

Perko VUKOTIĆ¹, Vanja RADOLIĆ², Ranko SVRKOTA³, Tomislav ANĐELIĆ⁴, Denis STANIĆ⁵, Radivoje MRDAK⁶, Budimir FUŠTIĆ⁷

GEOGENI RADONSKI POTENCIJAL LOKACIJA NA KLASTITIMA U OPŠTINI BIJELO POLJE

Sažetak

U opštini Bijelo Polje, u području koje karakterišu klastične sedimentne stijene u podlozi, ispitan je geogeni radonski potencijal na 30 ruralnih lokacija gdje su ranije u školama i kućama izmjerene srednje godišnje koncentracije aktivnosti radona $C_{Rn,ind}$ u opsegu (32–398) Bq/m³, sa aritmetičkom srednjom vrijednošću $AM = 148$ Bq/m³ koja je značajno niža od prosjeka u 1200 zgrada u čitavoj Crnoj Gori ($AM = 187$ Bq/m³). U tlu su mjereni vlažnost (H), elektroprovodljivost (EC), pH , sadržaj ^{226}Ra , ^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th i ^{40}K , koncentracija aktivnosti radona (c), permeabilnost tla (k), kao i jačina doze gama zračenja (D) u vazduhu iznad tla. Geogeni radonski potencijal lokacije (GRP) izračunat je na osnovu vrijednosti parametara c i k .

Koncentracije aktivnosti radijuma ^{226}Ra na ispitivanim lokacijama nijesu visoke — opseg (18,5–45,2) Bq/kg, $AM = 29,9$ Bq/kg. Ni koncentracije aktivnosti radona

¹ Akademik Perko Vukotić, Crnogorska akademija nauka i umjetnosti, Ulica R. Stijovića, br. 5, 81000 Podgorica, Crna Gora

² Prof. dr Vanja Radolić, Odjel za fiziku, Sveučilište u Osijeku, Trg Lj. Gaja, br. 6, 31000 Osijek, Hrvatska

³ Ranko Svrkota, Zavod za geološka istraživanja, Naselje Kruševac bb, 81000 Podgorica, Crna Gora

⁴ Mr Tomislav Anđelić, Centar za ekotoksikološka ispitivanja, Bulevar Š. de Gola, br. 2, 81000 Podgorica, Crna Gora

⁵ Dr Denis Stanić, Odjel za fiziku, Sveučilište u Osijeku, Trg Lj. Gaja, br. 6, 31000 Osijek, Hrvatska

⁶ Mr Radivoje Mrdak, Građevinski fakultet, Univerzitet Crne Gore, Bulevar Dž. Vašingtona bb, 81000 Podgorica, Crna Gora

⁷ Dr Budimir Fušić, Biotehnički fakultet, Univerzitet Crne Gore, Bulevar M. Lalića, br. 15, 81000 Podgorica, Crna Gora

u tlu nijesu visoke — opseg (7,9–94,8) kBq/m³, AM = 35,3 kBq/m³, ali je propustljivost tla za radon vrlo visoka — opseg (0,5–180) · 10⁻¹³ m², AM = 114 · 10⁻¹³ m², zbog čega je i *GRP* povećan — opseg od 6,1 do 80, AM = 32,4, tako da 10 ispitivanih lokacija ima *visok* radonski indeks, 18 lokacija *srednji*, a samo dvije lokacije *nizak*.

Urađene su Spearmanove i Pearsonove korelacije svih mjerenih parametara tla na ispitivanim lokacijama. Spearmanove korelacije ranga nijesu pokazale statistički značajnu povezanost $C_{Rn,ind}$ ni sa jednim od mjerenih parametara tla.

Ključne riječi: klastične stijene, karakteristike tla, geogeni radonski potencijal

1. UVOD

Radon i njegovi kratkoživeći potomci daju najveći doprinos efektivnoj dozi koju stanovništvo primi od prirodnih izvora zračenja [1], a dugotrajno izlaganje čovjeka visokim nivoima radona povećava rizik nastanka kancera pluća [2].

Radioizotop radona ²²²Rn predstavlja potencijalno najveći izvor radijacionog izlaganja u zgradama [3]. On potiče iz prirodnog lanca raspada uranijuma ²³⁸U, koji je prisutan u stijenama, zemljištu, vodama i u građevinskom materijalu. Većina radona nastalog u tlu raspadom radijuma ²²⁶Ra ostaje u mineralima stijena i zemljišta, a manji dio emanira sa mjesta nastanka, i vođen različitim transportnim mehanizmima kreće se prema površini tla, gdje ekshalira u atmosferu ili ulazi u zatvoreni prostor građevinskih objekata [4]. U atmosferskom vazduhu on se razblažuje i njegova koncentracija u prizemnim slojevima vazduha je tipično na nivou 10 Bq/m³ [5]. Međutim, u vazduhu zatvorenih prostora, kao što su zgrade, on se akumulira i može doseći koncentracije od više stotina, pa i hiljada Bq/m³.

Kako dugovremeno izlaganje radonu uzrokuje povećanu incidenciju kancera pluća kod generalne populacije, Svjetska zdravstvena organizacija [2], Međunarodna organizacija za atomsku energiju [6] i Savjet Evropske unije [7] preporučuju državama, njihovim članicama, mjere i standarde zaštite koje treba primijeniti u cilju zaštite ljudi od izlaganja radonu u stanovima i na radnim mjestima.

Mnogi faktori imaju uticaja na koncentraciju radona u zgradi. Oni mogu biti svrstani u tri grupe: izvori radona, karakteristike zgrada, i navike stanara (grijanje i ventilacija prostorija, itd.). Prva grupa faktora zavisi uglavnom od geologije, zato što su stijene i zemljište ispod zgrade obično glavni izvor radona u zgradi [3]. Druge dvije grupe faktora su antropogene, zbog čega se može reći da je hazardno izlaganje radonu u znatnoj mjeri zdravstveno pitanje antropogene životne sredine.

Prvo sistematsko istraživanje radona u stanovima na čitavoj teritoriji Crne Gore započeto je 2002, a završeno krajem 2015. godine. Radon je mjeren pasivnim detektorima tragova, u trajanju 12 mjeseci, u nacionalnoj mreži kvadrata 5

km x 5 km i u lokalnim mrežama kvadrata 0,5 km x 0,5 km, u urbanim područjima. Dobijeni su validni rezultati za 953 stana, koji su pokazali da je srednja godišnja koncentracija radona u stanovima u Crnoj Gori AM = 110 Bq/m³ [8], i da je ona više nego dvostruko veća od prosječne za svijet u cjelini — 46 Bq/m³ [1]. Na osnovu ovog istraživanja preporučen je novi nacionalni referentni nivo za Crnu Goru od 300 Bq/m³ [9], koji je u skladu sa preporukama ICRP [10] i sa EU direktivom [7].

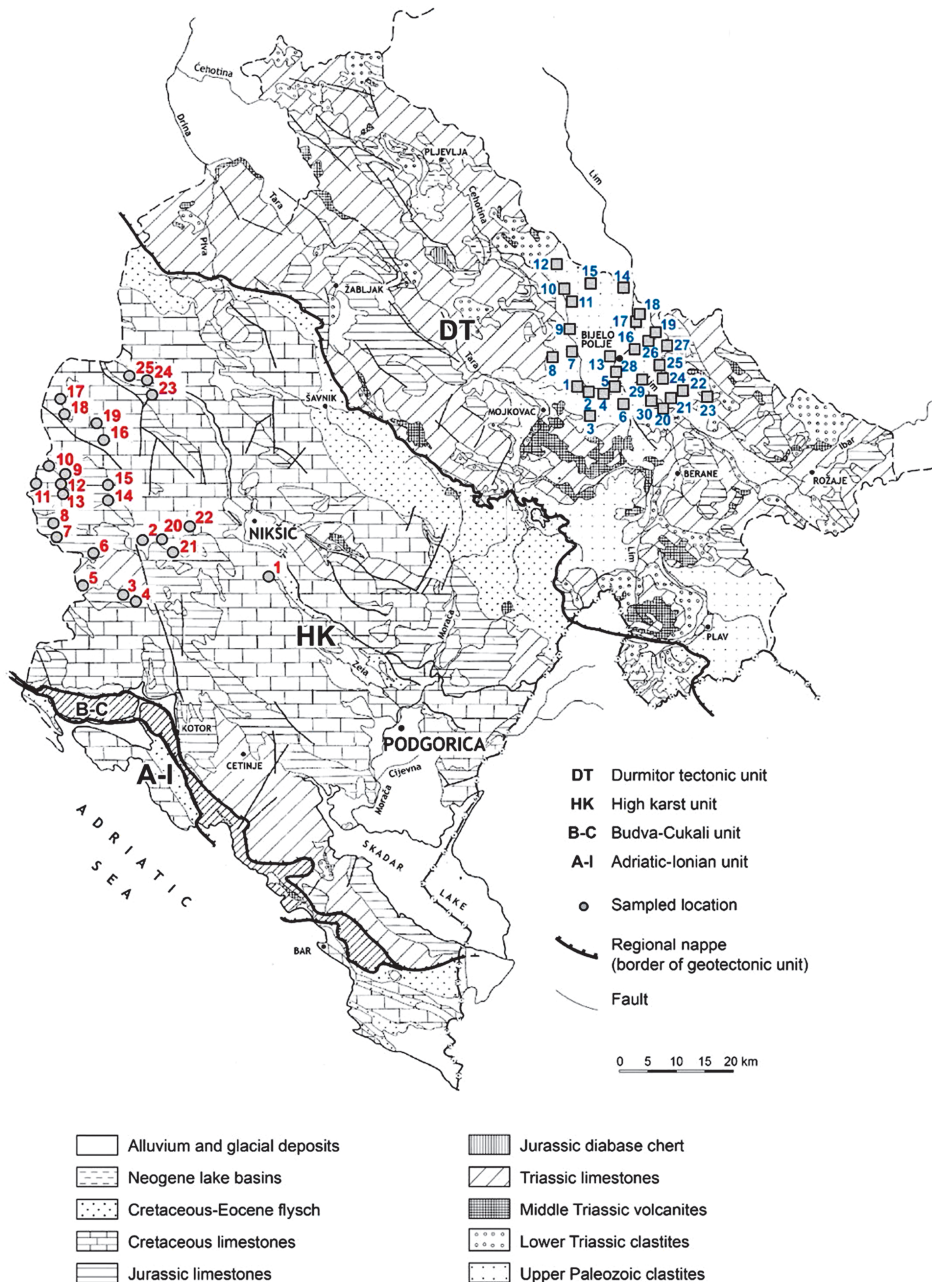
Sistematsko istraživanje radona u svim zgradama preduniverzitetskog obrazovanja u Crnoj Gori (dječji vrtići, osnovne i srednje škole, domovi učenika) realizovano je u periodu 2016–2018. godine. Radon je mjereno pasivnim detektorima tragova u 468 zgrada, u 2855 prizemnih prostorija. Nađeno je da su srednje godišnje koncentracije aktivnosti radona u zgradama, usrednjene po svim uzorkovanim prizemnim prostorijama, u opsegu (16–2810) Bq/m³, sa aritmetičkom srednjom vrijednošću AM = 275 Bq/m³ [11].

Najveće srednje godišnje koncentracije aktivnosti radona u zgradama u Crnoj Gori (kućama i školama) registrovane su u zapadnom, ruralnom dijelu opštine Nikšić, koje karakteriše visoki karst. Karstni, odnosno krečnjački sistemi, zbog šupljina, pukotina i rasjeda, predstavljaju vrlo kompleksan i permeabilan geološki ambijent, a njihov uticaj na radonski potencijal nije dovoljno poznat. Zbog svega toga, na karstnom području opštine Nikšić nedavno je sprovedeno istraživanje geogenog radonskog potencijala na 25 lokacija, koje je pokazalo da je on veoma visok (opseg 11–419, AM = 129), a radonski indeks na 18 od tih lokacija je čak *ekstremno visok* ili *vrlo visok* [12].

Da bi se potvrdila posebnost karstnih lokacija u pogledu radona, planirana su istraživanja geogenog radonskog potencijala lokacija na nekom od rijetkih područja Crne Gore koja nemaju u osnovi krečnjačke stijene. Ona su realizovana u periodu 2023–2024. godine na 30 ruralnih lokacija u opštini Bijelo Polje koje u svojoj podlozi imaju klastične stijene, a rezultati tih istraživanja su prikazani u ovom radu.

2. OPŠTI PRIKAZ ISPITIVANOG PODRUČJA

Područje ispitivanih 30 lokacija (Slika 1), površine oko 570 km², geografski pripada Oblasti sjeveroistočne Crne Gore, a administrativno opštini Bijelo Polje. Litološki sastav, tektonika i glaciofluvijalna erozija u ovom području uslovlili su sljedeće morfološke oblike: riječne doline, aluvijalne zaravni, terase, padine različitih nagiba, površi, grebene, bila i druge, sa razvijenom hidrografskom mrežom [13, 14]. Najniži djelovi terena su u dolini rijeke Lim, na 530 do 650 metara nadmorske visine (m. n. v.), površi su sa uzvišenjima od 1000 do 1200 m. n. v., a planinski masivi sa preko 1300 m. n. v.



Slika 1. Geološka mapa Crne Gore (prema M. Pajoviću), sa ispitivanim lokacijama na klastitima Bijelog Polja (označene kvadratićima) i ranije ispitivanim lokacijama na karstu Nikšića (kružići).

Proučavanjem literature o geološkoj građi ispitivanog područja [14–17] i terenskim opažanjima konstatovano je da su sve ispitivane lokacije situirane na geološkoj podlozi izgrađenoj od nekoliko formacija i subformacija terigenih, uglavnom klastičnih sedimenata, slične litologije, nastalih od devona (D) do donjeg trijasa (T_1) i u kvartaru (Q). Zbog sličnog sastava sedimenata, postepenih prelaza i pokrivenosti terena, nejasne su geološke granice, pa su tereni opisivani kao devon-karbon (D+C), karbon-perm (C, P), perm-donji trijas (P, T_1), a karakterišu se metamorfizacijama: slojeviti metapješčari, metaalevroliti, škriljci, konglomerati i sočiva krečnjaka. Od ispitivanih lokacija, njih 19 nalazi se na terenima izgrađenim od C, P metamorfozovanih klastita u podlozi, sedam ih je na podlozi P, T_1 metaklastita, tri na metaklastitima D, C, a jedna lokacija označena je kao permska. Od 30 ispitivanih lokacija, njih 15 smješteno je na aluvijalnim i terasnim sedimentima kvartara (Q), 14 lokacija u podlozi imaju C, P metamorfite, a jedna lokacija je sa P, T_1 podlogom (vidjeti Tabelu 2).

Najveću zastupljenost u ispitivanom prostoru imaju klastiti mlađeg paleozoika, koje karakteriše intergranularna poroznost. Metamorfizovani klastiti (škriljci, laporci, metapješčari, konglomerati, vulkaniti) mogu biti i bez efektivne superkapilarne poroznosti, te nepropusni za površinske i podzemne vode. Značajno su zastupljeni i kvartarni sedimenti (aluvijalni, terasni, deluvijalni), dobro vodopropusni, koje karakterišu izdani (akviferi) intergranularne poroznosti, čiji se koeficijent filtracije (Kf) kreće od $1 \cdot 10^{-1}$ do $1 \cdot 10^{-3}$ cm/s [18].

Oblast sjeveroistočne Crne Gore karakteriše umjereno kontinentalna klima, sa temperaturama vazduha od $-1,7^\circ\text{C}$ do $17,9^\circ\text{C}$ (srednja godišnja $8,9^\circ\text{C}$) i sa pojavama temperaturnih inverzija u nižim djelovima (kotline i duboke doline) [19]. Srednja godišnja količina padavina za područje Bijelog Polja iznosi 888 mm. Najniže padavine (podaci za susjedno Berane) su u avgustu (61,9 mm), a najviše u novembru (116,0 mm). Srednji godišnji broj dana sa snijegom u oblasti sjeveroistočne Crne Gore je od 51 do 58 [18].

Na ispitivanom području zastupljeno je više tipova zemljišta [20, 21]. Područjem protiče rijeka Lim sa više manjih i nekoliko većih pritoka. U aluvijalnoj ravni ovih pritoka nalaze se mlada, nanosna nerazvijena zemljišta, odnosno aluvijum (fluvisol) i koluvijalno zemljište (koluvijum). Izvan aluvijalne ravni, na starim riječnim terasama obrazovano je smeđe eutrično zemljište — eutrični kambisol. Izvan aluvijalne ravni i starih terasa, na brdovitom terenu dominira smeđe kiselo zemljište — distrični kambisol. Aluvijumi, nastali radom vodotoka, obično su slojevite, pjeskovite i pjeskovito-ilovaste građe, pa su jako vodopropustljivi i dobro aerisani. Svi ostali tipovi zemljišta su ilovastog sastava, dosta rastresita i strukturna, ali su prožeta skeletnim česticama različitog oblika i veličine, pa to doprinosi da imaju dobru vodopropusnost i aeraciju. Identifikacija

tipa zemljišta određena je i detaljnije opisana na užoj lokaciji svakog objekta — škole ili porodične kuće.

Na ispitivanim ruralnim lokacijama su škole i kuće izgrađene na ravnim ili blago nagnutim platoima, izravnatim i doradenim za potrebe građenja i za dvorišta oko zgrada. Sagrađene su u drugoj polovini 20. vijeka i posjeduju (sem nekih većih škola i kuća) karakteristike seoske arhitekture iz tog perioda. Spoljašnji zidovi su od pune opeke debljine 25 cm ili šupljih blokova, a rjeđe od poluobrađenog kamena zidanog u krečnom malteru debljine 60 ili 70 cm. Unutrašnji, pregradni zidovi su od pune opeke ili šupljih keramičkih blokova. Fundiranje zidova svih tih zgrada urađeno je plitko, u površinskom sloju konsolidovane zemlje ili stijenske mase. Na svim lokacijama je taj sloj dobre nosivosti, jer nijesu vidljive pukotine u zidovima. Spoljašnja obrada zidova je od krečnog ili produžnog maltera. Unutrašnje površine zidova su malterisane krečnim malterom. Tavanica iznad prizemlja je pretežno od drveta, sa karatavanom od posnog krečnog maltera pomiješanog sa slamom. Objekti su, po pravilu, dotrajali i loše održavani. Najčešće su renovirani samo zamjenom dotrajalih podova i drvene stolarije. Spoljašna drvena stolarija, koja se vremenom vitoperila i loše je dihtovala, zamjenjivana je bravarijom od PVC ili aluminijuma, sa termoizolacionim staklima.

Podovi u prizemnim prostorijama urađeni su na tankim pločama izravnjanja od mršavog betona sa malo cementa. Ovakve ploče su krte i lako lomljive i pri najmanjim pomjeranjima. Najčešće su direktno oslonjene na isplanirani nasip od prirodnog materijala iz iskopa. Nasip je slabo nabijan ručno, sa priručnim sredstvima dostupnim za gradnju na selima u to vrijeme. Debljina nasipa, tj. podloge ispod poda, zavisna je od nagiba platoa na kome se gradi objekat, pa je kod nekih objekata i preko 100 cm. Takva podloga se vremenom neravnomjerno sliježe i deformiše, usljed čega beton od koga je izvedena podna ploča puca i drobi se. Podne ploče su najčešće izvedene bez hidroizolacije i na njih je direktno postavljan pod.

3. METODE MJERENJA

3.1. Metode mjerenja koncentracije radona u tlu, permeabilnosti tla i određivanja geogenog radonskog potencijala lokacije

3.1.1. Određivanje geogenog radonskog potencijala

Za karakterizaciju fizičkih procesa u tlu koji doprinose povišenim koncentracijama radona u unutrašnjosti zgrada najčešće se koriste sljedeće dvije fizičke veličine: *koncentracija radona u tlu* (c) na određenoj dubini, koja je rezultat produkcije radona radioaktivnim raspadom radijuma i njegove emanacije iz

minerala, i *permeabilnost tla* (k) za radonski gas, koja opisuje advektivni transportni mehanizam, koji najčešće dominira nad difuzijom i konvekcijom. Ove dvije veličine zajedno daju parametar koji se naziva *geogeni radonski potencijal* (GRP), a mjeri potencijalnu opasnost od radona na nekom području. U literaturi postoji nekoliko različitih definicija GRP -a [22–25], a u ovom istraživanju korišćen je tzv. „Češki pristup” [26], u kojem je on definisan kao:

$$GRP = \frac{c}{-\log_{10}k-10}. \quad (1)$$

GRP je korelisan sa parametrom *radonski indeks lokacije zgrade* (RI), koji prikazuje nivo rizika od ispuštanja radona iz tla, i ima tri kategorije [26]: *nizak* RI kojem odgovara $GRP < 10$, *srednji* kojem odgovara $10 \leq GRP < 35$ i *visoki* RI za $GRP \geq 35$. U cilju preciznijeg opisa potencijalnog uticaja tla na koncentraciju radona u unutrašnjosti građevinskih objekata, kategorije GRP su dodatno modifikovane („Hrvatski pristup“) uvođenjem podkategorija na način kako je opisano u Tabeli 1 [27].

Tabela 1. Klasifikacija geogenog radonskog potencijala (GRP) i radonskog indeksa (RI).

GRP „Češki pristup”	Kategorija	RI	GRP „Hrvatski pristup”	Kategorija	RI
GRP < 10	1	nizak	GRP < 5	1	vrlo nizak
			$5 \leq GRP < 10$	2	nizak
$10 \leq GRP < 35$	2	srednji	$10 \leq GRP < 22,5$	3	niži srednji
			$22,5 \leq GRP < 35$	4	viši srednji
GRP ≥ 35	3	visok	$35 \leq GRP < 60$	5	visok
			$60 \leq GRP < 125$	6	vrlo visok
			GRP ≥ 125	7	ekstremno visok

3.1.2. Mjerenje permeabilnosti tla

Mjerenje permeabilnosti tla rađeno je uređajem RADON-JOK (proizvođač: Radon v. o. s., Češka Republika), prikazanim na Slici 2. Vazduh se isisava iz tla sa dubine 0,8 m kroz sondu pod stalnim potpritiskom. RADON-JOK uređaj omogućava mjerenje permeabilnosti tla u opsegu od 10^{-11} m^2 do 10^{-14} m^2 .



Slika 2. Uređaj RADON-JOK (lijevo na slici) za mjerenje permeabilnosti tla, i sistem RM-2 (desno na slici) za mjerenje koncentracije radona u tlu na lokaciji mjerenja.

U pogledu radonskog rizika tlo se na osnovu permeabilnosti razvrstava u tri kategorije:

- tlo visoke permeabilnosti: $k > 4 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$;
- tlo srednje permeabilnosti: $4 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2 > k > 4 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2$;
- tlo niske permeabilnosti: $k < 4 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2$.

3.1.3. Mjerenje koncentracije aktivnosti radona u tlu

Mjerenje koncentracije aktivnosti radona u tlu rađeno je mjernim sistemom RM-2 (proizvođač: Radon v. o. s., Češka Republika), prikazanim na Slici 2. Sistem RM-2 čine: elektrometar ERM-3 za očitavanje mjerenja, set jonizacionih komora IK-250 za uzorkovanje, špric za izvlačenje vazduha iz tla i ručne pumpe za vakuumiranje jonizacionih komora.

Elektrometar omogućava dva načina mjerenja koncentracije aktivnosti radona u tlu: „15-minutni način” — mjerenja počinju 15 minuta nakon što je uzorak vazduha uzet iz tla i prebačen u jonizacionu komoru, i „B način mjerenja” — mjerenje počinje nakon što je aktivnost radona i radonovih potomaka dostigla ravnotežu, tj. najmanje 200 minuta nakon ubacivanja uzorka vazduha u detektor.

Uzorak vazduha iz tla uzima se pomoću šprica velike zapremine, kroz šuplju čeličnu sondu koja se zabija u tlo. Uzorak se uzima sa standardne dubine u tlu od 0,8 m i ubacuje u prethodno vakuumiranu jonizacionu komoru.

Ako je prošlo više od 3,5 sati od uzorkovanja, izmjerena vrijednost „B načinom” koriguje se na radioaktivni raspad radona prema formuli:

$$c_{kor} = c_{izm} \cdot e^{[(t-3.5) \cdot 0.0076]} \quad (2)$$

gdje je c_{kor} korigovana koncentracija aktivnosti radona u uzorku vazduha iz tla, c_{izm} izmjerena koncentracija aktivnosti radona u uzorku vazduha iz tla, a t (h) je vrijeme proteklo između uzorkovanja i početka mjerenja.

Koncentracija radona u tlu i permeabilnost tla mjereni su na tri mjesta u blizini zgrade.

3.2. Mjerenje jačine apsorbovane doze gama zračenja u vazduhu iznad tla

Na svakoj od ispitivanih lokacija, u blizini mjesta na kojima je mjerena koncentracija radona u tlu, urađena je serija od 10 mjerenja jačine doze gama zračenja u vazduhu na visini 1 m iznad tla. Za mjerenja jačine doze zračenja korišćen je spektrometar Canberra Inspector 1000, energetskog opsega od 25 keV do 3 MeV, sa NaI sondom 1,5" x 1,5".

3.3. Uzorkovanje zemljišta za laboratorijske analize

Uzorkovanje zemljišta, prema *Core Sampling* metodi [28], obavljeno je neposredno oko mjesta na kojima je mjeran radon u tlu, a najdalje u krugu radijusa 3–4 m od tog mjesta. Nakon što je skidan površinski sloj trave i korijenja, cilindričnim metalnim uzorkivačem uziman je poduzorak zemljišta prečnika 5 cm i dužine 10 cm. Na svakoj od lokacija uzet je uzorak zemljišta koji se sastoji od 12 poduzoraka sa 12 različitih mjesta.

3.4. Metode mjerenja vlažnosti, pH i elektroprovodljivosti zemljišta

Sadržaj vlage (H) određivan je metodom HMIZ–23. Oprema: Sušnica Binder GmbH Njemačka, model FD 115, digitalna, temperaturni opseg rada (20–300)°C. Varijacija temperature na 150°C je $\pm 1,7^\circ\text{C}$, a fluktuacija temperature $\pm 0,3^\circ\text{C}$. Na analitičkoj vagi odmjerava se 2 g uzorka i stavlja u posudu od aluminijuma. Uzorak se zatim suši u sušnici 16 sati na temperaturi 105°C, hladi 30 minuta, pa mjeri na vagi. Razlika masâ vlažnog i suvog uzorka daje sadržaj vlage.

Faktor pH je određivan metodom ISO 10390:2005. Oprema: pH/Ion meter, Eutech Holandija, model Cyber Scan 510 Ion. Mjerni opseg pH je od 0,00 do 14,00, a tačnost 0,01. Uzima se 10 g osušenog uzorka i 50 ml vode, dobro se izmiješa 2–3 minuta i ostavi da odstoji 2 do 3 sata dok se talog ne slegne. Elektroda pH metra, staklena, koja se sastoji od referentne i mjerne elektrode, uroni se zatim u izdvojenju vodu i vrši se mjerenje.

Elektroprovodljivost tla (*EC*) određivana je metodom ASLS–1992. Oprema: Konduktometar Horiba, model DS–15, sa platinskom elektrodom, mjernog opsega (0–199,9) mS/cm, tačnosti $\pm 9\%$. Elektroprovodljivost se radi na istom uzorku zemljišta kao i *pH*.

3.5. *Gamaspektrometrijsko određivanje sadržaja radionuklida u uzorcima zemljišta*

Analiza sadržaja radionuklida u zemljištu realizovana je standardnom metodom [29].

Uzorci zemljišta su sušeni na vazduhu oko dvije sedmice, a zatim osam sati u sušnici na 100°C. Zatim su drobljeni i homogenizovani, prosijavani na situ meša 2 mm i pakovani u cilindrične posude zapremine 250 ml, nakon čega su mjerene njihove mase.

Snimanje i analiza uzoraka urađeni su na ORTEC-ovom spektrometru sa koaksijalnim poluprovodničkim HPGe detektorom GEM–40190 visoke rezolucije, u niskofonskoj zaštiti. Detektor ima sljedeće karakteristike: efikasnost 41%; FWHM = 1,80 keV na 1,33 MeV ^{60}Co ; FWHM = 840 eV na 122 keV ^{57}Co ; fon detektora je 1,23 imp/s.

Za kalibraciju energije i efikasnosti gama spektrometra korišćen je čvrsti kalibracioni standard tipa CBSS 2 (proizvođač: Czech Metrology Institute), sa matriksom od silikonske smole i miksom radionuklida ^{241}Am , ^{109}Cd , ^{139}Ce , ^{57}Co , ^{60}Co , ^{137}Cs , ^{113}Sn , ^{85}Sr i ^{88}Y u cilindričnoj posudi zapremine 250 cm³.

Snimanje spektara gama zračenja svakog od uzoraka zemljišta, u trajanju 24 sata, rađeno je najmanje 28 dana od pripreme analitičkog uzorka, po uspostavljanju u njemu radioaktivne ravnoteže između ^{226}Ra i potomaka. U uzorcima su mjerene aktivnosti sledećih radioizotopa: ^{40}K (preko pika na 1460,75 keV), ^{232}Th (338,32 keV, 911,20 keV), ^{235}U (143,76 keV, 163,33 keV), ^{238}U (1001,03 keV) i ^{226}Ra (295,22 keV, 351,93 keV, 609,31 keV, 1120,2 keV, 1764,4 keV).

4. REZULTATI I DISKUSIJA

4.1. Tabelarni prikaz rezultata

Tabela 2. Geološke i pedološke karakteristike lokacija

Lokacija	Vrsta (starost) stijena u podlozi	Tip zemljišta
1. Slijepač Most, OŠ	Smeđi slojeviti pješčari, pločasti i listasti liskunovito-pjeskoviti škriljci (C, P, al.)	Koluvijum
2. Slijepač Most, kuća	Tamnosiivi uslojeni laporoviti pješčari (P, T ₁ , al.)	Koluvijum

Lokacija	Vrsta (starost) stijena u podlozi	Tip zemljišta
3. Pribiloviće, kuća	Komadi laporovitih pješčara, pjeskovitih krečnjaka, dolomitičnih krečnjaka (C?, P)	Distrični kambisol
4. Ravna Rijeka, OŠ	Rječna terasa, aluvijalni nanos, ispod pješčari i škriljci (C, P, al., t.)	Eutrični kambisol
5. Ribarevina, kuća	Pješčari, škriljci (C, P, al., t.)	Eutrični kambisol
6. Ostrelj, OŠ	Izdanak sivozelenih škriljaca (EP65/35), smeđesivi meta-pješčari (C, P)	Distrični kambisol
7. Pape, kuća	Sivi liskunoviti, listasti škriljci (C, P, al.)	Aluvijum
8. Potrk, OŠ	Pješčari, crni kvrgavi krečnjaci (P, T ₁)	Distrični kambisol
9. Tomaševo, OŠ	Metapješčari, argilofiliti (C, P, al.)	Eutrični kambisol
10. Pavino Polje, OŠ	Skelet sivosmeđih liskunovitih pješčara, argilofilita, tamnosivih krečnjaka (D, C, al.)	Eutrični kambisol
11. Mahala, OŠ	Komadi sivih, liskunovitih kvarcnih pješčara (D, C)	Koluvijum
12. Grab, OŠ	Klastiti — metapješčari i metaalevroliti (C, P)	Koluvijum
13. Lješnica, kuća	Klastiti — metapješčari, metaalevroliti (C, P, al.)	Aluvijum
14. Kanje, OŠ	Klastiti — metapješčari, škriljci (C, P)	Distrični kambisol
15. Mioče, kuća	Klastiti — metapješčari, škriljci (D, C)	Distrični kambisol
16. Plani, kuća	Uškriljeni pješčari, svijetlosmeđi sericitski škriljci (P)	Distrični kambisol
17. Njegnjevo, OŠ	Pješčari, krečnjaci, škriljci, vulkaniti (C, P, al., t.)	Eutrični kambisol
18. Njegnjevo, kuća	Terasni sedimenti (C, P, al.)	Eutrični kambisol
19. Bistrica, OŠ	Pješčari, škriljci (C, P, al., t.)	Koluvijum
20. Poda, OŠ	Pješčari, škriljci (C, P, al.)	Eutrični kambisol
21. Paločak, kuća	Pješčari, škriljci, laporoviti pješčari (P, T ₁)	Distrični kambisol
22. Lozna, OŠ	Šljunak, pijesak, zaobljeni i poluzaobljeni komadi pješčara (P, T ₁ , al., t.)	Eutrični kambisol
23. Goduša, OŠ	Pješčari, škriljci, laporoviti pješčari, krečnjaci, vulkanoklastiti (P, T ₁)	Koluvijum
24. Raduliće, OŠ	Klastiti — škriljci, pješčari (C, P)	Distrični kambisol
25. Ivanje, OŠ	Klastiti — škriljci, pješčari (C, P, al.)	Aluvijum
26. Ivanje, kuća	Pješčari, škriljci (P, T ₁)	Distrični kambisol
27. Godijevo, OŠ	Klastiti — pješčari, škriljci (P, T ₁)	Distrični kambisol
28. Pripčice, OŠ	Klastiti — pješčari, škriljci (C, P, al., t.)	Koluvijum
29. Zaton, kuća	Klastiti — pješčari, škriljci (C, P, al.)	Aluvijum
30. Brzava, kuća	Klastiti — pješčari, škriljci (C, P, al., t.)	Koluvijum

OŠ — osnovna škola, D — devon, C — karbon, P — perm, T₁ — donji trijas, al — aluvion, t — terasa

Tabela 3. Vlažnost (*H*), *pH* i elektroprovodljivost (*EC*) zemljišta

Lokacija i objekt	H (%)	pH*	EC (μS/cm)
1. Slijepač Most, OŠ	7,2	5,80 ± 0,09	129,7
2. Slijepač Most, kuća	10,0	6,54 ± 0,11	148,2
3. Pribiloviće, kuća	6,5	5,57 ± 0,09	116,6
4. Ravna Rijeka, OŠ	14,7	5,68 ± 0,09	297,0
5. Ribarevina, kuća	11,0	5,88 ± 0,10	184,5
6. Ostrelj, OŠ	9,0	6,70 ± 0,11	210,7
7. Pape, kuća	6,7	6,28 ± 0,10	194,7
8. Potrk, OŠ	10,8	7,10 ± 0,12	179,9
9. Tomaševo, OŠ	9,5	7,60 ± 0,12	124,5
10. Pavino Polje, OŠ	9,6	6,60 ± 0,11	174,0
11. Mahala, OŠ	5,1	6,30 ± 0,10	178,4
12. Grab, OŠ	8,5	5,71 ± 0,09	118,6
13. Lješnica, kuća	10,1	6,58 ± 0,11	184,3
14. Kanje, OŠ	15,8	7,13 ± 0,12	175,4
15. Mioče, kuća	5,9	6,74 ± 0,11	174,2
16. Plani, kuća	9,8	5,80 ± 0,09	139,7
17. Njegnjevo, OŠ	7,2	7,21 ± 0,12	190,1
18. Njegnjevo, kuća	9,5	6,67 ± 0,11	211,7
19. Bistrica, OŠ	7,2	7,18 ± 0,12	141,8
20. Poda, OŠ	6,8	6,90 ± 0,11	274,0
21. Paločak, kuća	10,3	7,06 ± 0,11	137,8
22. Lozna, OŠ	15,5	6,48 ± 0,10	171,8
23. Goduša, OŠ	4,6	6,95 ± 0,11	151,9
24. Raduliće, OŠ	7,5	6,74 ± 0,11	94,6
25. Ivanje, OŠ	7,1	6,33 ± 0,10	77,2
26. Ivanje, kuća	2,4	6,45 ± 0,10	93,1
27. Godijevo, OŠ	3,7	6,35 ± 0,10	125,9
28. Pripčiče, OŠ	10,8	5,98 ± 0,10	92,9
29. Zaton, kuća	9,9	6,70 ± 0,11	257,0
30. Brzava, kuća	3,6	6,72 ± 0,11	82,3

* Vrijednosti *pH* date su sa standardnom devijacijom.

Tabela 4. Koncentracije aktivnosti radionuklida u tlu i jačina doze (*D*) u vazduhu*

Lokacija	²³⁵ U (Bq/kg)	²³⁸ U (Bq/kg)	²²⁶ Ra (Bq/kg)	²³² Th (Bq/kg)	⁴⁰ K (Bq/kg)	D (nGy/h)
1. Slijepač Most, OŠ	2,6 (0,7)	38,6 (11,4)	29,4 (3,0)	42,1 (3,4)	608 (36)	61 (6)
2. Slijepač Most, kuća	1,9 (0,6)	42,5 (8,5)	33,7 (2,8)	46,7 (3,5)	584 (30)	48 (7)
3. Pribiloviće, kuća	2,8 (0,4)	59,1 (9,5)	37,4 (3,1)	54,5 (3,1)	672 (34)	55 (4)
4. Ravna Rijeka, OŠ	2,5 (0,4)	50,3 (10,1)	33,7 (2,7)	39,1 (2,3)	490 (25)	43 (5)
5. Ribarevina, kuća	2,6 (0,5)	56,4 (9,6)	30,3 (2,4)	42,7 (3,1)	531 (28)	52 (8)
6. Ostrelj, OŠ	2,1 (0,4)	37,1 (8,7)	22,5 (1,9)	35,3 (1,8)	455 (25)	46 (6)
7. Pape, kuća	2,5 (0,8)	39,1 (12,1)	35,5 (2,8)	49,9 (3,7)	686 (41)	60 (6)
8. Potrk, OŠ	≤ 1,4	47,8 (8,3)	27,9 (2,2)	39,6 (2,7)	438 (28)	51 (10)
9. Tomaševo, OŠ	≤ 1,4	30,7 (4,6)	26,3 (2,1)	39,9 (3,1)	533 (32)	49 (4)
10. Pavino Polje, OŠ	2,1 (0,4)	44,2 (7,6)	25,9 (2,1)	38,2 (2,8)	467 (29)	51 (7)
11. Mahala, OŠ	≤ 1,4	35,0 (6,7)	26,3 (2,1)	39,0 (2,8)	555 (33)	63 (8)
12. Grab, OŠ	≤ 1,5	61,3 (14,3)	32,2 (2,6)	51,0 (3,5)	715 (44)	60 (9)
13. Lješnica, kuća	≤ 1,5	33,1 (8,1)	30,2 (2,4)	42,9 (2,7)	593 (36)	62 (8)
14. Kanje, OŠ	≤ 1,5	50,5 (3,1)	26,3 (2,1)	39,7 (2,6)	464 (28)	52 (6)
15. Mioče, kuća	2,0 (0,4)	75,3 (10,9)	31,6 (2,5)	44,6 (2,8)	561 (34)	60 (8)
16. Plani, kuća	2,0 (0,4)	48,7 (2,9)	29,6 (2,3)	44,3 (2,7)	490 (30)	63 (7)
17. Njegnjevo, OŠ	≤ 1,1	27,8 (6,7)	22,2 (1,3)	29,1 (1,7)	364 (22)	40 (4)
18. Njegnjevo, kuća	2,2 (0,4)	41,5 (8,5)	27,9 (2,2)	46,2 (2,9)	650 (40)	52 (5)
19. Bistrica, OŠ	≤ 1,2	29,3 (1,8)	18,5 (1,1)	30,6 (1,8)	453 (28)	33 (6)
20. Poda, OŠ	2,2 (0,4)	43,7 (7,9)	31,9 (2,6)	56,7 (3,4)	406 (25)	48 (7)
21. Paločak, kuća	≤ 1,2	38,3 (7,3)	27,1 (2,2)	41,8 (2,6)	503 (31)	43 (6)
22. Lozna, OŠ	≤ 1,3	25,2 (8,5)	26,5 (2,1)	42,2 (2,7)	503 (31)	60 (5)
23. Goduša, OŠ	≤ 1,5	48,8 (11,6)	31,9 (2,5)	50,5 (3,1)	680 (40)	46 (6)
24. Raduliće, OŠ	1,9 (0,4)	43,1 (10,2)	32,3 (2,5)	47,2 (2,8)	625 (37)	50 (6)
25. Ivanje, OŠ	2,5 (0,4)	56,4 (11,5)	30,2 (2,4)	49,1 (3,2)	624 (38)	56 (7)
26. Ivanje, kuća	2,4 (0,6)	48,4 (6,8)	45,2 (3,6)	66,9 (4,1)	827 (50)	47 (5)
27. Godijevo, OŠ	2,6 (0,7)	30,9 (5,7)	34,4 (2,8)	52,9 (3,3)	665 (40)	57 (4)
28. Pripčiče, OŠ	2,5 (0,6)	32,1 (7,5)	29,5 (2,4)	43,4 (2,7)	540 (35)	49 (7)
29. Zaton, kuća	2,1 (0,4)	61,5 (9,5)	28,5 (2,3)	45,5 (2,7)	613 (37)	45 (4)
30. Brzava, kuća	2,4 (0,6)	38,2 (12,3)	32,4 (2,6)	46,8 (2,9)	628 (38)	43 (7)

* Standardna devijacija je data u zagradi.

Tabela 5. Koncentracija radona (c) u tlu, permeabilnost (k) tla, geogeni radonski potencijal (GRP) i radonski indeks (RI) lokacije, i koncentracija radona ($C_{Rn,ind}$) u zgradi

Lokacija	c (kBq/m ³)	k (10 ⁻¹³ m ²)	GRP	RI (Češki)	RI (Hrvatski)	$C_{Rn,ind}$ (Bq/m ³)
1. Slijepač Most, OŠ	18,9	180,0	25,4	Srednji	Viši srednji	150
2. Slijepač Most, kuća	19,9	0,5	6,1	Nizak	Nizak	63
3. Pribiloviće, kuća	7,9	180,0	10,6	Srednji	Niži srednji	95
4. Ravna Rijeka, OŠ	21,7	180,0	29,1	Srednji	Viši srednji	176
5. Ribarevina, kuća	40,2	52,7	31,4	Srednji	Viši srednji	32
6. Ostrelj, OŠ	47,7	167,0	61,3	Visok	Vrlo visok	87
7. Pape, kuća	19,0	130,7	21,5	Srednji	Niži srednji	38
8. Potrk, OŠ	20,1	180,0	27,0	Srednji	Viši srednji	48
9. Tomaševo, OŠ	32,0	136,0	37,0	Visok	Visok	359
10. Pavino Polje, OŠ	32,0	105,1	32,7	Srednji	Viši srednji	352
11. Mahala, OŠ	27,2	117,4	29,2	Srednji	Viši srednji	148
12. Grab, OŠ	32,1	180,0	43,1	Visok	Visok	158
13. Lješnica, kuća	33,1	180,0	44,4	Visok	Visok	208
14. Kanje, OŠ	72,3	4,8	31,2	Srednji	Viši srednji	72
15. Mioče, kuća	16,2	134,9	18,6	Srednji	Niži srednji	260
16. Plani, kuća	94,8	19,4	55,4	Visok	Visok	32
17. Njegnjevo, OŠ	9,0	180,0	12,1	Srednji	Niži srednji	57
18. Njegnjevo, kuća	15,5	41,2	11,2	Srednji	Niži srednji	68
19. Bistrica, OŠ	27,1	0,6	8,4	Nizak	Nizak	398
20. Poda, OŠ	10,6	162,0	13,4	Srednji	Niži srednji	147
21. Paločak, kuća	39,6	180,0	53,2	Visok	Visok	347
22. Lozna, OŠ	22,8	140,2	26,8	Srednji	Viši srednji	379
23. Goduša, OŠ	39,0	180,0	52,3	Visok	Visok	140
24. Raduliće, OŠ	73,8	119,6	80,0	Visok	Vrlo visok	78
25. Ivanje, OŠ	86,4	8,9	42,1	Visok	Visok	53
26. Ivanje, kuća	76,7	24,3	47,5	Visok	Visok	48
27. Godijevo, OŠ	35,5	68,5	30,5	Srednji	Viši srednji	113
28. Pripčiče, OŠ	25,9	180,0	34,8	Srednji	Viši srednji	87
29. Zaton, kuća	38,0	20,3	22,4	Srednji	Niži srednji	134
30. Brzava, kuća	24,0	180,0	32,2	Srednji	Viši srednji	128

Deskriptivna statistika svih mjerenih parametara data je u Tabeli 6.

4.2. Analiza rezultata

Na teritoriji Crne Gore teško je naći iole šire područje u kojem u osnovi nijesu dominantno karbonatne stijene — krečnjaci, dolomiti i njihove tranzicije, na kojima je ranije istraživao radon u karstnoj ruralnoj oblasti zapadnog dijela opštine Nikšić [12]. Jedno od takvih rijetkih područja postoji u opštini Bijelo Polje, i uz to je relativno prostrano (oko 570 km²), tako da u potpunosti odgovara ciljevima ovog istraživanja. Ovo područje karakterišu klastične sedimentne stijene (Tabela 2), formirane predominantno od polomljenih fragmenata, zrna i čestica nastalih raspadanjem starijih stijena usljed atmosferskih uticaja i erozije. Zemljište razvijeno na takvom substratu od tvrdih klastičnih stijena je smeđe (kambisol) ili aluvijalno/koluvijalno (Tabela 2).

Tabela 6. Deskriptivna statistika rezultata mjerenja na 30 lokacija u opštini Bijelo Polje

Parametar	Opseg	AM	σ_{AM}	MED
c (kBq/m ³)	7,9–94,8	35,3	4,2	29,6
k (10 ⁻¹³ m ²)	0,5–180	114	13	135
GRP	6,1–80,0	32,4	3,1	30,8
H (%)	2,4–15,8	8,5	0,6	8,8
pH	5,57–7,60	6,52	0,10	6,59
EC (μS/cm)	77,2–297	161	10	162
D (nGy/h)	33–63	51,5	1,4	51
²³⁸ U (Bq/kg)	25,2–75,3	43,8	2,1	42,8
²²⁶ Ra (Bq/kg)	18,5–45,2	29,9	0,9	29,9
²³⁵ U (Bq/kg)	1,1–2,8	1,8	0,1	2,0
²³² Th (Bq/kg)	29,1–66,9	44,6	1,4	43,8
⁴⁰ K (Bq/kg)	364–827	564	19	558
C _{Rn,ind} (Bq/m ³)	32–398	148	21	120

AM — aritmetička sredina; σ_{AM} — standardna greška aritmetičke sredine; MED — medijana

pH vrijednosti u Tabeli 3 i Tabeli 6 pokazuju da su uzorkovana zemljišta umjereno kisela (*pH* opseg 5,6–6,0), blago kisela (opseg 6,1–6,5), neutralna (6,6–7,3) i blago alkalna (7,4–7,6), u srednjem (6,52) na granici između blago kiselih i neutralnih zemljišta [30]. Relativno niske vrijednosti električne provodnosti *EC* (Tabela 3 i Tabela 6) ukazuju da uzorkovana zemljišta imaju nizak salinitet i dobru dreniranost [30].

Tabela 6 pokazuje da su u odnosu na srednje koncentracije prirodnih radionuklida u tlu Crne Gore (⁴⁰K 246 Bq/kg, ²³²Th 24 Bq/kg i ²³⁸U 29 Bq/kg [31]), srednje koncentracije ⁴⁰K (564 Bq/kg), ²³²Th (44,6 Bq/kg) i ²³⁸U (43,8

Bq/kg) u zemljištu ispitivanog područja Bijelog Polja veće oko dva puta. Srednja koncentracija ^{238}U , preteče ^{222}Rn , na nivou je srednje vrijednosti za zemljišta u svijetu (33 Bq/kg) [32]. Koncentracije ^{226}Ra , čijim se radioaktivnim raspadom dobija ^{222}Rn , u zemljištu na 30 lokacija na klastitima Bijelog Polja (opseg 18,5 Bq/kg do 45,2 Bq/kg, AM = 29,9 Bq/kg) višestruko su niže od onih u zemljištu na 25 lokacija u karstnom području Nikšića (opseg 48 Bq/kg do 326 Bq/kg, AM = 167 Bq/kg [12]).

Srednja vrijednost jačine doze zračenja u vazduhu na ispitivanim lokacijama na klastitima (51,5 nGy/h) je na nivou prosječne vrijednosti u Crnoj Gori (55 nGy/h) [31] i svjetskog prosjeka (58 nGy/h) [32].

Koncentracija aktivnosti radona u tlu (c) na ispitivanih 30 lokacija kreće se (Tabela 6) u granicama (7,9–94,8) kBq/m³, sa srednjom vrijednošću 35,3 kBq/m³, koja pripada relativno niskim vrijednostima koncentracija radona u tlu. Primjera radi, u Gornjoj Austriji, najmanje koncentracije radona u tlu izmjerene su na lokacijama sa dolomitima u podlozi, u opsegu (0,9–79,5) kBq/m³, a najveće na lokacijama sa gnajsom (metamorfna stijena — kristalasti škriljac) u podlozi, u opsegu (23–953) kBq/m³ [33]. U karstnom području Nikšića izmjerene su znatno veće koncentracije aktivnosti radona u tlu, u opsegu (8,9–390) kBq/m³, sa srednjom vrijednošću 115 kBq/m³ [12]. Nešto veće koncentracije aktivnosti radona u tlu ($c > 70$ kBq/m³) izmjerene su u ispitivanom području Bijelog Polja na pet lokacija: Plani — kuća, Ivanje — OŠ i kuća, Raduliće — OŠ i Kanje — OŠ (Tabela 5).

Vrijednosti permeabilnosti tla (k) na ispitivanim lokacijama opštine Bijelo Polje su u opsegu (0,5–180)·10⁻¹³ m², sa vrlo visokom srednjom vrijednošću od 114·10⁻¹³ m², što znači da je zemljište ispitivanog područja vrlo propusno za radonski gas, te stoga i radonski indeks većine lokacija ima značajnije vrijednosti i pored relativno niskih koncentracija radona u tlu. Poređenja radi, srednja vrijednost visoke permeabilnosti tla u karstnom području Nikšića je samo nešto malo veća i iznosi 153·10⁻¹³ m² [12]. Niske permeabilnosti tla ($k < 5$ ·10⁻¹³ m²) izmjerene su samo na tri lokacije: Slijepač Most — kuća, Bistrica — OŠ i Kanje — OŠ (Tabela 5).

Kako se na ispitivanih 30 lokacija *GRP* kreće u opsegu od 6,1 do 80, sa srednjom vrijednošću 32,4 (Tabela 6), na većini lokacija je radonski indeks (*RI*) prema Češkoj klasifikaciji *srednji*, a *visok* je na 10 lokacija: Ostrelj — OŠ, Tomaševo — OŠ, Grab — OŠ, Lješnica — kuća, Plani — kuća, Paločak — kuća, Goduša — OŠ, Raduliće — OŠ i Ivanje — OŠ i kuća, dok je prema Hrvatskoj klasifikaciji *RI vrlo visok* samo na dvije lokacije: Ostrelj — OŠ i Raduliće — OŠ, a *ekstremno visok* nije ni na jednoj (Tabela 5).

Tabela 6 pokazuje da na ispitivanom području nema izrazito visokih vrijednosti koncentracija aktivnosti radona u zgradama ($C_{Rn,ind}$) — opseg izmjerenih vrijednosti je (32–398) Bq/m³. Srednja vrijednost u tih 30 uzorkovanih zgrada je

148 Bq/m³, i ona je nešto malo veća od one u 88 ranije ispitivanih zgrada u opštini Bijelo Polje, koja je 125 Bq/m³ [34], a značajno je niža od srednje vrijednosti u 1200 ispitivanih zgrada u čitavoj Crnoj Gori, koja je 187 Bq/m³ [34], dok je čak 6,6 puta niža od srednje vrijednosti 977 Bq/m³ za 25 zgrada na karstnim lokacijama u zapadnom dijelu opštine Nikšić, gdje je i opseg izmjerenih koncentracija radona višestruko veći (219–2494) Bq/m³ [12]. Samo u pet od 30 ispitivanih zgrada na klastitima je srednja godišnja koncentracija aktivnosti radona veća od međunarodno prihvaćenog referentnog nivoa od 300 Bq/m³, ali ni u jednoj od njih ne prelazi nivo od 400 Bq/m³ (Tabela 5). Četiri od tih pet zgrada su osnovne škole, a samo jedna je kuća, što ukazuje na to da, iako u posmatranoj oblasti opštine Bijelo Polje sa klastitima u podlozi ne postoji generalno ozbiljniji problem sa izlaganjem stanovništva radonu u zgradama, ipak je neophodno posvetiti punu pažnju smanjenju izloženosti djece štetnom dejstvu radona tokom njihovog boravka u te četiri osnovne škole.

Kao što se vidi iz Tabele 2, različite su vrste i starost stijena u podlozi ispitivanih lokacija u Bijelom Polju, ali se one sve mogu svrstati u jednu litofacijalnu grupu stijena — terigeni metamorfisani sedimenti, tj. pješčari i škriljci. U toj tabeli primjećuje se da se u podlozi na pet lokacija (Pribiloviće, Potrk, Pavinno Polje, Goduša i škola u Njegnjevu), pored pješčara i škriljaca, pojavljuju u manjoj mjeri i neki oblici krečnjaka, a Tabela 5 kazuje da na tim lokacijama postoji vrlo visoka permeabilnost tla za radonski gas — na četiri od njih maksimalno mjerljiva korišćenim RADON-JOK uređajem ($k = 1,8 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2$), a u Pavinom Polju samo nešto malo niža ($k = 1,0 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2$). Međutim, kako je koncentracija aktivnosti radona u tlu na tim lokacijama relativno niska (7,9 do 39 kBq/m³), to je i radonski indeks *RI* prema češkoj klasifikaciji *visok* samo na lokaciji Goduša, dok je na ostale četiri lokacije *srednji* (Tabela 5).

Četiri su tipa zemljišta na ispitivanim lokacijama (Tabela 2), a za potrebe statističke analize mogu se svrstati u dvije grupe: aluvijalno-koluvijalna zemljišta, prisutna na 12 lokacija, i kambisol (smeđe zemljište), na 18 lokacija. Na Tabeli 7 prikazane su za te grupe zemljišta srednje vrijednosti parametara karakterističnih za pojave radona u tlu i u zgradama izgrađenim na tim zemljištima.

Vidi se da se te srednje vrijednosti parametara za dvije grupe zemljišta preklapaju kad se uzmu u obzir i njihove standardne devijacije. Ipak, u cilju provjere da li se srednje vrijednosti zaista razlikuju po kategorijama tih parametara, urađeni su odgovarajući t-testovi za aritmetičke sredine i Mann-Whitney testovi za medijane (Tabela 8). Ti testovi pokazuju da za relativno mali uzorak ispitivanih lokacija ($n = 30$) nijesu nađene statistički značajne razlike (na nivou značajnosti od 95%) među srednjim vrijednostima i medijanama parametara c , k , GRP , ^{226}Ra , D i $C_{Rn,ind}$ za dvije različite grupe zemljišta (aluvijalno-koluvijalno i kambisol).

Tabela 7. Srednje vrijednosti i medijane nekih parametara tla, jačine doze spoljašnjeg zračenja i koncentracije radona u zgradama za sve lokacije i po kategorijama zemljišta

Parametar		Sve lokacije n = 30	Aluv. kol. zemljište n = 12	Smeđe zemljište n = 18
c (kBq/m ³)	AM (σ_{AM})	35,3 (4,2)	32,6 (5,3)	37,1 (6,2)
	MED	29,6	27,2	32
k (10 ⁻¹³ m ²)	AM (σ_{AM})	114 (13)	113 (23)	115 (15)
	MED	135	155	135
GRP	AM (σ_{AM})	32,4 (3,1)	30,2 (4,1)	33,8 (4,5)
	MED	30,8	30,7	30,8
²²⁶ Ra (Bq/kg)	AM (σ_{AM})	29,9 (0,9)	29,8 (1,2)	29,9 (1,3)
	MED	29,9	30,2	28,8
D (nSv/h)	AM (σ_{AM})	51,5 (1,4)	52,2 (2,7)	51,0 (1,5)
	MED	51	52,5	51,0
C _{Rn,ind} (Bq/m ³)	AM (σ_{AM})	148 (21)	142 (27)	153 (30)
	MED	120	137	91

n — broj lokacija; AM — aritmetička sredina; σ_{AM} — standardna devijacija srednje vrijednosti; MED — medijana

Tabela 8. t-test i Mann-Whitney test za aluvijalno-koluvijalno i smeđe zemljište

Parametar	t-test				Mann-Whitney test			
	t Stat	DF	Prob> t	Signif.	U	Z	Asymp. Prob> U	Signif.
c (kBq/m ³)	-0,52645	28	0,60272	NOT	106	-0,0635	0,94937	NOT
k (10 ⁻¹³ m ²)	-0,08044	28	0,93646	NOT	111	0,10852	0,91358	NOT
GRP	-0,56596	28	0,57593	NOT	99	-0,35983	0,71897	NOT
²²⁶ Ra (Bq/kg)	-0,04531	28	0,96418	NOT	121	0,52964	0,59636	NOT
D (nSv/h)	0,38691	28	0,70175	NOT	118	0,4032	0,6868	NOT
C _{Rn,ind} (Bq/m ³)	-0,24945	28	0,80484	NOT	119,5	0,46582	0,64134	NOT
	Null Hypothesis: mean1-mean2 = 0 Alternative Hypothesis: mean1-mean2 ≠ 0 At 0.05 level, when equal variance is assumed, Mean1 - Mean2 is NOT significantly different from 0				Null Hypothesis: Median1 = Median2 Alternative Hypothesis: Median1 ≠ Median2 At the 0.05 level, the two distributions are NOT significantly different.			

Zbog relativno malog broja ispitivanih lokacija, tj. relativno malog uzorka ($n = 30$), za statističku analizu korelacija među posmatranim parametrima lokacija (varijablama) korišćena je neparametarska metoda Spearmanove korelacije ranga, koja ne pretpostavlja normalnu raspodjelu varijable, niti linearnu povezanost među varijablama, a utvrđuje postojanje relacije između parametara koji se ne mijenjaju zajedno istom brzinom. Spearmanovi koeficijenti korelacije ranga, prikazani na Tabeli 9, otkrivaju postojanje sljedećih veza između „radijacionih” varijabli: jake veze između c i GRP ($r_s = 0,810, p < 0,001$), ^{232}Th i ^{226}Ra ($r_s = 0,826, p < 0,001$) i ^{40}K i ^{232}Th ($r_s = 0,752, p < 0,001$), umjerene (srednje) veze između ^{40}K i ^{226}Ra ($r_s = 0,684, p < 0,001$), slabe veze između k i c ($r_s = -0,372, p = 0,043$), ^{226}Ra i ^{238}U ($r_s = 0,406, p = 0,026$) i ^{232}Th i ^{238}U ($r_s = 0,386, p = 0,035$). Oni pokazuju i postojanje sljedećih veza između „radijacionih” i „neradijacionih” parametara tla na ispitivanim lokacijama: umjerene (srednje) veze između ^{226}Ra i pH ($r_s = -0,503, p = 0,005$) i D i pH ($r_s = -0,520, p = 0,003$), i slabe veze između EC i GRP ($r_s = -0,363, p = 0,048$), ^{226}Ra i H ($r_s = -0,376, p = 0,040$) i ^{232}Th i H ($r_s = -0,490, p = 0,006$). Dakle, kao što se moglo i očekivati, Spearmanove korelacije pokazuju vezu varijabli c i GRP , kao i vezu koncentracija ^{226}Ra sa koncentracijama ^{238}U . Međutim, neočekivano je da one ne pokazuju vezu jačine doze zračenja D u vazduhu iznad tla sa koncentracijama radioizotopa prisutnih u tlu.

Za razliku od Spearmanovih, Pearsonove korelacije analiziraju linearnu povezanost između dva parametra (Tabela 10). Njihova primjena pokazuje da među „radijacionim” parametrima na ispitivanim lokacijama postoji jaka pozitivna linearna veza između ^{232}Th i ^{226}Ra ($r_p = 0,890, p < 0,001$), ^{40}K i ^{226}Ra ($r_p = 0,746, p < 0,001$), ^{40}K i ^{232}Th ($r_p = 0,753, p < 0,001$) i GRP i c ($r_p = 0,700, p = 0,003$), umjerena inverzna linearna veza između k i c ($r_s = -0,521, p = 0,003$) i slaba veza između ^{226}Ra i ^{238}U ($r_p = 0,389, p = 0,034$). Konstatovane su i sljedeće umjerene i slabe inverzne linearne veze između „radijacionih” i „neradijacionih” parametara tla na ispitivanim lokacijama: EC i c ($r_p = -0,372, p = 0,043$), ^{226}Ra i H ($r_p = -0,377, p = 0,040$), ^{226}Ra i pH ($r_p = -0,459, p = 0,011$), ^{232}Th i H ($r_p = -0,461, p = 0,010$), ^{40}K i H ($r_s = -0,509, p = 0,004$), ^{40}K i pH ($r_p = -0,370, p = 0,044$), ^{40}K i EC ($r_p = -0,450, p = 0,013$) i D i pH ($r_p = -0,493, p = 0,006$).

Koncentracije aktivnosti ^{235}U u tlu na ispitivanim lokacijama su vrlo niske, u opsegu $1,1 \text{ Bq/m}^3$ do $2,8 \text{ Bq/m}^3$ (u prosjeku oko pet puta manje nego na ispitivanim karstnim lokacijama u području Nikšića [12]), tako da su određivane sa relativno velikom standardnom devijacijom, a na 11 od ukupno 30 ispitivanih lokacija one su bile ispod detekcionog praga koji se u datim gamaspektrometrijskim uslovima kretao od $1,1 \text{ Bq/m}^3$ do $1,5 \text{ Bq/m}^3$. Zbog toga su Spearmanove i Pearsonove korelacije koncentracija ^{235}U sa drugim ispitivanim parametrima na Tabeli 9 i Tabeli 10 osjenčene, i kao nesigurne nijesu ni uzimane u razmatranje.

Pozitivna linearna korelacija između jačine doze gama zračenja u vazduhu (D) i koncentracije aktivnosti ^{226}Ra u tlu nađena je u nekim istraživanjima [35, 36], kao i između D i koncentracije radona (c) u tlu [33, 37], a i između koncentracija radona i radijuma u tlu [38, 39]. Za razliku od karstnog područja Nikšića gdje je konstatovana pozitivna linearna povezanost jačine doze gama zračenja (D) u vazduhu na lokaciji sa koncentracijama ^{226}Ra i radona (c) u tlu i sa GRP lokacije [33], Pearsonove korelacije ne pokazuju postojanje takve veze na ispitivanim lokacijama na klastitima u području Bijelog Polja (Tabela 10), te se na ovim lokacijama D ne može koristiti kao neki indikator koncentracija radijuma i radona u tlu i geogenog radonskog potencijala (GRP) lokacije.

Kada je u pitanju korelacija između *indoor* koncentracija radona ($C_{Rn,ind}$) i varijabli koje karakterišu zemljište, primjera radi, u ravničarskom regionu Srbije, u kojem dominira černozem (crnica) tip zemljišta, nađena je veoma slaba takva linearna korelacija, od kojih je najjača ona sa koncentracijom ^{226}Ra u zemljištu na dubini od 30 cm [38], koja je slabija za površinski sloj zemljišta. Međutim, za ranije ispitivani karstni region u Crnoj Gori, u području opštine Nikšić, Spearmanove i Pearsonove korelacije nijesu pokazale statistički značajnu vezu između $C_{Rn,ind}$ i bilo koje od mjerenih varijabli koje karakterišu zemljište na ispitivanim lokacijama [12]. Ni za 30 ispitivanih lokacija na klastitima u području opštine Bijelo Polje Spearmanove korelacije ne pokazuju statistički značajnu vezu između $C_{Rn,ind}$ i bilo koje od mjerenih varijabli koje karakterišu zemljište (Tabela 9), dok su Pearsonove korelacije našle inverznu linearnu vezu između koncentracija radona u zgradama ($C_{Rn,ind}$) i koncentracija aktivnosti ^{226}Ra ($r_p = -0,420, p = 0,021$) u tlu ispod tih zgrada (Tabela 10), što je neobično i upravo suprotno onome što bi se moglo očekivati. Stoga, za cjelovitije sagledavanje mogućih uzroka postojećih nivoa koncentracija radona u zgradama na ispitivanim lokacijama, neophodno je uzeti u obzir i konstruktivne karakteristike zgrada, kao i navike njihovih korisnika (grijanje, provjetranje).

Tabela 9. Spearmanovi koeficijenti korelacije i pripadne p-vrijednosti za sve varijable (za svih 30 lokacija)

	<i>c</i>	<i>k</i>	GRP	<i>H</i>	<i>pH</i>	EC	²³⁵ U	²³⁸ U	²²⁶ Ra	²³² Th	⁴⁰ K	<i>D</i>	<i>C_{Ra,ind}</i>
<i>c</i>	Spearman	1											
	p-value	--											
<i>k</i>	Spearman	-0,37161	1										
	p-value	0,04318	--										
GRP	Spearman	0,81046	0,14988	1									
	p-value	5,69E-08	0,42923	--									
<i>H</i>	Spearman	0,11354	-0,01986	0,05076	1								
	p-value	0,55026	0,91704	0,78996	--								
<i>pH</i>	Spearman	0,00556	-0,05568	-0,0276	0,00445	1							
	p-value	0,97672	0,77010	0,88491	0,98136	--							
EC	Spearman	-0,301	-0,01574	-0,36329	0,31701	0,14866	1						
	p-value	0,10602	0,93421	0,04846	0,08784	0,43303	--						
²³⁵ U	Spearman	-0,12831	-0,04104	-0,15026	-0,24145	-0,61784	1						
	p-value	0,49923	0,82951	0,42803	0,19865	2,75E-4	--						
²³⁸ U	Spearman	0,17666	-0,15286	0,04316	0,00378	-0,28355	0,05362	1					
	p-value	0,35037	0,42000	0,82083	0,98416	0,12890	0,77839	--					
²²⁶ Ra	Spearman	-0,04832	0,08083	0,00690	-0,37611	-0,50273	0,53898	0,40563	1				
	p-value	0,79984	0,67113	0,97112	0,04052	0,00464	0,16365	0,00212	--				
²³² Th	Spearman	0,04205	-0,05589	0,04650	-0,48998	-0,31646	0,41237	0,38647	0,82565	1			
	p-value	0,82540	0,76926	0,80725	0,00599	0,08843	0,02354	0,03489	1,95E-8	--			
⁴⁰ K	Spearman	0,10436	0,00434	0,13396	-0,50857	-0,42215	-0,43569	0,34200	0,26438	0,68385	0,75234	1	
	p-value	0,58313	0,98186	0,48036	0,00411	0,02014	0,0161	0,06434	0,15800	3,10E-5	1,63E-6	--	
<i>D</i>	Spearman	0,01963	-0,08897	0,05085	-0,01707	-0,52042	-0,08342	0,09493	0,12871	0,12948	0,19025	0,27641	1
	p-value	0,91801	0,64013	0,78957	0,92864	0,00320	0,66121	0,61779	0,49787	0,49528	0,31393	0,13925	--
<i>C_{Ra,ind}</i>	Spearman	-0,18916	0,27772	-0,05252	0,03897	0,20570	-0,01246	-0,35107	-0,26875	-0,30772	-0,28152	-0,14858	-0,08322
	p-value	0,31676	0,13731	0,78283	0,83799	0,27549	0,94789	0,05714	0,15099	0,09808	0,13179	0,43328	0,66195

Tabela 10. Pearsonovi koeficijenti korelacije i pripadne p-vrijednosti za sve varijable (za svih 30 lokacija)

	<i>c</i>	<i>k</i>	GRP	<i>H</i>	<i>pH</i>	<i>EC</i>	²³⁵ U	²³⁸ U	²²⁶ Ra	²³² Th	⁴⁰ K	<i>D</i>	<i>C_{Ra,ind}</i>
<i>c</i>	Pearson	1											
	p-value	--											
<i>k</i>	Pearson	-0,52104	1										
	p-value	0,00315	--										
GRP	Pearson	0,70034	0,13790	1									
	p-value	1,64E-05	0,46740	--									
<i>H</i>	Pearson	0,01989	-0,04489	-0,03583	1								
	p-value	0,91693	0,81379	0,85089	--								
<i>pH</i>	Pearson	-0,0378	-0,06591	-0,01808	-0,02141	1							
	p-value	0,8428	0,72932	0,92446	0,91061	--							
<i>EC</i>	Pearson	-0,37178	0,07710	-0,33797	0,40123	0,07203	1						
	p-value	0,04307	0,68552	0,06775	0,02798	0,70526	--						
²³⁵ U	Pearson	0,02867	-0,13244	-0,10438	-0,25407	-0,58459	1						
	p-value	0,88046	0,48537	0,58307	0,17548	6,93E-4	--						
²³⁸ U	Pearson	0,18475	-0,16203	0,00519	-0,04156	-0,31162	0,08907	0,28210	1				
	p-value	0,32838	0,39232	0,97829	0,82741	0,09367	0,63974	0,13096	--				
²²⁶ Ra	Pearson	0,13150	-0,00426	0,09813	-0,37749	-0,45897	-0,21635	0,52898	0,38864	1			
	p-value	0,48853	0,98216	0,60593	0,03973	0,01074	0,25083	0,00265	0,0338	--			
²³² Th	Pearson	0,19960	-0,10465	0,1166	-0,46138	-0,31396	-0,25444	0,44684	0,35883	0,88971	1		
	p-value	0,29028	0,58208	0,53946	0,01028	0,09111	0,17482	0,01331	0,0515	4,86E-11	--		
⁴⁰ K	Pearson	0,18095	-0,12323	0,18456	-0,50865	-0,37045	-0,44955	0,33946	0,28071	0,74612	0,75298	1	
	p-value	0,33860	0,51651	0,32890	0,00410	0,04389	0,01269	0,06648	0,13294	2,21E-6	1,58E-06	--	
<i>D</i>	Pearson	0,11507	0,04877	0,10498	0,01399	-0,49315	0,09422	0,19014	0,25811	0,26031	0,29690	1	
	p-value	0,54485	0,79802	0,58088	0,9415	0,00562	0,51928	0,62043	0,31423	0,16847	0,16475	0,11111	--
<i>C_{Ra,ind}</i>	Pearson	-0,26504	0,16990	-0,07734	0,18415	0,34232	0,03338	-0,43643	-0,26427	-0,41973	-0,34397	-0,16053	1
	p-value	0,15693	0,36941	0,68457	0,32299	0,06407	0,86100	0,01590	0,15819	0,02094	0,06272	0,15464	0,39678

5. ZAKLJUČCI

Srednje godišnje koncentracije aktivnosti radona ($C_{Rn,ind}$) u zgradama ispitivanog područja Bijelog Polja, u čijoj su podlozi klastiti, nijesu visoke. Njihova AM = 148 Bq/m³ je značajno niža od prosjeka u zgradama u čitavoj Crnoj Gori (AM = 187 Bq/m³). Samo u pet od 30 ispitivanih zgrada je srednja godišnja koncentracija aktivnosti radona nešto malo veća od međunarodno prihvaćenog referentnog nivoa 300 Bq/m³.

U zemljištu ispitivanog područja u opštini Bijelo Polje su srednje koncentracije prirodnih radionuklida ⁴⁰K, ²³²Th i ²³⁸U oko dva puta veće od odgovarajućih u tlu Crne Gore. Koncentracije radijuma ²²⁶Ra u zemljištu na ispitivanim lokacijama na klastitima (opseg od 18,5 Bq/kg do 45,2 Bq/kg, AM = 29,9 Bq/kg) višestruko su niže od onih u zemljištu na lokacijama u karstnom području Nikšića (opseg od 48 Bq/kg do 326 Bq/kg, AM = 167 Bq/kg).

Srednja vrijednost jačine doze zračenja u vazduhu (D) na ispitivanim lokacijama na klastitima je na nivou prosječne vrijednosti u Crnoj Gori.

Koncentracije aktivnosti radona u tlu (c) na ispitivanim lokacijama na klastitima su relativno niske (opseg od 7,9 kBq/m³ do 94,8 kBq/m³, AM = 35,3 kBq/m³). Znatno su niže od onih u karstnom području Nikšića (opseg od 8,9 kBq/m³ do 390 kBq/m³, AM = 115 kBq/m³). Međutim, permeabilnost tla (k) za radon na tim lokacijama je vrlo visoka, u srednjem $1,14 \cdot 10^{-11}$ m², što uslovljava i relativno visoke vrijednosti geogenog radonskog potencijala GRP (u srednjem je 32,4). Zbog toga je i radonski indeks (RI) većine lokacija relativno povećan — za 10 lokacija on je *visok* ili *vrlo visok*, za 11 lokacija je *viši srednji*, dok je za sedam lokacija *niži srednji*, a za samo dvije lokacije *nizak*. To kazuje da na posmatranom području postoji izvjestan rizik od radona ako se pri gradnji zgrada ne preduzimaju odgovarajuće zaštitne mjere za sprečavanje prodora radona iz tla u unutrašnjost objekta.

Na relativno malom ukupnom broju ispitivanih lokacija ($n = 30$) nijesu nađene statistički značajne razlike među srednjim vrijednostima i medijanama parametara tla c , k , GRP , ²²⁶Ra, D i $C_{Rn,ind}$ za dvije kategorije zemljišta (aluvijalno-koluvijalno i kambisol).

Spearmanovi koeficijenti korelacije ranga pokazuju postojanje jake veze između „radijacionih” varijabli c i GRP , ²³²Th i ²²⁶Ra, i ⁴⁰K i ²³²Th, umjerene veze između ⁴⁰K i ²²⁶Ra, kao i slabe veze između k i c , ²²⁶Ra i ²³⁸U, i ²³²Th i ²³⁸U. Oni pokazuju i postojanje sljedećih veza između „radijacionih” i „neradijacionih” parametara tla na ispitivanim lokacijama: umjerene veze između ²²⁶Ra i pH , i D i pH , kao i slabe veze između EC i GRP , ²²⁶Ra i H , i ²³²Th i H . Spearmanove korelacije ranga ne pokazuju na ispitivanim lokacijama vezu između jačine doze zračenja D u vazduhu iznad tla i koncentracija aktivnosti radioizotopa u tlu.

Pearsonove korelacije pokazuju da među „radijacionim” varijablama postoji jaka pozitivna linearna veza između ^{232}Th i ^{226}Ra , ^{40}K i ^{226}Ra , ^{40}K i ^{232}Th , i GRP i c , umjerena inverzna linearna veza između k i c i slaba veza između ^{226}Ra i ^{238}U . Konstatovane su i sljedeće umjerene i slabe inverzne linearne veze između „radijacionih” i „neradijacionih” parametara tla: EC i c , ^{226}Ra i H , ^{226}Ra i pH , ^{232}Th i H , ^{40}K i H , ^{40}K i pH , ^{40}K i EC , i D i pH .

Ni Pearsonove korelacije nijesu pokazale vezu jačine doze zračenja D u vazduhu iznad tla sa koncentracijama radioizotopa u tlu. Prema tome, za razliku od lokacija na krečnjacima u zapadnom dijelu opštine Nikšić, za lokacije na klastitima u području Bijelog Polja se D ne može koristiti kao indikator koncentracija radijuma i radona u tlu, ni geogenog radonskog potencijala (GRP).

Spearmanove korelacije ne pokazuju statistički značajnu vezu koncentracije aktivnosti radona u zgradama ($C_{Rn,ind}$) sa bilo kojim od mjerenih parametara zemljišta na ispitivanim lokacijama na klastitima.

LITERATURA

- [1] UNSCEAR, 2006. Effects of Ionizing Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. UNSCEAR 2006 Report, Volume 2, Annex E: Sources-to-effects assessment for radon in homes and workplaces. United Nations, New York.
- [2] WHO, 2009. WHO Handbook on Indoor Radon. A Public Health Perspective. World Health Organization, Geneva.
- [3] IAEA, 2015. Protection of the Public Against Exposure Indoors Due to Radon and Other Natural Sources of Radiation. IAEA Specific Safety Guide No. SSG-32. International Atomic Energy Agency, Vienna.
- [4] Fleischer, R. L., 1997. Radon and earthquake prediction. In the book Radon Measurements by Etched Track Detectors - Applications in Radiation Protection, Earth Sciences, and the Environment. Eds S. A. Durrani and R. Ilic, World Scientific, Singapore, 285–299.
- [5] UNSCEAR, 2000. Sources and Effects of Ionizing Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, UNSCEAR 2000 Report, Volume 1, Annex B: Exposures from natural radiation sources. United Nations, New York.
- [6] IAEA, 2014. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 3. International Atomic Energy Agency, Vienna.
- [7] EURATOM, 2013. Council Directive 2013/59/EURATOM of 5 December 2013. Off. J. European Union 57 L 13/1, 17. 01. 2014.
- [8] Vukotic, P., Antovic, N., Zekic, R., Svrkota, N., Andjelic, T., Svrkota, R., Mrdak, R., Djurovic, A., Dlabac, A., Bjelica, N., Djurovic, T., Bogicevic, M., 2019. Main findings from radon indoor survey in Montenegro. *Radiat. Prot. Dosim.* 185 (3), 355–370.
- [9] Vukotic, P., Antovic, N., Djurovic, A., Zekic, R., Svrkota, N., Andjelic, T., Svrkota, R., Mrdak, R., Bjelica, N., Djurovic, T., Dlabac, A., Bogicevic, M., 2019. Radon survey in Montenegro — A base to set national radon reference and “urgent action” level. *J. Environ. Radioactiv.* 196, 232–239.

- [10] ICRP, 2014. Radiological protection against radon exposure. ICRP Publication 126. Ann. ICRP 43 (3).
- [11] Vukotic, P., Zekic, R., Andjelic, T., Svrkota, N., Djurovic, A., Dlabac, A., 2020. Radon on ground floor in the buildings of pre-university education in Montenegro. *Nukleonika* 65 (2), 53–58.
- [12] Vukotić, P., Radolić, V., Svrkota, R., Stanić, D., Anđelić, T., Mrdak, R., Fuštić, B., 2023. Radonski potencijal karstnih lokacija u zapadnom dijelu opštine Nikšić. *Glasnik Odjeljenja prirodnih nauka CANU*, 26, 27–59.
- [13] Premru, U., 1983: Tumač za geomorfološku kartu Crne Gore, 1:100.000, FSD Geološkog zavoda, Podgorica.
- [14] Živaljević, M., Mirković, M., Ćirić, A., Stijović, V., 1982.: OGK, 1:100.000 list Bijelo Polje i Tumač za OGK list Bijelo Polje, Zavod za geološka istraživanja SR Crne Gore, Titograd i Zavod za geološka i geofizička istraživanja, Beograd.
- [15] Pajović, M., 1999. Metalogenetska karta Crne Gore, 1:200.000. Posebna izdanja Geološkog glasnika, knjiga XVI, Podgorica.
- [16] Mirković, M., Živaljević, M., Đokić, V., Perović, Z., Kalezić, M., Pajović, M., 1985: Geološka karta Crne Gore, 1:200.000, Zavod za geološka istraživanja SR Crne Gore, Titograd.
- [17] Živaljević, M., 1989: Tumač geološke karte SR Crne Gore 1:200.000. Posebna izdanja Geološkog glasnika, knj. VIII, Geološki zavod CG.
- [18] Radulović, M., 1996. Hidrogeološke karakteristike karstnih terena u široj okolini Nikšića. Geološki glasnik, knjiga XV, Geološki zavod, Podgorica.
- [19] Radoičić B., 1991: Klima Crne Gore.
- [20] Fuštić, B., Đuretić, G., 2000. Zemljišta Crne Gore. Univerzitet Crne Gore, Biotehnički institut, Podgorica.
- [21] Fuštić, B. (priredio), 2000. Atlas pedoloških karata 1:50.000. Listovi Pljevlja 4, Sjenica 3 i Kolašin 2. Fond Biotehničkog instituta, Podgorica.
- [22] Kemski, J., Siehl, A., Stegemann, R., Valdivia-Manchego, M., 2001. Mapping the geogenic radon potential in Germany. *Sci. Tot. Environ.* 272, 217–230.
- [23] Friedmann, H., 2005. Final results of the Austrian radon project. *Health Phys.* 89, 339–348.
- [24] Miles, J.H.C., Appleton, J.D., 2005. Mapping variation in radon potential both between and within geological units. *J. Radiol. Prot.* 25, 257–276.
- [25] Chen, J., Falcomer, R., Bergman, L., Wierdsma, J., Ly, J., 2009. Correlation of soil radon and permeability with indoor radon potential in Ottawa. *Radiat. Prot. Dosim.* 136, 56–60.
- [26] Neznal, M., Neznal, M., Matolin, M., Barnet, I., Miksova, J., 2004. The new method for assessing the radon risk of building sites. Czech Geol. Survey Special papers. 16 Czech Geol. Survey. 47 p. <http://www.radon-vos.cz/pdf/metodika.pdf>
- [27] Radolić V., Miklavčić, I., Poje Sovilj, M., Stanić, D., Petrinec, B., Vuković B., 2019. The natural radioactivity of Istria, Croatia. *Radiat. Phys. Chem.* 155, 332–340.
- [28] HASL-300, 1997. EML Procedures Manual, 28 Edition. U.S. Department of Energy, Environmental Measurements Laboratory, New York.
- [29] International Atomic Energy Agency, 1989. Measurement of Radionuclides in Food and the Environment — A Guidebook. Technical Reports Series No. 295. Vienna.
- [30] USDA Natural Resources Conservation Service, 1998. Soil Quality Indicators. Chemical Properties: Soil pH, and Soil Electrical Conductivity. <https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/health/assessment/?cid=stelprdb1237387>
- [31] Vukotić P, Borisov, G.I., Kuzmić, V.V., Kulakov, V.M., Antović, N., Dapčević, S., Mirković, M., Pajović, M., Svrkota, R., Fuštić, B., Đuretić, G., 1997. Background

- gamma-radiation in Montenegro. Proceedings of the IRPA Regional Symposium on Radiation Protection in Neighbouring Countries of Central Europe, Prague, 477–479.
- [32] UNSCEAR 2008. Sources and Effects of Ionizing Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, UNSCEAR 2008 Report, Volume I, Annex B: Exposures of the public and workers from various sources of radiation. United Nations, New York.
- [33] Kabrt, F., Baumgartner, A., Friedmann, H., Gruber, V., Ringer, W., Maringer, F. J., 2016. Correlations of radon measurements in soil gas and indoor for improving the prediction of an area's radon potential. IRPA14 Proceedings, Vol. 4, 1429–1436.
- [34] Vukotić, P., Stojanovska, Z., Antović, N., 2021. Developing a method for predicting radon concentrations above a reference level in new Montenegrin buildings. *J. Environ. Radioactiv.* 227, doi: 10.1016/j.jenvrad.2020.106500.
- [35] García-Talavera, M., García-Perez, A., Rey, C., Ramos, L., 2013. Mapping radon-prone areas using γ -radiation dose rate and geological information. *J. Radiol. Prot.* 33, 605–620.
- [36] A. S. Berens, J. Diema, C. Stauber, D. Dai, S. Foster, R. Rothenberg (2017). The use of gamma-survey measurements to better understand radon potential in urban areas. *Sci. Total Environ.*, Vol. 607–608, pp. 888–899.
- [37] Tchorz-Trzeciakiewicz, D. E., Rysiukiewicz, M., 2021. Ambient gamma dose rate as an indicator of geogenic radon potential. *Sci. Total Environ.* 755, 142771. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142771>
- [38] Forkapić, S., Maletić, D., Vasić, J., Bikit, K., Mrdja, D., Bikit, I., Udović, V., Banjanac, R., 2017. Correlation analysis of the natural radionuclides in soil and indoor radon in Vojvodina, Province of Serbia. *J. Environ. Radioact.* 166, 403–411.
- [39] Pisapak, P., Todorović, N., Bhongsuwan, T., 2017. Correlation between radon and radium concentrations in soil and estimation of natural radiation hazards in Namom district, Songkhla province (Southern Thailand). *Environ. Earth Sci.* 76:139.

Zahvalnost

Ovo istraživanje je u cjelini finansirala Crnogorska akademija nauka i umjetnosti. Autori zahvaljuju Akademiji što im je omogućila realizaciju istraživanja.

Perko VUKOTIĆ, Vanja RADOLIĆ, Ranko SVRKOTA, Tomislav ANĐELIĆ,
Denis STANIĆ, Radivoje MRDAK, Budimir FUŠTIĆ

GEOGENIC RADON POTENTIAL IN CLASTIC ROCK LOCATIONS OF BIJELO POLJE MUNICIPALITY

Summary

In the municipality of Bijelo Polje, an investigation was conducted on the geogenic radon potential across 30 rural locations characterized by clastic bedrock. Previous measurements in schools and houses indicated annual radon activity

concentrations ($C_{Rn,ind}$) ranging from 32 to 398 Bq/m³, with an arithmetic mean (AM) of 148 Bq/m³ — significantly lower than the national average of 187 Bq/m³ measured across 1200 buildings in Montenegro.

The study involved measurements of soil humidity (H), electrical conductivity (EC), pH, ²²⁶Ra, the content of ²³⁸U, ²³⁵U, ²³²Th, and ⁴⁰K, radon activity concentration (c), soil permeability (k), and the gamma radiation dose rate (D) in the air above the soil. The geogenic radon potential (GRP) of each location was calculated using the parameters c and k.

The activity concentration of ²²⁶Ra at the investigated locations was moderate, ranging from 18.5 to 45.2 Bq/kg, with an AM of 29.9 Bq/kg. Similarly, soil radon activity concentrations were modest, ranging from 7.9 to 94.8 kBq/m³, with an AM of 35.3 kBq/m³. However, soil permeability to radon gas was notably high, with values ranging from $0.5 \cdot 10^{-13}$ to $180 \cdot 10^{-13}$ m², and an AM of $114 \cdot 10^{-13}$ m². This high permeability contributed to an elevated GRP, which ranged from 6.1 to 80, with an AM of 32.4. Consequently, 10 locations were classified with a high radon index, 18 with a medium radon index, and only two with a low radon index.

Spearman's and Pearson's correlation analyses were conducted on all measured soil parameters across the locations. Spearman's rank correlations did not reveal any statistically significant association between $C_{Rn,ind}$ and the measured soil parameters.

Keywords: clastic rocks, soil parameters, geogenic radon potential

