnu ulogu, ova adsorpcija je nespecifična i zavisi od katjonskog izmenjivog kapaciteta organskih materija, u poređenju sa specifičnom adsorpcijom  $^{137}\text{Cs}$  na glini [34,36]. Prisustvo organskih kiselina iz organske frakcije zemljišta dovodi do povećanja negativnog naelektrisanja zemljišnih koloida dok se pozitivno naelektrisanje smanjuje. Gaspar i Navas (2013), Navas i sar. (2011) i Milenković i sar. (2015) su ukazali na pozitivnu korelaciju između  $^{137}\text{Cs}$  i organskih materija u zemljištu [29, 34, 37].

Spirmanovim korelacionim testom ispitane su korelacije između  $^{137}\text{Cs}$  i fizičko-hemijskih karakteristika u analiziranim uzorcima zemljišta u okolini termoelektrane „Nikola Tesla” (tabela 3). Značajna pozitivna korelacija dobijena je između sadržaja praha i specifične aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  u zemljištu, što je u skladu sa rezultatima Dragović i sar. (2012) (tabela 2). Negativna korelacija je uočena između sadržaja gline i  $^{137}\text{Cs}$  u zemljištu. Vukašinović i sar (2013) ukazali su na negativnu korelaciju između sadržaja gline i specifične aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  u obradivom zemljištu [38]. Gaspar i Navas (2012) su ukazali na negativnu korelaciju između specifične aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  i gline u obradivom zemljištu, dok u neobradivom zemljištu nisu uočili značajnije korelacije [34]. Spirmanovim korelacionim testom takođe su ispitane korelacije između

$^{137}\text{Cs}$  i fizičko-hemijskih karakteristika analiziranih uzoraka zemljišta sa teritorije jugoistočne Srbije (tabela 3). Pozitivna korelacija nađena je između specifične aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  i sledećih karakteristika zemljišta: sitnog peska, sadržaja organskih materija i specifične električne provodljivosti, dok je negativna korelacija uočena između sadržaja gline i specifične aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  u zemljištu (tabela 3).

**Tabela 2. Pirsonov korelacioni koeficijent između  $^{137}\text{Cs}$  i fizičko-hemijskih karakteristika zemljišta u uzorcima sakupljenim sa teritorije grada Beograda u toku maja 2008. godine [12]**

Parametar	$^{137}\text{Cs}$
Pesak	0,01
Prah	0,28 <sup>b</sup>
Glina	0,29 <sup>b</sup>
pH	-0,13
Sadržaj organskih materija	0,73 <sup>a</sup>
Kapacitet izmene katjona	0,41 <sup>a</sup>
Karbonati	-0,13
Zapreminska gustina	-0,52 <sup>a</sup>
Gustina čestica	-0,61 <sup>a</sup>
Zasićena hidraulična provodljivost	0,68 <sup>a</sup>
Specifična električna provodljivost	0,61 <sup>a</sup>

<sup>a</sup>Korelacija značajna na nivou 0,01

<sup>b</sup>Korelacija značajna na nivou 0,05

**Tabela 3. Spirmanov korelacioni koeficijent između  $^{137}\text{Cs}$  i fizičko-hemijskih karakteristika zemljišta sakupljenog u okolini termoelektrane „Nikola Tesla” (2011-2013. godine) i sa teritorije jugoistočne Srbije ( 2013-2014. godine)**

Parametar	Termoelektrana	Jugoistočna Srbija
	„Nikola Tesla”	$^{137}\text{Cs}$
Krupan pesak	-	-0,07
Sitan pesak	-	0,44 <sup>a</sup>
Pesak	0,05	-
Prah	0,45 <sup>a</sup>	-0,03
Glina	-0,41 <sup>a</sup>	-0,38 <sup>a</sup>
pH	-0,13	-0,21
Ukupan organski ugljenik	0,11	-
Sadržaj organskih materija	-	0,59 <sup>a</sup>
Kapacitet izmene katjona	-0,04	-0,06
Karbonati	-0,20	-0,20
Specifična električna provodljivost	-0,02	0,23 <sup>b</sup>

<sup>a</sup>Korelacija značajna na nivou 0,01

<sup>b</sup>Korelacija značajna na nivou 0,05

Ponašanje radionuklida u zemljištu zavisi kako od njegovih osnovnih svojstava tako i od fizičko-hemijskih karakteristika zemljišta. Kompleksnost interakcija se povećava usled

velikog broja procesa koji se dešavaju istovremeno i njihove zavisnosti od uslova životne sredine. Razlike u ponašanju  $^{137}\text{Cs}$  u zemljištima različitih prostora posledica je razlika u tipu zemljišta i uslovima životne sredine.

Studije uticaja edafskih faktora na prostornu i vertikalnu distribuciju  $^{137}\text{Cs}$  u zemljištu su od velikog značaja, jer doprinose razumevanju njegovog ponašanja u zemljištu ali i proceni rizika za stanovništvo i životnu sredinu.

#### 4. ZAKLJUČAK

U analiziranim uzorcima zemljišta sakupljenim sa različitih prostora Srbije (Beograd, okolina temoelektrane „Nikola Tesla”, opština Obrenovac, Subotica i jugoistočna Srbija, slivovi reka Pčinje i Južne Morave) u periodu od 2006. do 2014. godine utvrđeno je prisustvo  $^{137}\text{Cs}$ . Dobijeni rezultati ukazuju da se  $^{137}\text{Cs}$  nalazi u zemljištu Srbije, više od dve decenije nakon akcidenta na nuklearnoj elektrani Lenjin u Černobilju.

Analiza korelacija specifične aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  i fizičko-hemijskih karakteristika zemljišta ukazuju na veoma kompleksan proces njegovog ponašanja u zemljišnim ekosistemima, čemu doprinosi veliki broj fizičkih, hemijskih i bioloških karakteristika zemljišta i faktora životne sredine.

#### Napomena

Autori se zahvaljuju prof. Ranku Dragoviću, Milanu Đorđeviću i dr Mrđanu Đokiću (Prirodno-matematički fakultet Univerziteta u Nišu), za pomoć prilikom planiranja istraživanja i geostatističke analize rezultata, i prof. Bošku Gajiću (Poljoprivredni fakultet Univerziteta u Beogradu) za pomoć u analizi mehaničkih frakcija uzoraka zemljišta. Ovaj rad je podržan od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije (III43009).

#### 5. LITERATURA

- [1] Nivoi radioaktivne kontaminacije čovekove sredine i ozračenost stanovništva Jugoslavije 1986. godine usled havarije nuklearne elektrane u Černobilju. *Savezni komitet za rad, zdravlje i socijalnu zaštitu*. Beograd, 1987.
- [2] D. Popović and V. Spasić-Jokić. Posledice nuklearne nesreće u Černobilju, na teritoriji Republike Srbije. *Vojnosanit. Pregl.* 63 (2006) 481-487.
- [3] 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. *J. Environ. Radioact.* 114 (2012) 89-93.
- [4] P. L. Nimis. Radiocesium in plants of forest ecosystems. *Studia Geobot.* 15 (1996) 3-49.
- [5] D. Krstić, D. Nikezić, N. Stevanović and M. Jelić. Vertical profile of  $^{137}\text{Cs}$  in soil. *Appl. Radiat. Isot.* 61 (2004) 1487-1492.
- [6] 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. *J. Environ. Radioact.* 55 (2001) 47-59.
- [7] G. Matisoff, M.E. Keterer, K. Rosen, J.W. Mietelski, L.F. Vitko, H. Person and E. Lokas. Downward migration of Chernobyl-derived radionuclides in soil in Poland and Sweden. *Appl. Geochem.* 26 (2011) 105-115.
- [8] K. Rosen, I. Oborn and H. Lonsjo. Migration of radiocesium in in Swedish soil profiles after the Chernobyl accident. *J. Environ. Radioact.* 46 (1999) 45-66.
- [9] P. Bossew and G. Kirchner. Modelling the vertical distribution of radionuclides in soil. Part 1: the convection–dispersion equation revisited. *J. Environ. Radioact.* 73 (2004) 127-150.

- [10] A. Clouvas, S. Xanthos, G. Takoudis, M. Antonopoulos- Domis, G. Zinovadis, T. Vidmar and A. Likar. Twenty-year follow-up study of radiocesium migration in soil. *Radiat. Prot. Dosim.* 124 (2007) 372-377.
- [11] L.J. Janković-Mandić, R.M. Dragović, M.M. Đorđević, M.B. Đolić, A.E. Onjia, S.D. Dragović and G.G. Bačić. Prostorna varijabilnost  $^{137}\text{Cs}$  u zemljištu Beograda (Srbija). *Hem. Ind.* 68 (4) (2014) 449-455.
- [12] S. Dragović, B. Gajić, R. Dragović, Lj. Janković Mandić, L. Slavković Beškoski, N. Mihailović, M. Momčilović and M. Čujić. Edaphic factors affecting the vertical distribution of radionuclides in the different soil types of Belgrade, Serbia. *J. Environ. Monit.* 14 (2012) 127-137.
- [13] ORTEC, Gamma Vission 32, Gamma-Ray Spectrum Analysis and MCA Emulation, Version 5.3, Oak Ridge, TN, 2001.
- [14] Rowell, D.L. *Bodenkunde. Untersuchungsmethoden und ihre Anwendungen.* 1997. Springer, Berlin.
- [15] USDA. Soil Conservation Service, Soil Survey Laboratory. *Methods and Procedures for Collecting Soil Samples.* Soil Survey Report 1. WA, SAD, 1972.
- [16] ISO. International Standard Organization, 10390, Soil quality - Determination of pH. 2005.
- [17] ISO. International Standard Organization, 11265, Soil quality - Determination of the specific electrical conductivity. 1994.
- [18] V.N. Simakov. Application of phenylanthranilic acid in determining humus, the method of Tyurin. 1957. 8: p. 72-73.
- [19] A. Walkley and I.A. Black. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science.* 1934. 37(1): p. 29-38.
- [20] L.P. Van Reeuwijk. *Procedures for Soil Analysis.* Technical Paper 9. International Soil Reference and Information Centre (ISRIC), Wageningen, 1986, p. 106.
- [21] ISO. International Standard Organization, 10693, Soil quality - Determination of carbonate content - Volumetric method. 1995.
- [22] H. Kappen, *Die Bodenazidität,* Springer Verlag, Berlin, 1929.
- [23] G.R. Blake and K.H. Hartge. in *Methods of Soil Analysis. Part 1- Physical and Mineralogical Methods,* ed. A. Klute, Soil Science Society of America, Madison, WI, 2nd edn, 1986, pp. 363-382.
- [24] A. Klute and C. Dirksen. in *Methods of Soil Analysis. Part 1-Physical and Mineralogical Methods,* ed. A. Klute, Soil Science Society of America, Madison, WI, 2nd edn, 1986, pp. 687-734.
- [25] Kvalitet životne sredine grada Beograda u 2007. godini. Marija Grubačević sa saradnicima (ur.). Sekretarijat za zaštitu životne sredine, 2007, Beograd.
- [26] M.R. 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. Fakultet za fizičku hemiju, 2016. Beograd.
- [27] I. Bikit, J. Slivka, Lj. Čonkić, M. Krmar, M. Vesković, N. Žikić-Todorović, E. Varga, S. Ćurčić and D. Mrdja. Radioactivity of the soil in Vojvodina (northern province of Serbia and Montenegro). *J. Environ. Radioact.* 78 (2005) 11-19.
- [28] 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. *J. Hazard. Mater.* 177 (2010) 697-702.
- [29] B. Milenkovic, J.M. Stajic, Lj. Gulan, T. Zeremski and D. Nikezic. Radioactivity levels and heavy metals in the urban soil of Central Serbia. *Environ. Sci. Pollut. Res.* (2015) DOI 10.1007/s11356-015-4869-9.
- [30] S. Dragović and A. Onjia. Classification of soil samples according to their geographic origin using gamma-ray spectrometry and principal component analysis. *J. Environ. Radioact.* 89 (2006) 150-158.
- [30] Z. Pietrzak-Flis, I. Radwan, L. Rosiak and E. Wirth. Migration of  $^{137}\text{Cs}$  in soils and its transfer to mushrooms and vascular plants in mixed forest. *Sci. Total Environ.* 186 (1996) 243-250.
- [31] S. Yoshida, Y. Muramatsu, A.M. Dvornik, T.A. Zhuchenko and I. Linkov. Equilibrium of radiocesium with stable cesium within the biological cycle of contaminated forest ecosystems. *J. Environ. Radioact.* 75 (2004) 301-313.

- [32] 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. *Radiat. Prot. Dosim.* 131 (2008) 346–355.
- [33] N.M. Antovic, P. Vukotic, N. Svrkota and S.K. Andrukhovich. Pu-239+240 and Cs-137 in Montenegro soil: their correlation and origin. *J. Environ. Radioact.* 110 (2012) 90-97.
- [34] L. Gaspar and A. Navas. Vertical and lateral distributions of  $^{137}\text{Cs}$  in cultivated and uncultivated soils on Mediterranean hillslopes. *Geoderma* 207-208 (2013) 131-143.
- [35] C. Dumat and S. Staunton. Reduced adsorption of caesium on clay minerals caused by various humic substances. *J. Environ. Radioact.* 46 (1999) 187-200.
- [36] A. Rigol, M. Vidal and G. Rauret. An overview of the effect of organic matter on soil–radiocaesium interaction: implications in root uptake. *J. Environ. Radioact.* 58 (2002) 191-216.
- [37] A. Navas, L. Gaspar, M. López-Vicente and J. Machín. Spatial distribution of natural and artificial radionuclides at the catchment scale (South Central Pyrenees). *Radiat. Measurement.* 46 (2011) 261-269.
- [38] I. Vukašinović, D. Todorović, A. Đorđević, M.B. Rajković and V.B. Pavlović. Depth distribution of  $^{137}\text{Cs}$  in anthrosol from the experimental field "Radmilovac" near Belgrade, Serbia. *Arh. Hig. Rada. Toksikol.* 64 (2013) 425-430.

## SPATIAL AND VERTICAL DISTRIBUTION OF $^{137}\text{CS}$ IN THE SOIL OF SERBIA

**Jelena PETROVIĆ, Ljiljana JANKOVIĆ-MANDIĆ, Mirjana ĆUJIĆ and Snežana DRAGOVIĆ**

*University of Belgrade, Vinča Institute of Nuclear Sciences, Belgrade, Serbia  
[jelenap@inep.co.rs](mailto:jelenap@inep.co.rs)*

In this study the specific activities of  $^{137}\text{Cs}$  were determined in the soil of Serbia in the period from 2006 to 2014. The spatial and vertical distribution of  $^{137}\text{Cs}$  in the soil profiles of different soil types and its relationships with the physico-chemical soil properties were analyzed. The obtained results provide insight into the key factors influencing the migration of  $^{137}\text{Cs}$  in the soil, which contributes to knowledge of its behavior in the environment and the factors affecting its mobility within terrestrial ecosystems.

CIP - Каталогизација у публикацији –  
Народна библиотека Србије, Београд

614.876(082)

621.311.25(477.41)(082)

504.5:539.16(497.11)(082)

ЧЕРНОБИЉ : 30 година после : монографија / уредник  
Гордана Пантелић. - Београд : Институт за нуклеарне науке  
"Винча", Лабораторија за заштиту од зрачења и заштиту  
животне средине "Заштита" : Друштво за заштиту од зрачења  
Србије и Црне Горе, 2016 (Београд : Институт за нуклеарне  
науке "Винча"). - 286 стр. : илустр. ; 25 cm

Тираж 150. - Библиографија уз сваки рад. - Summaries.

ISBN 978-86-7306-138-2 ("Винча")

1. Пантелић, Гордана [уредник]

а) Нуклеарна електрана "Чернобил" - Хаварија - Зборници

б) Животна средина - Загађење радиоактивним материјама

- Србија - Зборници с) Несреће у нуклеарним електранама

- Последице - Зборници d) Јонизујуће зрачење - Штетно

дејство - Србија - Зборници

COBISS.SR-ID 226685452