

Radioaktivnost u mahovinama i zemljištu sakupljenom 2018. i 2019. godine u reonu Dobra, NP Đerdap

Radioactivity in mosses and soils collected 2018 and 2019 in region Dobra, NP Đerdap

Jelena N. Stanojković^{1*}, Ana A. Čučulović², Rodoljub D. Čučulović³, Nenad Z. Radaković⁴, Saša M. Nestorović⁵, Marko S. Sabovljević⁶, Milorad M. Vujčić⁷

^{1,2}Univerzitet u Beogradu, Institut za primenu nuklearne energije – INEP, Banatska 31b, Zemun, Srbija / University of Belgrade, Institute for the Application of Nuclear Energy, Banatska 31b, Zemun, Serbia

³Univerzitet MB, Poslovni i pravni fakultet, Teodora Dražera 27, 11000 Beograd, Srbija / University of MB, Faculty of Business and Law, Teodora Dražera 27, 11000 Belgrade, Serbia

^{4,5}Javno preduzeće NP Đerdap, Kralja Petra I 14a, 19220 Donji Milanovac, Srbija / Public Company Đerdap National Park, Kralja Petra I 14a, 19220 Donji Milanovac, Serbia

⁶Univerzitet u Košicama P.J. Šafarik, Naučni fakultet, Institut za Biologiju i Ekologiju, Košice, Slovačka / University in Košice P.J. Šafarik, Faculty of Science, Institute of Biology and Ecology, Košice, Slovakia

^{6,7}Univerzitet u Beogradu, Biološki fakultet, Botanička bašta Jevremovac, Takovska 43, Beograd, Srbija / University of Belgrade, Faculty of Biology, Botanical Garden Jevremovac, Takovska 43, Belgrade, Serbia
, e-mail: marko@bio.bg.ac.rs [6orcid.org/0000-0001-5809-0406](https://orcid.org/0000-0001-5809-0406),

*Autor za prepisku / Corresponding author

Rad primljen / Received: 10.04.2023, Rad prihvaćen / Accepted: 16.05.2023.

Sažetak: Uzorci mahovina (13) i njihovih podloga (13) sakupljeni su tokom juna meseca 2018. i 2019. godine na teritoriji Nacionalnog parka (NP) Đerdap u oblasti regiona Dobra. Specifične aktivnosti (Bq/kg) u podlogama (mahovinama); ¹³⁷Cs 7,74-452 (5,5-128); ⁴⁰K 256-612 (159-470); ²²⁶Ra 12,9-38,5 (4,2-40,1); ²³²Th 2,1-35,7 (3,0-27,2). Vrednosti transfer faktora (TF) podloga mahovina su: ¹³⁷Cs 0,09-2,25; ⁴⁰K 0,33-1,25; ²²⁶Ra 0,16-2,84; ²³²Th 0,14-2,43. Izračunate srednje vrednosti TF rastu sledećim redosledom ⁴⁰K<²³²Th <²²⁶Ra<¹³⁷Cs.

Ključne reči: Mahovina, Zemljište, Radionuklidi, Transfer faktor.

Abstract: Samples of mosses (13) and soils (13) were collected in June 2018 and 2019 on the territory of National Park (NP) Đerdap from the region Dobra. The radionuclide content (Bq/kg) in soil (moss) ¹³⁷Cs 7.74-452 (5.5-128), ⁴⁰K 256-612 (159-470), ²²⁶Ra 12.9-38.5 (4.2-40.1), ²³²Th 2.1-35.7 (3.0-27.2). Transfer factor (TF) value: ¹³⁷Cs 0.09-2.25, ⁴⁰K 0.33-1.25, ²²⁶Ra 0.16-2.84, ²³²Th 0.14-2.43. Calculated average value of TF increase in following order ⁴⁰K<²³²Th <²²⁶Ra<¹³⁷Cs.

Keywords: Mosses, Soils, Radionuclides, Transfer factor.

¹orcid.org/0000-0003-3784-842X, e-mail: jelenas@inep.co.rs

²orcid.org/0000-0001-9315-4559, e-mail: anas@inep.co.rs

³orcid.org/0000-0003-4472-0424, e-mail: rodoljub_cuculovic@yahoo.com

⁴orcid.org/0000-0002-1990-5606, e-mail: office@npdjerdap.org

⁵orcid.org/0000-0001-9272-0176, e-mail: office@npdjerdap.org

⁶orcid.org/0000-0001-5809-0406, e-mail: marko@bio.bg.ac.rs

⁷orcid.org/0000-0002-2152-9005, e-mail: milorad@bio.bg.ac.rs

UVOD / INTRODUCTION

Nacionalni park (NP) Đerdap, jedan od najvećih parkova u Srbiji, osnovan je 1974. godine. Nalazi se u karpatskim planinama, u severoistočnom delu Republike Srbije, na samoj granici sa Rumunijom. Prostire se na površini od 63.608 ha, u dužini od oko 100 km leve obale Dunava i obuhvata uzani šumoviti brdsko planinski pojas, širine 3-9 km uz Dunav, koji se uzdiže iznad Dunava od 50-900 metara nadmorske visine (mnnv). NP Đerdap čine tri reona: Dobra, Donji Milanovac i Đerdap koji su: složenog reljefa, specifične klime i velike raznovrsnosti litoškog sastava, genetske pripadnosti i geološke starosti (Medarević, 200; Lazić, 1999; Knežević i dr., 2010). Istraživanja su pokazala da je u NP Đerdap podjednaka zastupljenost silikatnih i krečnjačkih geoloških podloga, na kojima dominiraju smeđa zemljišta (različite dubine) (Antić i dr., 1970; Košanin, Knežević, 2007).

Radioaktivnost je pojava koja je postojala i pre formiranja planete Zemlje (Ahrens, 1965). Do 2018. godine otkriveno je 3302 izotopa radionuklida. Broj radionuklida se povećava svake godine (Thoennesen, 2019). Radionuklidi su prisutni u vazduhu, vodi i zemljištu, ulaze u sastav stena, mora i okeana. Grupišu se u tri kategorije: primordijalne (^{226}Ra , ^{232}Th , ^{235}U , ^{238}U , ^{40}K i dr), kosmogene (^3H , ^{14}C , ^{22}Na , ^7Be i dr) i antropogene (^{129}I , ^{131}I , ^{90}Sr , ^{134}Cs , ^{137}Cs i dr.) (MacKenzie, 2000).

Prirodna radioaktivnost je deo životne sredine, menja se od mesta do mesta i vremenom deluje na stanovništvo. Prirodni radionuklidi formirani su u procesu nukleosinteze i najčešći su i najznačajniji izvori jonizujućeg zračenja. Imaju dugo fizičko vreme poluraspada, razlikuju se po fizičkim, geohemijskim osobinama, vrstama radioaktivnog raspada, intenzitetima zračenja, izotopskoj obilnosti, načinu pojavljivanja, migraciji i geohemijskim ciklusima (Dangić, 1995). Uran i radijum, se zbog svog geohemijskog karaktera, značajno koncentrišu u kiselim magmatskim stenama, škriljcima i glincima. U najvećim koncentracijama se pojavljuju u rudama, u sopstvenim rudnim ležištima ili kao primese u rudama fosfata, olova i cinka. Procenjuje se da u zemljinoj kori ima oko $1,3 \times 10^{17}$ kg uranijuma u oko 200 minerala (Dangić, 1995; Miljanić, 2008). Kalijum - 40 je lako rastvoran i migrativan, apsorbuju ga čestice minerala gline, ima ga u prirodnom kalijumu i jedan je od glavnih radionuklida u biosferi. Neophodna je komponenta u lancu ishrane zemljište-biljke-životinja-čovjek.

Stene sadrže prirodne radionuklide u različitim koncentracijama, a samim tim i zemljište koje je nastalo njihovim raspadanjem. Specifične aktivnosti radionuklida u zemljištu zavise od: mineralnog

sastava i fizičko-hemijskih karakteristika zemljišta, meteoroloških uslova i moguće translokacije i migracije radionuklida. Pokretljivost radionuklida u zemljištu zavisi od: fizičko-hemijskog oblika padavina, procesa transformacije koji menjaju originalnu distribuciju vrsta i reaktivnost radionuklida sa komponentama zemljišta (MacKenzie, 2000). Prema izveštaju UNSCEAR (2000a) prosečne vrednosti specifične aktivnosti (opseg koncentracija) (Bq kg^{-1}) uranijuma, radijuma, torijuma i kalijuma u zemljištu sveta su: 35 (16,0-110); 35 (17,0-60,0); 30 (11,0-64,0) i 400 (140-850), redom.

Kosmogeni radionuklidi zbog svojih malih koncentracija, relativno kratkih vremena poluraspada i niskih intenziteta zračenja, imaju mali značaj u ukupnom ozračivanju stanovništva.

Osim prirodnih i kosmogenih radioizotopa, u životnoj sredini se od 50-ih godina prošlog veka, nalaze antropogeni radionuklidi. Najveći broj ovih radioizotopa su fisioni produkti nastali cepanjem teških jezgara, imaju veoma kratko vreme poluraspada i predstavljaju opasnost po životnu sredinu neposredno nakon probe nuklearnog oružja ili havarije. Prema podacima UNSCEAR (1982) usled proba nuklearnih eksplozija u stratosferu je ispušteno $9,6 \times 10^{17}$ Bq radionuklida koji su izazvali globalno zagađenje biosfere. Manji broj antropogenih radionuklida ima dugo vreme poluraspada (^{137}Cs i ^{90}Sr) i putem vazdušnih i vodenih strujanja transportuju se na velika rastojanja i deponuju, najčešće u zemljištu, vodotokovima i sedimentima. Radiocezijum-137 može da nastane kao fisioni produkt, da bude proizveden u procesu proizvodnje i testiranja nuklearnog oružja i u nuklearnim reaktorima. Havarijom nuklearne elektrane u Černobilju (1986. god) ispušteno je $3,8 \times 10^{16}$ Bq ^{137}Cs , od čega je 10% dospelo na teritoriju SFRJ (Savezni komitet za rad, zdravstvo i socijalnu zaštitu, 1987). Fizičko vreme poluraspada ^{137}Cs je 30,2 godine, aktivno se uključuje u lanac ishrane ljudi i životinja preko biljaka i metabolički zamenjuje kalijum. Procesi usvajanja cezijuma iz spoljašnje sredine mogu biti: fizička i hemijska sorpcija i jonska izmena (Russel, Bruce, 1969; Ashraf i dr., 2014). Istraživanja naših naučnika su pokazala da havarija u nuklearnoj elektrani u Fukušimi (2011. godina Japan) nije uticala na depoziciju ^{137}Cs u Srbiji (Bikit i dr., 2012).

Mahovine (Bryopsida), zajedno sa rožnjačama (Anthocerotopsida) i jetrenjačama (Marchantiopsida), čine Briofite, drugu po veličini grupu kopnenih biljaka, odmah posle cvetnica (Zechmeister i dr., 2003). Široko su rasprostranjena grupa biljaka, koje se odlikuju brzim rastom i zadržavanjem biljnih delova kroz sezone, što ih čini dobrim biomonitorima i bioindikatorima zagađenja životne sredine. Istraži-

vanja 50-tih godina u Skandinaviji, gde su prvo uvedene biomonitorske tehnike uz korišćenje mahovina, su pokazala da mahovine imaju veliku ulogu u utvrđivanju nivoa zagađenosti polutantima (radionuklidima, pesticidima, teškim metalima). Morfološke karakteristike mahovina se razlikuju od karakteristika vaskularnih biljaka. Nemaju razvijene biljne organe (koren, stablo i list), odlikuju se strukturama koje nalikuju ovim organima, prostije su fiziološke građe, što im dodatno olakšava usvajanje zagađujućih supstanci iz spoljašnje sredine (Szczepaniak, Biziuk, 2003; Ajtić i dr., 2018; Master plan Turističke destinacije Donje Podunavlje, 2007). Na površini tela ne poseduju kutikulu, koja ima ulogu svojevrsne barijere kod vaskularnih biljaka, što dodatno olakšava apsorpciju supstanci (Grodzinski, Yorks, 1981). Istraživanja su pokazala da se usvajanje cezijuma vrši preko kalijumskih kanala (Grodzinski, Yorks, 1981; Sabovljević i dr., 2008).

Danas se mahovine, u svetu i kod nas, koriste kao biomonitori i bioindikator za istraživanje i praćenje depozicije kako prirodnih, tako i proizvedenih, radionuklida. Istraživanja u oblasti biomonitoringa za krajnji cilj imaju preduzimanje odgovarajućih mera prevencije, zaštite i održavanje kvaliteta životne sredine.

Pored svega navedenog, bitno je reći i da je prikupljanje mahovina relativno lako i nije skupo (Ajtić i dr., 2018). Problem ostaje dovoljno uniforman i čist materijal kao i identifikacija koja je dosta teška i zametna. Mahovine su pogodne za gamaspektrometrijska merenja. U Srbiji raste 661 vrsta mahovina, od čega na teritoriji NP Đerdap 229 vrsta. (Master plan Turističke destinacije Donje Podunavlje, 2007; Grodzinski, Yorks, 1981).

1. MATERIJALI I METODE / MATERIALS AND METHODS

Uzorci mahovina (M) (13 uzoraka) i podloge (P) (13 uzoraka) (zemljište na kojem mahovina raste) sakupljeni su u junu 2018. i 2019. godine, metodom slučajnog uzorka u NP Đerdap, sa gazdinskih jedinica (GJ) koje se nalaze u reonu Dobra: 1. Čezava 40a; 2. Čezava 36a; 3. Čezava 38b; 4. Čezava 37b; 5. Desna reka 56a; 6. Leva reka 30; 7. Leva reka 27; 8. Kožica 38; 9. Kožica 26; 10. Leva reka 30; 11. Leva reka 13c; 12. Leva reka 29a i 13. Desna reka 52a. Uzorci sakupljeni sa GJ 1-9 sakupljeni su 2018. godine, a sa GJ 10-13 2019. godine.

Determinacijom mahovina utvrđeno je da su sakupljene sledeće vrste: 1. *Polytrichum formosum* (Hedw.) G. L. Smith (4 uzorka); 2. *Hypnum cupressiforme* Hedw. (3 uzorka); 3. *Brachythecium salebrosum* (F. Weber & D. Mohr) Schimp. (2 uzorka); 4. *Dicranum scoparium* Hedw. (2 uzorka); 5.

Atrichum undulatum (Hedw.) P. Beauv. (1 uzorak) i 6. *Brachythecium rutabulum* (Hedw.) Schimp. (1 uzorak) (Sabovljević i dr., 2008). Mahovina *H. cupressiforme* je sakupljena na GJ 1, 2 i 6; *P. formosum* na GJ 10, 11, 12 i 13; *D. scoparium* na GJ 3 i 4; *B. salebrosum* na GJ 5 i 8; *B. rutabulum* na GJ 9 i *A. undulatum* na GJ 7.

Nakon dopremanja uzoraka u laboratoriju, uzorci su očišćeni od vidljivih nečistoća, osušeni, homogenizovani i upakovani u Marinelli posude zapremine 0,5 L. Posude su, zatim, zatopljene parafinom i ostavljene da odstoje najmanje 40 dana, kako bi se uspostavila radioaktivna ravnoteža između ^{226}Ra , ^{222}Rn i njihovih kratkoživećih potomaka. Masa uzoraka mahovina je bila do 100 g, a zemljišta do 600 g. Za određivanje specifične aktivnosti radionuklida korišćen je poluprovodnički germanijumski detektor visoke čistoće n tipa proizvođača ORTEC – Ametek, USA, sa 8192 kanala, rezolucije 1,65 keV-a i relativne efikasnosti od 34% na 1,33 MeV-a za ^{60}Co . Vreme merenja jednog uzorka je bilo 60000s. Obrada spektra je vršena pomoću softverskog paketa Gamma Vision 32 (ORTEC, 2001). Aktivnost ispitivanih radionuklida merena je preko sledećih γ -linija: ^{137}Cs na 661,6 keV-a, ^{40}K na 1460 keV-a; ^{232}Th na osnovu linija ^{228}Ac (338; 911 i 969 keV); ^{226}Ra na osnovu linija ^{214}Bi (609; 1120; 1764 keV-a) i ^{214}Pb (295 i 352 keV-a).

Kalibracija detektora je izvršena korišćenjem tri različita radioaktivna referentna materijala u Marinelli geometriji: silikonska smola (Češki metrološki institut Prag (CMI Praha), sertifikat br. 1035-SE-40517-17, tip MBSS 2 (^{241}Am , ^{109}Cd , ^{139}Ce , ^{57}Co , ^{60}Co , ^{137}Cs , ^{113}Sn , ^{85}Sr , ^{88}Y , ^{51}Cr), 490,0 g, gustine: $0,98 \pm 0,01 \text{ g cm}^{-3}$, zapremine $500,0 \pm 5,0 \text{ cm}^3$, referentni datum 1.9.2017); silikonska smola (Češki metrološki institut Prag (CMI Praha), sertifikat br. 1035-SE-40661/14, tip MBSS 2 (^{241}Am , ^{109}Cd , ^{139}Ce , ^{57}Co , ^{60}Co , ^{137}Cs , ^{113}Sn , ^{85}Sr , ^{88}Y , ^{51}Cr), 490,0 g, gustine: $0,98 \pm 0,01 \text{ g cm}^{-3}$, zapremine $500,0 \pm 5,0 \text{ cm}^3$, referentni datum 1.10.2014); silikonska smola (Češki metrološki institut Prag (CMI Praha), sertifikat br. 9031-OL-420/10, tip MBSS 2 (^{241}Am , ^{109}Cd , ^{139}Ce , ^{57}Co , ^{60}Co , ^{137}Cs , ^{113}Sn , ^{85}Sr , ^{88}Y , ^{203}Hg), 985,0 g, gustine: $0,985 \pm 0,01 \text{ g cm}^{-3}$, zapremine $1000,0 \pm 10,0 \text{ cm}^3$, referentni datum 16.8.2010) i mahovine (Institut za medicinu rada i radiološku zaštitu, Beograd) QAP 9709, ref. datum 23.12.2002. Ukupna merna nesigurnost uključuje mnoge elemente i ne iznosi više od 20%. Rezultati gamaspektrometrijskih merenja prikazani su kao specifična aktivnost u Bq kg^{-1} suve mase.

Prema preporuci (UNSCEAR, 2000), na osnovu izmerenih nivoa aktivnosti (Bq kg^{-1}) prirodnih radionuklida, u ispitivanim uzorcima zemljišta može se

izračunati jačina apsorbovane doze (D) na 1 m iznad tla prema jednačini (2) uz pretpostavku da su svi potomci u ravnoteži sa svojim prekursorima, kao i da radionuklidi neznatno doprinose ukupnoj dozi usled spoljašnjeg izlaganja, korišćenjem faktora konverzije za ^{226}Ra , ^{232}Th i ^{40}K 0,462; 0,604 i 0,042 respektivno:

$$D(\text{nGy h}^{-1}) = 0,462A_{\text{Ra}} + 0,604A_{\text{Th}} + 0,042A_{\text{K}} \quad (1)$$

Znajući ukupnu absorbovanu jačinu doze zračenja (D) može se na osnovu jednačine (2) izračunati godišnja efektivna doza zračenja za odraslu osobu H (mSv)

$$H (\text{mSv}) = D \times 0,7 \times 0,2 \times 8760 \quad (2)$$

gde su: 0,7 (SvGy⁻¹) konverzioni koeficijent (odnos godišnje efektivne doze primljene od strane stanovništva i apsorbovane doze u vazduhu); 0,2 – faktor izloženosti za spoljašnje ozračivanje (pretpostavlja se da stanovništvo provodi u proseku 20% vremena na otvorenom); 8760 – broj časova u jednoj godini (UNSCEAR, 2000).

2. REZULTATI I DISKUSIJA / RESULTS AND DISCUSSION

U Tabeli 1 prikazane su specifične aktivnosti ^{137}Cs , ^{40}K , ^{226}Ra i ^{232}Th (Bq kg⁻¹) u mahovinama (M) i podlogama (P) sakupljenim na teritoriji reona Dobra, kao i transfer faktori (TF).

Srednje vrednosti specifične aktivnosti (Bq kg⁻¹) u mahovinama sakupljenih 2018. godine (2019. godine) su za: ^{137}Cs 40,9 (61,4); ^{40}K 313 (187); ^{226}Ra 19,3 (7,1) i ^{232}Th 12,3 (4,7). Srednje vrednosti specifične aktivnosti (Bq kg⁻¹) u podlogama sakupljenih 2018. godine (2019. godine) su za: ^{137}Cs 57,3 (174); ^{40}K 469 (370); ^{226}Ra 24,5 (23,4) i ^{232}Th 20,0 (26,2).

Vrednosti specifičnih aktivnosti (Bq kg⁻¹) u mahovinama (podlogama) sakupljenih 2018. godine su za: ^{137}Cs 15,5-128 (7,7-201); ^{40}K 202-470 (256-612); ^{226}Ra 5,3-40,1 (12,9-38,5) i ^{232}Th 3,0-27,2 (2,1-34,3). Vrednosti specifične aktivnosti (Bq kg⁻¹) u mahovinama (podlogama) sakupljenih 2019. godine su za: ^{137}Cs 5,5-154 (9,3-452); ^{40}K 159-229 (350-400); ^{226}Ra 4,2-10,4 (17,7-35,5) i ^{232}Th 3,0-8,0 (22,2-35,7).

Vrednosti specifičnih aktivnosti ^{137}Cs u mahovinama sakupljenim 2018. i 2019. godine u reonu Dobra su znatno niže u odnosu na specifične aktivnosti ^{137}Cs u mahovinama sakupljenim na teritoriji NP Đerdap u periodu 2015-2017. godine (Stanojković i dr., 2022; Čučulović i dr., 2017, 2018, 2018a, 2019). Vrednosti specifičnih aktivnosti ^{40}K i ^{226}Ra u mahovinama sakupljenih 2018. godine su više, a

^{232}Th u opsegu naših ranijih istraživanja. U mahovinama sakupljenim 2019. godine specifične aktivnosti ^{40}K su u okviru prethodnih istraživanja, a ^{226}Ra i ^{232}Th niže (Čučulović i dr., 2018, 2018a).

Vrednosti specifičnih aktivnosti ^{137}Cs u podlogama sakupljenim 2018. godine u reonu Dobra su znatno niže u odnosu na vrednosti specifičnih aktivnosti ^{137}Cs u podlogama sakupljenim u periodu 2015-2017. godine, a 2019. godine nešto niže. Vrednosti specifičnih aktivnosti ^{40}K u podlogama sakupljenim 2018. godine su više, a iz 2019. godine u opsegu prethodnih istraživanja. Vrednosti specifičnih aktivnosti ^{226}Ra i ^{232}Th u podlogama sakupljenim 2018. i 2019. godine su nešto više u odnosu na naša prethodna istraživanja (Čučulović i dr., 2018, 2020). Sve vrednosti specifičnih aktivnosti ispitivanih radionuklida u podlogama su u opsegu svetskih vrednosti (UNSCEAR, 2000a).

Minimalne vrednosti specifičnih aktivnosti ^{40}K , ^{226}Ra i ^{232}Th u mahovinama iz 2018. godine izmerene su u vrsti *H. cupressiforme*, a ^{137}Cs u vrsti *B. salebrosum*. U 2019. godini sakupljene su mahovine vrste *P. formosum* i u njima su sa GJ 10-13 zabeležene i minimalne i maksimalne vrednosti specifičnih aktivnosti.

Transfer faktor (TF) za unos bilo kog radionuklida iz zemljišta u mahovine koje na tom zemljištu rastu, se definiše kao odnos specifične aktivnosti datog radionuklida u mahovini (Bq kg⁻¹) i specifične aktivnosti u zemljištu (Bq kg⁻¹) i zavisi od više faktora: fizičko-hemijskih karakteristika radionuklida, oblika nataloženih padavina ili otpada, vremena koje je proteklo od zagađenja (u slučaju proizvedenih radionuklida), karakteristika zemljišta i vrste mahovine. Izračunate srednje vrednosti TF za uzorke iz 2018. godine rastu redosledom $^{40}\text{K} < ^{232}\text{Th} < ^{226}\text{Ra} < ^{137}\text{Cs}$ (0,73 < 0,94 < 0,98 < 1,1), a za uzorke iz 2019. godine $^{232}\text{Th} < ^{137}\text{Cs} < ^{226}\text{Ra} < ^{40}\text{K}$ (0,18 < 0,27 < 0,34 < 0,50). Vrednosti TF u 2018. (2019) godini za: ^{137}Cs su 0,20-2,25 (0,09-0,59); ^{40}K 0,33-1,25 (0,45-0,57); ^{226}Ra 0,21-2,84 (0,16-0,59) i ^{232}Th 0,18-2,43 (0,14-0,22). Minimalne vrednosti TF za ^{137}Cs , ^{226}Ra i ^{232}Th su izračunate za mahovinu *D. scoparium* sakupljenoj 2018. godini u GJ Čezava 37b, a za ^{40}K za mahovinu *H. cupressiforme* koja raste u GJ Čezava 36a. Maksimalne vrednosti TF za ^{137}Cs , ^{40}K i ^{226}Ra izračunate u mahovini *P. formosum* sakupljene 2019. godine na GJ Leva reka 29a i GJ Desna reka 52a (12 i 13).

Poznato je da mahovine ne prave razliku u procesu usvajanja ^{40}K i ^{137}Cs iz biosfere, izračunavanjem diskriminacionog faktora (DF), koji se definiše kao odnos transfer faktora ^{137}Cs i transfer faktora ^{40}K može se zaključiti koji se radionuklid lakše usvaja. Vrednosti diskriminacionog faktora za

uzorke iz 2018. godine, su od 0,4 do 6,1 (srednja vrednost 2,0), a za uzorke iz 2019. godine od 0,2 do 1,0 (srednja 0,5). Na osnovu dobijenih vrednosti DF pokazano je da je kod vrste *H. cupressiforme* efikasnije usvajanje ^{137}Cs od ^{40}K , dok je kod vrste *P. formosum* podjednako efikasno usvajanje oba radionuklida.

Na osnovu jednačine (1) izračunata je apsorbovana jačina doza zračenja po radionuklidu (nGy h^{-1}), što je prikazano u Tabelama 1 i 2.

Vrednost ukupne jačine apsorbovane doze u zemljištu sakupljenom 2018. godine su bile 24,45-57,35 nGy h^{-1} , (srednja 43,1 nGy h^{-1}), dok su u zemljištu sakupljenom 2019. godine bile 36,29-46,61 nGy h^{-1} (srednja 40,14 nGy h^{-1}). Ove vred-

nosti su u opsegu svetske prosečne vrednosti 57 nGy h^{-1} (UNSCEAR, 2000).

Vrednost ukupne godišnje efektivne doze zračenja u zemljištu sakupljenom 2018. godine su bile 0,030-0,070 mSv, (srednja 0,053 mSv), dok su u zemljištu sakupljenom 2019. godine bile 0,045-0,057 mSv (srednja 0,050 mSv). Ove vrednosti su u opsegu svetske prosečne vrednosti 0,070 mSv (UNSCEAR, 2000). Na osnovu Pravilnika godišnja efektivna doza za stanovništvo je uvećana ukoliko je veća od 1 mSv za godinu dana (Čučulović i dr., 2020; Pravilnik o granicama izlaganja jonizujućim zračenjima i merenjima, 2011). Iz rezultata srednjih vrednosti, zaključuje se da je efektivna doza za stanovništvo reona Dobra niska.

Tabela 1- Specifične aktivnosti ^{137}Cs , ^{40}K , ^{226}Ra i ^{232}Th (Bq kg^{-1}) u mahovinama (M) i podlogama (P), ukupne jačine apsorbovane doze (nGy h^{-1}) i godišnje efektivne doze (mSv), sakupljenim 2018. godine u reonu Dobra i transfer faktori (TF)

Table 1 - Specific activities of ^{137}Cs , ^{40}K , ^{226}Ra and ^{232}Th (Bq kg^{-1}) in mosses (M) and substrates (P), total strength of absorbed dose (nGy h^{-1}) and annual effective dose (mSv) collected in 2018 year in the region of Dobra and transfer factors (TF)

GJ*	Vrsta uzorka, TF	^{137}Cs	^{40}K	^{226}Ra	^{232}Th	D (nGy h^{-1})	H (mSv)
		(Bq kg^{-1})					
1.	M	17,4	221	15,6	3,0		
	P	7,7	596	38,5	2,1	44,09	0,054
	TF	2,25	0,37	0,41	1,43		
2.	M	25,2	202	5,3	5,6		
	P	14,1	612	16,1	2,3	34,53	0,042
	TF	1,79	0,33	0,33	2,43		
3.	M	20,6	257	18,0	9,0		
	P	28,5	485	35,2	34,3	57,35	0,070
	TF	0,72	0,53	0,51	0,26		
4.	M	19,1	224	6,2	5,0		
	P	97,3	471	29,2	28,4	50,43	0,062
	TF	0,20	0,48	0,21	0,18		
5.	M	15,5	319	40,1	12,9		
	P	11,0	256	14,1	11,9	24,45	0,030
	TF	1,41	1,25	2,84	1,08		
6.	M	128	370	16,9	21,8		
	P	201	473	22,8	31,4	49,37	0,061
	TF	0,64	0,78	0,74	0,69		
7.	M	35,2	348	26,3	12,1		
	P	30,6	343	12,9	13,7	28,64	0,035
	TF	1,15	1,01	2,04	0,88		
8.	M	70,4	408	14,5	14,4		
	P	85,9	475	17,9	22,8	41,99	0,051
	TF	0,82	0,86	0,81	0,63		
9.	M	36,7	470	31,1	27,2		
	P	39,9	514	33,5	33,2	57,12	0,070
	TF	0,92	0,91	0,93	0,82		

* GJ - gazdinska jedinica

Tabela 2 - Specifične aktivnosti ^{137}Cs , ^{40}K , ^{226}Ra i ^{232}Th (Bq kg^{-1}), ukupne jačine apsorbovane doze (nGy h^{-1}) i godišnje efektivne doze (mSv), u mahovinama (M) i podlogama (P) sakupljenim 2019. godine u reonu Dobra i transfer faktori (TF)

Table 2 - Specific activities of ^{137}Cs , ^{40}K , ^{226}Ra and ^{232}Th (Bq kg^{-1}), total strength of absorbed dose (nGy h^{-1}) and annual effective dose (mSv) in mosses (M) and substrates (P) collected in 2019 year in the region of Dobra and transfer factors (TF)

GJ*	Vrsta uzorka, TF	^{137}Cs	^{40}K	^{226}Ra	^{232}Th	D	H
		(Bq kg ⁻¹)				(nGy h ⁻¹)	(mSv)
10.	M	15,0	175	4,2	4,1		
	P	168	369	21,5	23,4	39,56	0,049
	TF	0,09	0,47	0,20	0,18		
11.	M	71,2	185	7,9	3,7		
	P	452	360	18,9	23,6	38,11	0,047
	TF	0,16	0,51	0,42	0,16		
12.	M	154	159	10,4	3,0		
	P	68,2	350	17,7	22,2	36,29	0,045
	TF	0,23	0,45	0,59	0,14		
13.	M	5,5	229	5,8	8,0		
	P	9,3	400	35,5	35,7	46,61	0,057
	TF	0,59	0,57	0,16	0,22		

* GJ - gazdinska jedinica

Tabela 3 - Pirsonov koeficijent korelacije u podlogama sakupljenim 2018. godine (2019. godine) u reonu Dobra, NP Đerdap

Table 3 - Pearson's correlation coefficient in substrates collected in 2018 (2019) in the Dobra area, Đerdap NP

2018 (2019)	^{137}Cs	^{40}K	^{226}Ra	^{232}Th
^{137}Cs	1			
^{40}K	0,006 (-0,440)	1		
^{226}Ra	-0,051 (-0,543)	0,545 (0,983)	1	
^{232}Th	0,056 (-0,494)	-0,120 (0,957)	0,325 (0,989)	1

U tabeli 3 prikazani su Pirsonovi koeficijenti korelacije u podlogama sakupljenim 2018. i 2019. godine na teritoriji reona Dobra, NP Đerdap. Tamnije brojeve u Tabeli 3 govore o veoma visokoj korelaciji među parovima radionuklida K-Ra (0,983), K-Th (0,957), Ra-Th (0,989) što upućuje na njihovo zajedničko poreklo prilikom formiranja tla.

ZAKLJUČAK / CONCLUSION

U svim uzorcima mahovina i podloga sakupljenih 2018. i 2019. godine potvrđeno je prisustvo ispitivanih radionuklida.

Vrednosti specifičnih aktivnosti ^{137}Cs u mahovinama i podlogama sakupljenim 2018. i 2019. godine u reonu Dobra su niže u odnosu na specifične aktivnosti ^{137}Cs u mahovinama iz perioda 2015-2017. godine, što govori da na teritoriji reona Dobra, NP Đerdap, novih kontaminacija ovim radionuklidom nije bilo.

Sve vrednosti specifičnih aktivnosti ispitivanih radionuklida u podlogama su u opsegu svetskih vrednosti.

Vrednost ukupne jačine apsorbovane doze u zemljištu sakupljenom 2018. godine i 2019. su u opsegu svetskih vrednosti.

Vrednost ukupne godišnje efektivne doze zračenja u zemljištu sakupljenom 2018. godine i 2019. godine su u opsegu svetskih vrednosti.

Efektivna doza za stanovništvo reona Dobra je niska.

Zahvalnica / Acknowledgments

Ovaj rad finansiralo je Ministarstvo nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije, kao deo finansiranja naučnog istraživanja na Institutu za primenu nuklearne energije- INEP, broj ugovora 451-03-47/2023-14/200019.

LITERATURA / REFERENCES

- [1] Ahrens, L.H. (1965). *Distribution of the elements in our planet*. McGraw-Hill, New York.
- [2] Ajtić, J., Sarvan, D., Mitrović, B., Čučulović, A., Čučulović, R. et al. (2018). Elemental composition of moss and lichen species in Eastern

- Serbia. *Nucl. Technol. Radiat. Prot.*, 33(3), 275-285. DOI:10.2298/NTRP1803275A
- [3] Antić, M., Jović N., Avdalović V. (1970). Genetsko-evolucionarna serija zemljišta u reliktnim šumama Đerdapa. *Zemljište i biljka*, 19(1-3), 109-116.
- [4] Ashraf, M., Akib, S., Maah, M., Yusoff, I., Balkhair, K. (2014). Cesium-137: radio-chemistry, fate, and transport, remediation, and future concerns. *Environ. Sci. Technol.*, 44, 1740-1793.
- [5] Bikit, I., Mrda, D., Todorovic, N., Nikolov, J., Krmar, M., Veskovic, M., ... & Jovancevic, N. (2012). Airborne radioiodine in northern Serbia from Fukushima. *Journal of environmental radioactivity*, 114, 89-93.
- [6] Čučulović, A., Čučulović, R., Nestorović, S., Veselinović, D. (2017), Radioaktivnost u mahovinama i lišajevima sakupljenim 2015. godine u NP Đerdap, *XXIX Simpozijum DZZSCG, Srebrno jezero*, Septembar, 27-29, Zbornik radova, 99-107.
- [7] Čučulović, A., Čučulović, R., Nestorović, S., Radaković, N., Veselinović, D. (2018). Radioactivity in soil and mosses from NP Djerdap in 2017. *Physical Chemistry 2018*, 14th International Conference on Fundamental and Applied Aspects of Physical Chemistry, Proceedings, 24-28. September 2018, Belgrade, 821-824.
- [8] Čučulović, A., Čučulović, R., Nestorović, S., Radaković, N., Veselinović, D. (2018a). Radioactivity in soil from NP Djerdap in 2015 and 2016, 26th International Conference *Ecological Truth & Environmental Research, EcoTer 18*, Proceedings, Bor Lake, Serbia, 12-15.06.2018, 140-145.
- [9] Čučulović, A., Čučulović, R., Nestorović, S., Radaković, N., Veselinović, D. (2019). Sadržaj ^{137}Cs i ^{40}K u mahovinama i njihovim podlogama sakupljenim 2016. godine u NP Đerdap, *Ecologica*, 26(93), 10-13,
- [10] Čučulović, A., Stanojković, J., Čučulović, R., Nestorović, S., Radaković, N., Veselinović, D. (2020). Raspodela masenih koncentracija kalijuma, radijuma i torijuma u zemljištu rejona Dobra i Donji Milanovac, *Ecologica*, 27(98), 293-298.
- [11] Dangić, A. (1995). Geohemijski procesi u prirodi i radionuklidi, U: *Jonizujuća zračenja iz prirode*, Institut za nuklearne nauke Vinča, Jugoslovensko društvo za zaštitu od zračenja, Beograd, 41-56.
- [12] Grodzinski, W., Yorks, T.P. (1981). Species and ecosystem level bioindicator of two major studies, *Water, Air and Soil Pollution*, 16, 33.
- [13] Knežević, M., Milošević, R., Košanin, O. (2010). Production potential of the soil and the basic elements of productivity of the most widely spread sessil types in the U.N.P. Djerdap, *Glasnik Šumarskog fakulteta*, 102, 57-68.
- [14] Košanin, O., Knežević, M. (2007). *Šumarstvo*, 1-2/2007, str.25-38.
- [15] Lazić, M. (1999). *Inženjerskogeološke odlike terena u priobalju đerdapske akumulacije između Boljetinske i Porečke reke*. Studijski materijal za izradu planova gazdovanja šumama. Beograd.
- [16] MacKenzie, A.B.(2000). Environmental radioactivity: experience from the 20th century-trends and issues for the 21st century. *Sci Total Environ.*, 249(1-3), 313-29. DOI:10.1016/S0048-9697(99)00525-2
- [17] Master plan Turističke destinacije Donje Podunavlje, Vlada Republike Srbije, Ministarstvo ekonomije i regionalnog razvoja, Beograd, 2007.
- [18] Medarević, M. (2001). *Šume Đerdapa*. JP Nacionalni park Đerdap - Donji Milanovac i IP Ecolibri - Beograd.
- [19] Miljanić, Š. (2008). *Udžbenik nuklearne hemije*, Univerzitet u Beogradu, Fakultet za fizičku hemiju.
- [20] ORTEC. (2001). Gamma Vision 32. Gamma-Ray Spectrum Analysis and MCA Emulation. ORTEC. Oak Ridge. Version 5.3.
- [21] Pravilnik o granicama izlaganja jonizujućim zračenjima i merenjima radi procene nivoa izlaganja jonizujućim zračenjima. (2011). *Službeni glasnik Republike Srbije*, br. 86/2011.
- [22] Pravilnik o granicama izlaganja jonizujućim zračenjima i merenjima radi procene nivoa izlaganja jonizujućim zračenjima. (2018). Službeni glasnik Republike Srbije, br. 50/2018.
- [23] Russel, R.S., Bruce, R.S. (1969). Environmental contamination with fall-out from nuclear weapons, In: *Environmental Contamination by Radioactive materials*, IAEA, Vienna, pp. 3-14.
- [24] Sabovljević, M., Natcheva, R., Dihoru, G., Tsakiri, E., Dragičević, S., Erdag, A., Papp, B. (2008). Check-list of the mosses of Southeast Europe. *Phytol. Balc.*, 14(2), 159-196.
- [25] Savezni komitet za rad, zdravstvo i socijalnu zaštitu, Nivo radioaktivne kontaminacije čovekove sredine i ozračenost stanovništva Jugoslavije 1986. godine usled havarije nuklearne elektrane u Černobilju, Beograd 1987.
- [26] Stanojković, J., Nestorović, S., Radaković, N., Čučulović, R., Sabovljević, M., Čučulović, A., Vujičić, M. (2022). The occurrence of ^{40}K and ^{137}Cs radioactivity in mosses during 2015-2019 in the Djerdap National Park (E. Serbia), *Environmental Science and Pollution Research*, 30, 30972-30983. DOI:10.1007/s11356-022-24416-4

- [27] Szczepaniak, K., Biziuk, M. (2003). Aspects of the biomonitoring studies using mosses and lichens as indicators of metal pollution. *Environ. Res.*, 93(3), 221-230. DOI:10.1016/S0013-9351(03)00141-5
- [28] Thoennessen, M (2019) 2018 update of the discoveries of nuclides. *Int. J. Mod. Phys. E*, 28(01n02), 1930002. DOI:10.1142/S0218301319300029
- [29] UNSCEAR (1982). Sources and Effects of Ionizing Radiation. Report to the general Assembly, with Annexes, Ionizing Radiation: Sources and biological effects, United nations, New York.
- [30] UNSCEAR (2000). United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. New York.
- [31] UNSCEAR (2000a). Sources and Effects of Ionizing Radiation. Annex B: Exposure from natural radiation sources. United Nations, New York.
- [32] Zakon o zaštiti životne sredine Srbije, *Službeni glasnik Republike Srbije*, br 66/91, 83/92, 53/93, 67/93, 48/94 i 53/95.
- [33] Zechmeister, H.G., Grodzińska, K., Szarek-Łukaszewska, G., Bryophytes, In: B.A. Markert, A.M. Breure and H.G. Zechmeister (eds.), *Bioindicators and Biomonitors*, London, Elsevier, (2003), 329-375. DOI:10.1016/S0927-5215(03)80140-6