

Perko Vukotić¹, Vanja Radolić², Ranko Svrkota³, Denis Stanić², Tomislav Anđelić⁴, Radivoje Mrdak⁵, Budimir Fušić⁶

RADONSKI POTENCIJAL KARSTNIH LOKACIJA U ZAPADNOM DIJELU OPŠTINE NIKŠIĆ

Sažetak

Nacionalni programi istraživanja radona u Crnoj Gori pokazali su da su srednje godišnje koncentracije radona (^{222}Rn) u stanovima najveće u opštini Nikšić ($\text{AM} = 201 \text{ Bq/m}^3$), a da su koncentracije radona u prizemlju škola u njoj ($\text{AM} = 599 \text{ Bq/m}^3$) druge najveće u državi. Preciznije, najveće koncentracije radona u crnogorskim stanovima i školama nađene su u zapadnom, ruralnom dijelu opštine Nikšić, koji je tipična oblast visokog karsta. U toj oblasti, u okviru nacionalnih programa, radon je mjereno u prizemlju 9 kuća i 16 škola, na 25 lokacija koje pripadaju području površine oko 800 km^2 , a nađene koncentracije radona u njima veoma su visoke: opseg ($219\text{--}2494$) Bq/m^3 , $\text{AM} = 977 \text{ Bq/m}^3$.

Da bi se ispitaio geogeni radonski potencijal tih 25 karstnih lokacija, kao vjerovatan uzrok visokih koncentracija radona u zgradama, u neposrednoj blizini tih 9 kuća i 16 škola mjereni su sljedeći parametri tla: vlažnost (H), elektroprovodljivost (EC), pH , koncentracije aktivnosti ^{226}Ra , ^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th i ^{40}K , koncentracija aktivnosti radona u tlu (c), permeabilnost tla (k) za radonski gas, i jačina doze gama zračenja (D) u vazduhu na visini 1 m iznad tla. Geogeni radonski potencijal lokacije (GRP) izračunavan je na osnovu vrijednosti parametara c i k .

¹ Crnogorska akademija nauka i umjetnosti, Ul. Rista Stijovića 5, 81000 Podgorica, Crna Gora

² Odjel za fiziku, Sveučilište u Osijeku, Trg Ljudevita Gaja 6, 31000 Osijek, Hrvatska

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

⁴ Centar za ekotoksikološka ispitivanja, Bulevar Šarla de Gola 2, 81000 Podgorica, Crna Gora

⁵ Građevinski fakultet, Univerzitet Crne Gore, Bulevar Džordža Vašingtona bb, 81000 Podgorica, Crna Gora

⁶ Biotehnički fakultet, Univerzitet Crne Gore, Bulevar Mihaila Lalića 15, 81000 Podgorica, Crna Gora

Nađeno je da veličine koje karakterišu radon u tlu na ispitivanom području imaju visoke vrijednosti: c — opseg (8.9–390) kBq/m³, AM = 115 kBq/m³; k — opseg (3.9–180) · 10⁻¹³ m², AM = 153 · 10⁻¹³ m²; GRP — opseg od 11 do 419, AM = 129. Takođe, koncentracije ²²⁶Ra (roditelja ²²²Rn) su povećane (opseg (48–326) Bq/kg, AM = 167 Bq/kg), vjerovatno i zbog prisustva tragova boksita na nekim od ispitivanih lokacija. Od 25 ispitivanih lokacija, njih 9 ima radonski indeks (RI) kategorisan kao *ekstremno visok*, a drugih 9 lokacija *vrlo visok*.

Spearmanove korelacije otkrivaju jaku povezanost c i GRP ($r_s = 0.906$, $p < 0.001$), kao i umjerenu povezanost c sa D i sa ²²⁶Ra, i k sa EC . Veza između D i koncentracije ²²⁶Ra u tlu je jaka ($r_s = 0.719$, $p < 0.001$).

Pearsonove korelacije pokazuju pozitivnu linearnu vezu između jačine gama doze (D) u vazduhu na lokaciji sa koncentracijama ²²⁶Ra i radona (c) u tlu, i sa GRP lokacije, što znači da se u karstnom području D može koristiti kao prvi, mada grubi indikator sadržaja radijuma u tlu i geogenog radonskog potencijala lokacije.

Vjerovatno da zbog relativno malog broja ispitanih karstnih lokacija (veličina uzorka $n = 25$), t-test i Mann-Whitney test ne pokazuju statistički značajne razlike (na nivou povjerenja od 95%) u vrijednostima aritmetičkih sredina i medijana parametara c , k , GRP , ²²⁶Ra i D za različite kategorije karbonatnih stijena (krečnjaci, dolomiti), i tipova tla (crnica, rendzina).

Spearmanove korelacije ne otkrivaju statistički signifikantnu povezanost koncentracija radona u zgradama ni sa jednom od mjerenih varijabli koje karakterišu tlo na ispitivanim lokacijama.

Zahvalnost

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

1. UVOD

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

Sa aspekta zaštite od zračenja, najvažniji radioizotop radona je ²²²Rn, jer predstavlja potencijalno najveći izvor radijacionog izlaganja u zgradama [3]. On potiče iz prirodnog lanca raspada ²³⁸U, koji je prisutan u životnoj sredini u stijenama, zemljištu, vodama i u građevinskom materijalu. Većina radona nastalog u tlu raspadom ²²⁶Ra ostaje u mineralima stijena i tla, a manji dio emanira s mjesta nastanka, i vođen različitim transportnim mehanizmima (difuzijom, advekcijom, konvekcijom) kreće se kroz tlo prema površini, 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 od 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.

Radon u zgradama doprinosi približno polovini srednje godišnje efektivne doze koju stanovništvo prima od prirodnih izvora jonizujućeg zračenja [6]. Postoje jasni dokazi da dugovremeno izlaganje radonu, tokom kojeg se udišu produkti njegovog raspada, uzrokuje povećanu incidenciju kancera pluća kod generalne populacije, te da je radon primarni uzročnik kancera pluća kod nepušača, a drugi glavni uzročnik kod pušača [2]. Stoga, Svjetska zdravstvena organizacija [2], Međunarodna organizacija za atomsku energiju [7] i Savjet Evropske unije [8] 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 [9].

Koncentracije radona u zgradama su funkcija prostorne i vremenske varijabilnosti [10]. Geološke karakteristike različitih područja na kojima su izgrađene zgrade uzrokuju prostorne varijacije koncentracija radona, dok su vremenske varijacije (dnevne, sezonske, godišnje) uglavnom rezultat varijacija u meteorološkim uslovima.

Kako su svaki region i svaka zgrada jedinstvenih karakteristika, generalni zaključci, iako moguće bazirani na velikom broju naučnih studija, ne mogu biti primijenjeni za predviđanje koncentracije radona u nekoj datoj zgradi. Jedini pravi način da se sazna nivo radona u zgradi je njegovo direktno mjerenje. Ipak, za određeni region od interesa, poželjna su proučavanja uticaja različitih faktora na koncentracije radona u zgradama, kao i predviđanje procenta zgrada sa nivoima radona iznad referentnog, jer mogu pomoći pri planiranju odgovarajućih mjera za smanjivanje rizika od izlaganja ljudi radonu.

Prvo nacionalno istraživanje radona u stalno nastanjenim stanovima na čitavoj teritoriji Crne Gore započeto je 2002, a završeno krajem 2015. godine. Radon je mjereno pasivnim detektorima tragova, u trajanju od 12 mjeseci, u nacionalnoj mreži kvadrata 5 km x 5 km i lokalnim mrežama kvadrata 0.5 km x 0.5 km u urbanim područjima. Dobijeni su validni rezultati za 953 stana (0.5% stanova u Crnoj Gori), koji su pokazali da je srednja godišnja koncentracija radona u stanovima u Crnoj Gori 110 Bq/m³, a geometrijska srednja vrijednost 58.3 Bq/m³ [11]. Ove vrijednosti su znatno veće od odgovarajućih prosječnih za svijet u cjelini — 46 Bq/m³ i 37 Bq/m³, respektivno [1]. Srednja godišnja koncentracija aktivnosti radona u stanovima po opštinama kreće se u opsegu od 40 Bq/m³ (opština Budva) do 201 Bq/m³ (opština Nikšić). Na osnovu ovih istraživanja

procijenjeno je da 7.4% stanova u Crnoj Gori ima srednje godišnje koncentracije aktivnosti radona veće od 300 Bq/m^3 [12], što je ovim istraživanjem preporučeni novi nacionalni referentni nivo za Crnu Goru, koji je u skladu sa preporukama ICRP [13] i sa EU direktivom [8]. Po opštinama u Crnoj Gori se procijenjeni procenat stanova sa koncentracijama aktivnosti iznad ovog referentnog nivoa kreće od 0.2% (Budva) do 18.1% (Petnjica). U opštini Nikšić, drugoj u Crnoj Gori po broju stanovnika, procenat takvih stanova je drugi najveći — 17.0%. Procijenjeno je i da su u 0.8% stanova u Crnoj Gori koncentracije aktivnosti radona iznad „urgentnog akcionog nivoa” od 1000 Bq/m^3 [12].

Nacionalno istraživanje radona u svim zgradama preduniverzitetskog obrazovanja u Crnoj Gori (dječji vrtići, osnovne i srednje škole, domovi učenika) realizovano je u periodu 2016–2018. godina. Tokom školske 2016/17. godine, radon (^{222}Rn) je mjereno pasivnim detektorima tragova u 468 zgrada, u 2855 prizemnih prostorija. Srednja devetomjesečna koncentracija aktivnosti radona iznad nivoa 300 Bq/m^3 nađena je u 728 prostorija, odnosno 213 zgrada, dok je u 111 prostorija, u 47 zgrada, ona bila iznad nivoa od 1000 Bq/m^3 . Koncentracije radona u obrazovno-vaspitnim zgradama, usrednjene po svim uzorkovanim prizemnim prostorijama, u opsegu su ($16\text{--}2810 \text{ Bq/m}^3$), sa aritmetičkom srednjom vrijednošću $AM = 275 \text{ Bq/m}^3$ [14]. Najmanje prosječne devetomjesečne koncentracije radona u zgradama škola i vrtića nađene su u opštini Ulcinj (74.7 Bq/m^3), a najveće u opštini Danilovgrad (678.7 Bq/m^3), dok su sljedeće najveće u opštini Nikšić (599.2 Bq/m^3). U opštini Nikšić, od 46 ispitivanih zgrada obrazovno-vaspitnih ustanova, u njih 24 su, u prizemnim prostorijama, nađene koncentracije radona veće od 300 Bq/m^3 , a u njih 13 veće i od 1000 Bq/m^3 [15].

Na osnovu rezultata ta dva nacionalna istraživanja, zajednički su razmatrane i analizirane koncentracije radona u prizemlju 1200 zgrada (732 stambena objekta i 468 škola i vrtića). Srednje godišnje koncentracije aktivnosti radona u prizemlju tih zgrada po opštinama su u opsegu od 55 Bq/m^3 (Budva, mjerenja u 33 zgrade) do 457 Bq/m^3 (Danilovgrad, u 21 zgradi), a druga je najveća u opštini Nikšić i iznosi 357 Bq/m^3 (mjerenja u 163 zgrade) [16].

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. I u drugim državama Evrope i svijeta nađene su u krečnjačkim oblastima povećane koncentracije radona u zgradama [17–20], iako je u krečnjacima sadržaj uranijuma ^{238}U i radijuma ^{226}Ra veoma nizak, znatno niži nego u ostalim vrstama stijena površinskog dijela Zemljine kore. Krečnjaci, odnosno karstni sistemi, veoma su kompleksni i njihov uticaj na radonski potencijal nije dovoljno poznat. Oni su zbog šupljina, pukotina i rasjeda vrlo permeabilan geološki ambijent [17, 21], koji zato može olakšati akumulaciju radona u njima i transport radona do površine tla.

Sve prethodno navedeno dalo je motiv za koncipiranje i realizaciju istraživanja prikazanog u ovom radu, u kojem se ispituje radonski potencijal karstnih lokacija u zapadnom, ruralnom dijelu opštine Nikšić, i analiziraju korelacije parametara tla na tim lokacijama, kako međusobno, tako i sa koncentracijama radona u zgradama na tim lokacijama.

2. OPŠTI PRIKAZ ISPITIVANOG PODRUČJA

Područje ispitivanih 25 lokacija (Slika 1), površine oko 800 km², u zapadnom je dijelu opštine Nikšić – između Nikšićkog polja, klanca Duga, državne granice sa BiH, doline Nudolske rijeke i Grahovskog polja. U cjelosti pripada površi tzv. „dubokog” karsta, tj. Starocrnogorskoj površi, koja po geomorfološkom izrazu pokazuje osobine holokarsta – „ljutog” karsta, sa svim karstnim oblicima reljefa (kraška polja, dolovi, uvale, vrtače, ponori, jame, pećine i dr.).

Geološku građu terena karakterišu kompleksi stijena kao alpske formacije, ili grupe formacija sa sličnim litostratigrafskim i genetskim karakteristikama [22, 23]:

- Plitkovodna gornjetrijasko-jurska formacija karbonatnih sedimenata platformnog tipa, stvorenih u zoni šelfa u gornjem trijasu, donjoj i srednjoj juri, zastupljena je u južnom dijelu u području Grahova i Vilusa. To su gornjetrijaski bankoviti i masivni dolomiti, dolomitični krečnjaci i krečnjaci, donjejurski laporoviti litotitski i crveni amonitski krečnjaci i stratifikovani i masivni sprudni krečnjaci srednje jure.
- Plitkovodna gornjejursko-donjekredna formacija karbonatnih sedimenata, koji su krovina jurskih crvenih boksita i podina krednih bijelih boksita. Predstavljani su stratifikovanim oolitskim krečnjacima, dolomitičnim krečnjacima i dolomitima, masivnim i bankovitim dolomitima, dolomitičnim krečnjacima i krečnjacima turona. U sjevernom dijelu terena su senonski bankoviti i slojeviti sivi krečnjaci sa proslojcima dolomita i dolomitičnih krečnjaka, preko kojih su bankoviti i masivni krečnjaci sa rudištima, podređeno sa bankovitim dolomitima i dolomitnim krečnjacima.
- Terigeno-karbonatna paleogena flišna formacija prisutna je na krajnjem sjevernom dijelu ispitivanog područja u vidu uske zone, a čine je laporci, laporoviti krečnjaci, glinci, pješčari sa proslojcima i sočivima breča i konglomerata.

Od neoalpskih formacija su naslage glaciofluvijalnog i morenskog materijala, a u karstnim depresijama (Grahovo, Nikšić) limnoglacialni šljunkovi, pjeskovi i gline.

U geološkom sklopu ovog prostora od značaja su interstratifikovane formacije crvenih i bijelih boksita, koje se javljaju u četiri horizonta: dvije formacije crvenih boksita (srednji trijas i gornja jura) i dvije formacije bijelih boksita (donjokredni i na granici donje i gornje krede). Boksitni horizonti ukazuju na

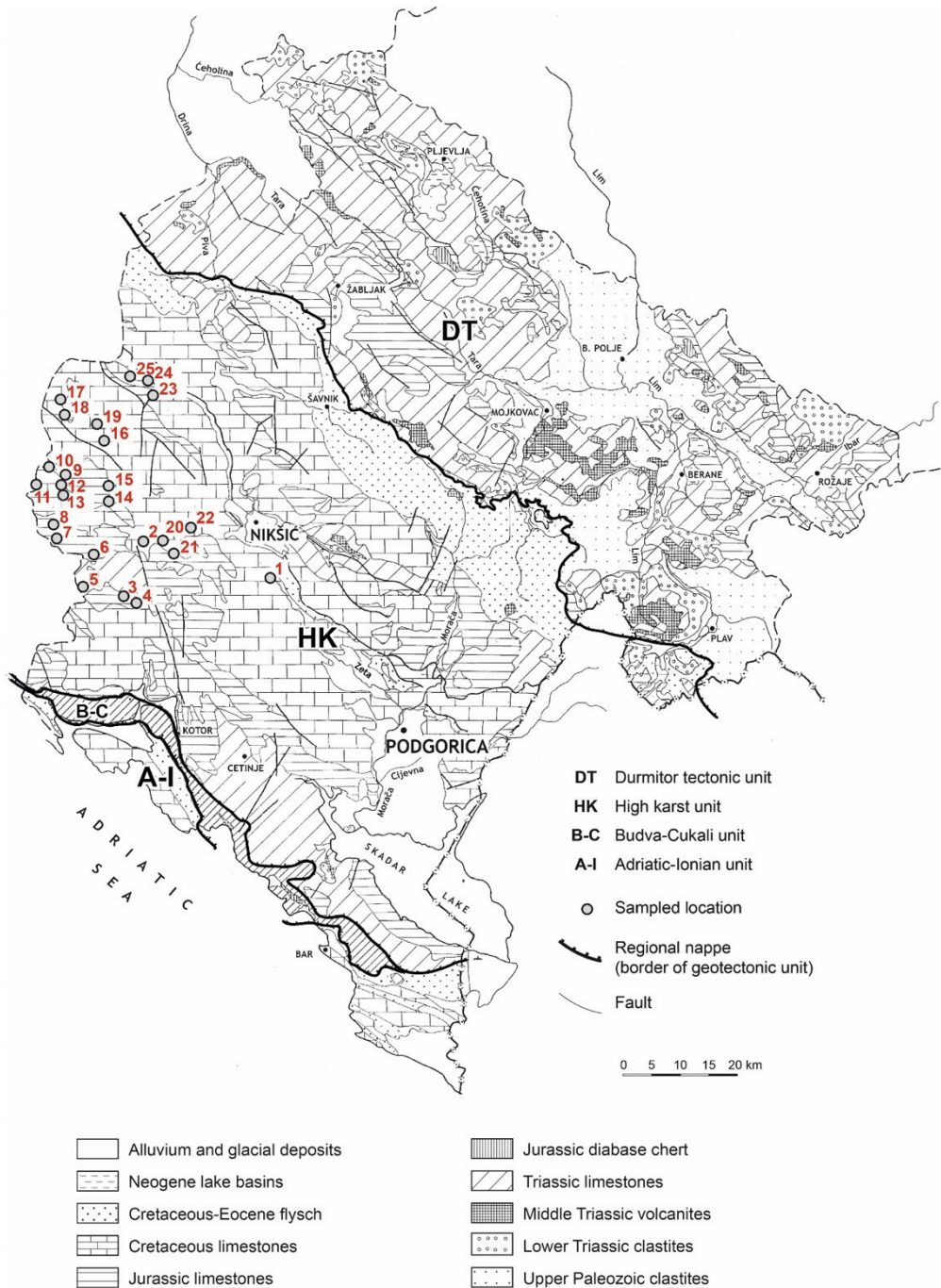
emerzije i formiranje kopna na kome su stvoreni boksiti, uz pojavu paleokarstifikacije karbonatnih stijena. U području zapadno od Nikšića konstatovano je preko 20 pojava i ležišta crvenih jurskih boksita, i preko 60 pojava i ležišta bijelih boksita. U Starocrnogorskoj metalogenetskoj subzoni, bijeli boksiti otkriveni su na preko 1000 km². Ukupna dužina izdanaka bijelih boksita iznosi oko 140 km [24], a ukupna dužina eroziono diskordantne granice je oko 298 km [25], što govori o značajnim dimenzijama ovih formacija i njihovom uticaju na geotektonski karakter prostora. Ispitivanja sadržaja torijuma i uranijuma u crvenim i bijelim boksitima u jugozapadnoj Crnoj Gori [26, 27], gdje pripada i prostor koji smo ispitivali, pokazuju da boksiti mogu sadržati povećane koncentracije tih elemenata (U do 30 µg/g, Th do 50 µg/g) u odnosu na klark Zemljine kore.

Na karstifikovanost terena najveći uticaj imaju litofacijalni sastav (karbonati), atmosferske padavine i tektoniziranost, a svi ti uslovi su se stekli na ispitivanom području. U djelovima terena izgrađenim od čistih krečnjaka karstifikovanost je intenzivna, dok je nešto blaža kod dolomitičnih krečnjaka i dolomita, a baš ti tipovi stijena u cjelosti izgrađuju ispitivani prostor. Zapadno od Nikšića, na području Zle gore i Njegoša, postoje uslovi za kontinuiran razvoj karstifikacije, koji može dostići dubine od 1500 m do 1700 m, tj. do ispod zone isticanja izvorskih voda u Bjelopavličkoj ravnici [28].

U holokarstu Starocrnogorske površi godišnje se obaraju znatne količine atmosferskog taloga (2000–3000 mm), a u jugozapadnom dijelu ispitivanog područja čak i preko 5000 mm. Taj talog u cjelosti otiče podzemnim putevima, što ukazuje na 100% infiltraciju izlučenih padavina. U karstnom terenu Banjana i zapadne Crne Gore, koji se drenira preko vrela Trebišnjice, prema analizi recesione krive vrela, vrijednost poroznosti terena kreće se od 1.2% do 1.5%. Najveća poroznost u nadizdanskoj zoni kreće se i preko 20%, u zoni kolebanja izdanskih voda 1–3%, dok se ispod minimalnog nivoa podzemnih voda stepen skaršćenosti, tj. efektivne poroznosti postepeno smanjuje [28]. Ispitivano područje pripada srednje i dobro skaršćenim krečnjačkim stijenama kavernožno-pukotinske poroznosti.

Na ispitivanom području je dominantno zastupljeno zemljište tipa krečnjačko-dolomitne crnice, koja se obrazovala na podlozi tvrdih karbonatnih stijena – krečnjaka i dolomita. Rendzina je mjestimično zastupljena, a postala je uglavnom na glaciofluvijalnim nanosima, a nekad i na trošini dolomita. Identifikacija tipa zemljišta u svakom mjestu urađena je na užoj lokaciji, gdje je mjerena radon u tlu.

Školski objekti i porodične stambene zgrade na ispitivanim lokacijama izgrađeni su na ravnim ili blago nagnutim platoima, uređenim za potrebe građenja i dvorišta oko objekata. Izgrađeni su u drugoj polovini 20. vijeka. Većinom su prizemni, sa nosećim zidovima od poluobrađenog kamena. Fundiranje zidova urađeno je u površinskom sloju. Može se ocijeniti da je na svim lokacijama



Slika 1. Geološka mapa Crne Gore (prema M. Pajoviću), sa ispitivanim lokacijama

taj sloj dobre nosivosti, jer nijesu vidljive pukotine u zidovima. Objekti su po pravilu dotrajali i loše održavani. Najčešće su renovirani samo zamjenom dotrajalih podova, i drvenih vrata i okvira prozora sa PVC ili aluminijumskom bravarijom. Podovi su urađeni na tankim pločama od mršavog betona sa malo cementa, koje su krte i lako lomljive. Najčešće su direktno oslonjene na nasip od prirodnog materijala iz iskopa, koji je slabo nabijen sa priručnim sredstvima. Takva podloga se vremenom neravnomjerno sliježe i deformiše, usljed čega beton od koga je izvedena ploča puca i drobi se.

3. METODE MJERENJA

3. 1. Metode mjerenja koncentracije radona u tlu, provodnosti tla i određivanja geogenog radonskog potencijala lokacije

3. 1. 1. Određivanje geogenog radonskog potencijala

Izrada mapa radonskog rizika zahtijeva identifikaciju parametra koji treba biti manje-više stalan u vremenu, i pritom bi opisivao fizičke procese koji se odvijaju u tlu, a potencijalno doprinose povišenim koncentracijama radona u unutrašnjosti zgrada. U tom cilju se najčešće koriste 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 opisuje i mjeri potencijalnu opasnost od radona na nekom području, koja je posljedica količine radona koju „Zemlja može isporučiti” s obzirom na količinu dostupnog radona i lakoću kojom se radon može kretati u tlu. U literaturi postoji nekoliko različitih definicija GRP -a [29–32], a u ovom istraživanju korišćen je tzv. „Češki pristup”, 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 [33]: *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 [34].

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 ≤ GRP < 10	2	nizak
10 ≤ GRP < 35	2	srednji	10 ≤ GRP < 22.5	3	niži srednji
			22.5 ≤ GRP < 35	4	viši srednji
GRP ≥ 35	3	visok	35 ≤ GRP < 60	5	visok
			60 ≤ 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, koji se stvara djelovanjem težine tega na stalnu površinu.

Teorijski osnov za mjerenje permeabilnosti k je Darcyev zakon, uz pretpostavke da je tlo homogeno i izotropno, a vazduh nestišljiv:

$$Q = F \cdot \frac{k}{\mu} \cdot \Delta p, \quad (2)$$

gdje je: Q (m^3/s) protok vazduha kroz sondu, F (m) faktor oblika sonde, k (m^2) permeabilnost tla, μ (Pa s) dinamička viskoznost vazduha (pri 10 °C je $\mu = 1.75 \cdot 10^{-5}$ Pa s), a Δp (Pa) razlika pritisaka između površine tla i aktivne površine sonde u tlu. Protok vazduha je definisan poznatom zapreminom gumenog mijeha (2000 cm^3) i vremenom isisavanja te zapremine vazduha iz tla na mjernoj lokaciji.



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 korišćenoj mjernoj opremi dužina aktivnog područja (vrha) sonde je 50 mm, a prečnik 12 mm, i dužina sonde 1.1 m. Za standardnu dubinu mjerenja od 0.8 m je faktor oblika $F = 0.149$ m. Koristeći RADON-JOK mjerni uređaj pod opisanim uslovima, moguće područje mjerenja permeabilnosti tla k je od 10^{-11} m² do 10^{-14} m².

Tlo se, na osnovu permeabilnosti, razvrstava u tri kategorije u pogledu radon-skog rizika:

- tlo visoke permeabilnosti: $k > 4 \cdot 10^{-12}$ m²;
- tlo srednje permeabilnosti: $4 \cdot 10^{-12}$ m² $> k > 4 \cdot 10^{-13}$ m²;
- tlo niske permeabilnosti: $k < 4 \cdot 10^{-13}$ m².

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.



Slika 3. Elektrometar ERM-3, sa jonizacionom komorom na njemu

Elektrometar ERM-3 (Slika 3) je malih dimenzija i mase 600 g. Omogućava dva načina mjerenja koncentracije aktivnosti radona u tlu: (1) „15-minutni način” — mjerenja počinju 15 minuta nakon što je uzorak vazduha uzet iz tla i prebačen u jonizacionu komoru; (2) „B način mjerenja” — mjerenje počinje

nakon što je aktivnost radona i radonovih potomaka dostigla ravnotežu, tj. barem 200 minuta nakon ubacivanja uzorka vazduha u detektor.

Uzorak vazduha iz tla, za određivanje koncentracije aktivnosti radona, uzima se pomoću šprica velike zapremine, kroz šuplju čeličnu sondu, koja se zabija u tlo ostrim vrhom. Uzorak se uzima sa standardne dubine u tlu od 0.8 m. Prva dva uzorka vazduha se odbacuju zbog moguće kontaminacije atmosferskim vazduhom. Treći uzorak vazduha (treća potpuna zapremina šprica od 150 ml) ubacuje se u jonizacionu komoru prethodno vakuumiranu ručnom pumpom.

Ako je prošlo više od 3 i po sata od uzorkovanja, izmjerena vrijednost „B” načinom mora se korigovati na radioaktivni raspad radona prema formuli:

$$c_{kor} = c_{izm} \cdot e^{[(t-3.5) \cdot 0.0076]} \quad (3)$$

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.

Mjerna nesigurnost određivanja koncentracije radona data je jednačinom:

$$\sigma_c = 0.33 \cdot \sqrt{c} \quad (4)$$

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 25 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 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 [35], obavljeno je na ispitivanim lokacijama neposredno oko mjesta na kojima je mjeren 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 je uzet uzorak zemljišta koji se sastoji od 12 poduzoraka uzetih 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 ± 1.7 °C, a fluktuacija temperature ± 0.3 °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 masa 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 kao i pH.

3. 5. Gamaspektrometrijsko određivanje sadržaja radionuklida u uzorcima zemljišta

Analiza sadržaja radionuklida u zemljištu realizovana je standardnom metodom [36].

Uzorcima zemljišta su sušeni na vazduhu oko 2 sedmice, a zatim 8 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, koji pripada klasi Extra Low Background, a smješten je u niskofonsku zaštitu. 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 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 od 24 sata, rađeno je najmanje 28 dana od pripreme analitičkog uzorka, po

uspostavljaju u njemu radioaktivne ravnoteže između ^{226}Ra i potomaka. U uzorcima su mjerene aktivnosti sljedećih 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 i objekt	Vrsta stijena u podlozi (podebljana je pretežna vrsta)	Tip zemljišta
1. Bogetići, škola	krečnjak sa prosljocima dolomita	crnica
2. Podbožur, kuća	Smeđesivi dolomitični krečnjak	crnica
3. Grahovo, škola	dolomiti i dolomitični krečnjaci	rendzina
4. Bare, kuća	fluvioglacijalni nanos, obodni teren pjeskoviti krečnjak	rendzina
5. Nudo, škola	fluvioglacijalni i proluvijalni nanos, dolomit i krečnjak	rendzina
6. Vilusi, škola	smeđesivi banci i slojevi krečnjaka	crnica
7. Broćanac, škola	smeđi bankoviti saharoidni krečnjaci	crnica
8. Petrovići, škola	smeđi krečnjaci slojevi i banci	crnica
9. Pilatovci, škola	dolomit , dolomitični krečnjak	rendzina
10. Pilatovci, kuća	svijetlosmeđi bankoviti krečnjak	crnica
11. Vračenovići, vrtić	slojevit do bankovit krečnjak	crnica
12. Vračenovići, škola	slojevit do bankovit krečnjak	crnica
13. Jošovina, kuća	oolitično-onkoidni krečnjak , bankovit	crnica
14. Velimlje, kuća	dolomit i dolomitični krečnjak	rendzina
15. Velimlje, škola	saharoidni grudvasti dolomit	rendzina
16. Crni Kuk, škola	slojevit do bankovit krečnjak , dolomit, dolomitični krečnjak	crnica
17. Vukotino Polje, kuća	krečnjak svijetlosivi, dolomit. krečnjak saharoidan bankovit	crnica
18. Donje Crkvice, škola	krečnjaci , dolomitisani i laporoviti, brečoliki do tamnosivi	crnica
19. Donja Somina, škola	svijetlosmeđi slojeviti krečnjak	crnica
20. Rudine, škola	svijetlosivi bankoviti krečnjak	crnica
21. Rudine, kuća	svijetlosmeđi masivni do bankoviti krečnjak	rendzina
22. Kruščice, kuća	slojeviti i bankoviti krečnjak	smeđe
23. Javljen, kuća	bankoviti krečnjaci	crnica
24. Javljen, škola	slojeviti, smeđi onkoidni krečnjaci	crnica
25. Krstac, škola	laporoviti krečnjaci , laporci, krečnjačke breče sa rožnacima	crnica

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

Lokacija	H (%)	pH	EC ($\mu\text{S/cm}$)
1. Bogetići, škola	25.3	7.49	143.2
2. Podbožur, kuća	30.8	7.43	154.5
3. Grahovo, škola	11.8	8.10	120.2
4. Bare, kuća	30.3	8.03	108.9
5. Nudo, škola	25.4	8.00	84.8
6. Vilusi, škola	35.8	7.40	120.6
7. Broćanac, škola	25.8	7.49	115.2
8. Petrovići, škola	25.4	7.81	87.0
9. Pilatovci, škola	36.9	7.75	101.4
10. Pilatovci, kuća	32.9	7.75	158.6
11. Vračenovići, vrtić	31.3	7.65	140.8
12. Vračenovići, škola	28.3	7.33	96.1
13. Jošovina, kuća	27.7	6.50	124.5
14. Velimlje, kuća	22.9	7.50	212.0
15. Velimlje, škola	28.9	7.99	126.9
16. Crni Kuk, škola	27.0	7.10	129.9
17. Vukotino Polje, kuća	22.7	7.48	116.7
18. Donje Crkvice, škola	31.5	7.60	88.4
19. Donja Somina, škola	29.0	7.70	104.9
20. Rudine, škola	30.0	7.60	124.8
21. Rudine, kuća	22.2	7.49	249.0
22. Kruščice, kuća	21.0	7.31	178.3
23. Javljen, kuća	21.8	7.39	205.0
24. Javljen, škola	30.5	6.58	89.4
25. Krstac, škola	20.4	7.50	129.1

Tabela 4. Koncentracije aktivnosti radionuklida u tlu i jačina doze zračenja (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. Bogetići, škola	5.9 (1.7)	122 (36)	179 (13)	58.6 (5.6)	342 (28)	43 (7)
2. Podbožur, kuća	5.6 (1.2)	131 (34)	153 (11)	74.6 (6.2)	479 (38)	36 (3)
3. Grahovo, škola	3.3 (0.9)	58.2 (22.8)	67.8 (4.9)	15.3 (1.4)	145 (12)	44 (7)
4. Bare, kuća	8.7 (1.3)	89.8 (26.9)	184 (12)	63.0 (5.1)	443 (35)	54 (5)
5. Nudo, škola	5.8 (1.3)	71.9 (25.2)	107 (8)	89.4 (7.3)	472 (32)	39 (2)
6. Vilusi, škola	3.4 (1.2)	67.9 (18.3)	48.1 (3.8)	58.9 (4.8)	445 (32)	30 (4)
7. Broćanac, škola	6.5 (0.9)	106 (31)	294 (22)	83.4 (6.8)	474 (32)	77 (9)
8. Petrovići, škola	9.6 (1.8)	151 (32)	153 (13)	65.1 (5.4)	210 (14)	47 (7)
9. Pilatovci, škola	13.1 (2.1)	151 (42)	203 (14)	51.6 (4.3)	332 (22)	40 (6)
10. Pilatovci, kuća	9.0 (1.8)	118 (31)	138 (9)	71.9 (6.1)	511 (33)	41 (5)
11. Vračenovići, škola	12.8 (2.3)	129 (40)	282 (18)	97.9 (8.0)	660 (40)	39 (6)
12. Vračenovići, vrtić	7.8 (1.6)	62.5 (18.7)	139 (9)	61.3 (5.0)	287 (20)	48 (13)

Lokacija	²³⁵ U (Bq/kg)	²³⁸ U (Bq/kg)	²²⁶ Ra (Bq/kg)	²³² Th (Bq/kg)	⁴⁰ K (Bq/kg)	D (nGy/h)
13. Jošovina, kuća	5.7 (1.0)	112 (30)	141 (9)	94.0 (7.1)	476 (34)	26 (5)
14. Velimlje, kuća	5.4 (1.2)	90.6 (27.2)	146 (9)	52.3 (4.1)	314 (23)	38 (6)
15. Velimlje, škola	6.4 (1.8)	119 (28)	116 (7)	32.1 (3.0)	209 (15)	38 (5)
16. Crni Kuk, škola	11.3 (1.7)	164 (41)	201 (13)	62.7 (5.1)	334 (23)	56 (9)
17. Vukotino Polje, kuća	8.3 (1.2)	168 (50)	173 (10)	37.8 (3.1)	211 (16)	69 (6)
18. Donje Crkvice, škola	20.0 (2.2)	166 (38)	326 (20)	56.6 (5.3)	331 (23)	45 (7)
19. Donja Somina, škola	6.5 (1.7)	120 (31)	198 (12)	63.3 (5.2)	320 (23)	46 (6)
20. Rudine, škola	7.5 (1.4)	73.5 (23.2)	125 (8)	62.6 (5.1)	384 (27)	35 (4)
21. Rudine, kuća	8.1 (1.5)	192 (42)	170 (10)	72.8 (6.2)	435 (3)	28 (2)
22. Kruščice, kuća	15.7 (2.1)	433 (43)	262 (16)	133 (10)	290 (22)	68 (8)
23. Javljen, kuća	5.6 (1.1)	71.3 (18.2)	82.2 (6.2)	83.1 (7.1)	525 (37)	33 (5)
24. Javljen, škola	10.6 (1.6)	148 (35)	217 (13)	74.2 (6.1)	411 (29)	80 (6)
25. Krstac, škola	4.5 (1.3)	88.4 (26.2)	64.6 (5.1)	52.8 (4.1)	407 (28)	21 (2)

* Standardna devijacija je data u zagradi

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

Lokacija	<i>c</i> (kBq/m ³)	<i>k</i> (10 ⁻¹³ m ²)	GRP	RI (Češki)	RI (Hrvatski)	<i>C_{Rn,ind}</i> (Bq/m ³)
1. Bogetići, škola	30.8	180	41.4	Visok	Visok	2400
2. Podbožur, kuća	11.1	180	14.9	Srednji	Niži srednji	2208
3. Grahovo, škola	186.3	160	234.5	Visok	Ekstremno visok	847
4. Bare, kuća	109.3	7.58	51.6	Visok	Visok	658
5. Nudo, škola	24.9	142	29.4	Srednji	Viši srednji	679
6. Vilusi, škola	8.9	157	11.1	Srednji	Niži srednji	364
7. Broćanac, škola	284.0	180	381.3	Visok	Ekstremno visok	1270
8. Petrovići, škola	247.0	3.89	102.5	Visok	Vrlo visok	361
9. Pilatovci, škola	312.3	180	419.4	Visok	Ekstremno visok	1070
10. Pilatovci, kuća	20.7	180	27.8	Srednji	Viši srednji	964
11. Vračenovići, vrtić	73.7	180	99.0	Visok	Vrlo visok	1356
12. Vračenovići, škola	128.0	180	171.9	Visok	Ekstremno visok	1284
13. Jošovina, kuća	77.0	180	103.3	Visok	Vrlo visok	290
14. Velimlje, kuća	60.1	180	80.7	Visok	Vrlo visok	330
15. Velimlje, škola	98.7	180	132.6	Visok	Ekstremno visok	2040
16. Crni Kuk, škola	158.3	180	212.6	Visok	Ekstremno visok	583
17. Vukotino Polje, kuća	389.7	66.2	330.5	Visok	Ekstremno visok	1210
18. Donje Crkvice, škola	194.3	74.3	172.2	Visok	Ekstremno visok	219

Lokacija	c (kBq/m ³)	k (10 ⁻¹³ m ²)	GRP	RI (Češki)	RI (Hrvatski)	C _{Rn,ind} (Bq/m ³)
19. Donja Somina, škola	107.0	156	132.4	Visok	Ekstremno visok	481
20. Rudine, škola	45.4	180	61.0	Visok	Vrlo visok	2494
21. Rudine, kuća	81.4	180	109.3	Visok	Vrlo visok	761
22. Kruščice, kuća	73.7	180	99.0	Visok	Vrlo visok	677
23. Javljen, kuća	37.0	180	49.6	Visok	Visok	330
24. Javljen, škola	50.1	180	67.3	Visok	Vrlo visok	1178
25. Krstac, škola	68.2	180	91.6	Visok	Vrlo visok	372

4. 2. Analiza rezultata

Ispitivano karstno područje izgrađeno je od karbonatnih stijena — krečnjaka, dolomita i njihovih tranzicija. Zavisno od njihovog makroskopski procijenjenog udjela na ispitivanoj lokaciji, klasifikovali smo ih u dvije grupe: krečnjake i dolomite (Tabela 2). Zemljište razvijeno na takvom substratu od tvrdih stijena krečnjaka i dolomita je dominantno tipa crnica. Tip zemljišta rendzina, razvijen uglavnom na glaciofluvijalnim nanosima, prisutan je na nekim od ispitivanih lokacija. Identifikacija tipa zemljišta urađena je na licu mjesta (Tabela 2).

Deskriptivna statistika svih mjerenih parametara data je u Tabeli 6.

Tabela 6. Deskriptivna statistika rezultata mjerenja na 25 lokacija

Parametar	Opseg	AM	σ_{AM}	MED
c (kBq/m ³)	8.9–390	115	20	77
k (10 ⁻¹³ m ²)	3.9–180	153	11	180
GRP	11.1–419	129	22	99
H (%)	11.8–36.9	27.0	1.1	27.7
pH	6.50–8.10	7.52	0.08	7.50
EC (μS/cm)	84.8–249.0	132.4	8.3	124.5
D (nGy/h)	21–80	44.8	3.0	41
²³⁸ U (Bq/kg)	58.2–433	128	15	119
²²⁶ Ra (Bq/kg)	48.1–326	167	14	153
²³⁵ U (Bq/kg)	3.3–20.0	8.3	0.8	7.5
²³² Th (Bq/kg)	15.3–133	66.7	4.6	63
⁴⁰ K (Bq/kg)	145–660	378	24	384
C _{Rn,ind} (Bq/m ³)	219–2494	977	129	761

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

MED — medijana

pH vrijednosti u Tabeli 3 i Tabeli 6 pokazuju da su uzorkovana zemljišta neutralna (opseg 6.6–7.3) i slabo (7.4–7.8) do umjereno alkalna (7.9–8.4), a u srednjem (7.52) slabo alkalna [37]. Relativno niske vrijednosti

elektroprovodljivosti *EC* (Tabela 3) kazuju da uzorkovana zemljišta imaju nizak salinitet i dobru dreniranost [37].

Tabela 4 potvrđuje da relativno visoke koncentracije radijuma (^{226}Ra) mogu biti prisutne u rezidualnim zemljištima na krečnjacima [38]. Koncentracije ^{238}U na ispitivanim lokacijama su takođe relativno visoke, a njihova srednja vrijednost (128 Bq/kg) je oko četiri puta veća od odgovarajuće srednje vrijednosti za zemljišta u svijetu (33 Bq/kg) [6]. Ovo se može objasniti činjenicom da je ispitivano područje veoma bogato ležištima boksita, a boksiti sadrže povećane koncentracije uranijuma. I zaista, tragovi prisustva crvenih boksita bili su vidljivi na nekim od ispitivanih lokacija, posebno na lokaciji Kruščice (grumeni boksita primijećeni na površini tla u blizini kuće), gdje je i izmjerena najveća koncentracija ^{238}U od 433 Bq/kg (Tabela 4). Isto objašnjenje važi i za visoke koncentracije ^{226}Ra , čija je srednja vrijednost (167 Bq/kg) oko pet puta veća od svjetskog prosjeka (32 Bq/kg) za zemljišta [6]. Srednja koncentracija ^{226}Ra je čak i veća od one za ^{238}U , što je i pojedinačno slučaj za većinu ispitivanih lokacija. To je rezultat značajne disolucije krečnjaka za vrijeme procesa karstifikacije, apsorpcije radijuma od strane rezidualnih tankih slojeva gline u pukotinama i šupljinama nastalim rastvaranjem krečnjaka [39], i zato što radijum u životnoj sredini ima veću mobilnost nego uranijum.

Srednja vrijednost jačine doze gama zračenja u vazduhu na ispitivanih 25 karstnih lokacija (44.8 nGy/h) je značajno niža od prosječne vrijednosti u Crnoj Gori (55 nGy/h) [40] i od svjetskog prosjeka (58 nGy/h) [6].

Koncentracija aktivnosti radona u tlu na ispitivanih 25 karstnih lokacija kreće se u granicama (8.9–390) kBq/m³, sa srednjom vrijednošću 115 kBq/m³ (Tabela 6). 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 škrljajac) u podlozi, u opsegu (23–953) kBq/m³ [41]. Na naših pet uzorkovanih lokacija koje imaju dolomit u podlozi, koncentracije radona u tlu su u opsegu (24.9–312) kBq/m³, sa medijanom 99 kBq/m³ (Tabela 7).

Kao što je i očekivano, permeabilnost tla (*k*) u ispitivanoj karstnoj oblasti je veoma visoka, $153 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2$ u prosjeku (Tabela 6). Samo jedna lokacija (Petrovići, škola) ima *nisku* permeabilnost tla, dok jedna lokacija (Bare, kuća) ima *srednju* (Tabela 5). Zbog visokih vrijednosti permeabilnosti tla i geogeni radon potencijal (*GRP*) je *visok*, sa srednjom vrijednošću 129, te je i radonski indeks (*RI*) takođe *visok*. Prema „Češkoj klasifikaciji” on je *visok* za 21 lokaciju i *srednji* za ostale, dok je prema „Hrvatskoj klasifikaciji” *RI vrlo visok* za 9 lokacija i *ekstremno visok* za drugih 9 lokacija (Tabela 5).

Tabela 7. Srednje vrijednosti i medijane za kategorije nekih parametara tla, jačine doze spoljašnjeg zračenja i koncentracije radona u zgradama

Parametar		Sve lokacije n=25	Krečnjaci n=20	Dolomiti n=5	Crnica n=17	Rendzina n=7
c (kBq/m ³)	AM (σ_{AM})	115 (20)	110 (22)	136 (52)	114 (26)	125 (36)
	MED	77	75	99	74	99
k (10 ⁻¹³ m ²)	AM (σ_{AM})	153 (11)	149 (13)	168 (8)	154 (13)	147 (24)
	MED	180	180	180	180	180
GRP	AM (σ_{AM})	129 (22)	116 (22)	179 (69)	122 (26)	151 (51)
	MED	99	99	133	99	109
²²⁶ Ra (Bq/kg)	AM (σ_{AM})	167 (14)	176 (16)	128 (22)	171 (19)	142 (18)
	MED	153	172	116	153	146
D (nSv/h)	AM (σ_{AM})	44.8 (3.0)	46.1 (3.8)	39.8 (1.1)	45.4 (4.1)	40.1 (2.9)
	MED	41	44	39	43	39
C _{Rn,ind} (Bq/m ³)	AM (σ_{AM})	957 (129)	947 (148)	993 (288)	991 (172)	912 (206)
	MED	761	719	847	964	761

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

Na prvi pogled, prema Tabeli 7 izgleda da se srednje vrijednosti nekih parametara, koji su od posebnog interesa za ovo istraživanje, razlikuju po njihovim kategorijama za vrstu stijena u podlozi i za tip zemljišta. Međutim, te srednje vrijednosti se preklapaju kad se uzmu u obzir i njihove standardne devijacije. Stoga, u cilju provjere da li se one zaista razlikuju po kategorijama tih parametara, urađeni su odgovarajući t-testovi za aritmetičke sredine i Mann-Whitney testovi za medijane. Ti testovi (Tabele 8 i 9) pokazuju da, za relativno mali uzorak ispitivanih karstnih lokacija (n = 25), nijesu nađene statistički značajne razlike (na nivou značajnosti od 95%) među srednjim vrijednostima i medijanama parametara c, k, GRP, ²²⁶Ra, D i C_{Rn,ind} za različite kategorije karbonatnih stijena u podlozi (krečnjaci, dolomiti) i tipova zemljišta (crnica, rendzina).

Tabela 8. t-test i Mann-Whitney test za krečnjake i dolomite

Parametar	t-test				Mann-Whitney test			
	t _{stat}	DF	Prob> t	Signif.	U	Z	Asymp. Prob> U	Signif.
c (kBq/m ³)	-0.5183	23	0.6092	NOT	43	-0,44167	0.65873	NOT
k (10 ⁻¹³ m ²)	-0.70325	23	0.48896	NOT	51	0.04101	0.96729	NOT
GRP	-1.23507	23	0.22927	NOT	31.5	-1.22333	0.22121	NOT
²²⁶ Ra (Bq/kg)	1.38254	23	0.18008	NOT	70	1.32502	0.18516	NOT
D (nSv/h)	0.82212	23	0.41945	NOT	60.5	0.67963	0.49674	NOT

Parametar	t-test				Mann-Whitney test			
	t _{stat}	DF	Prob> t	Signif.	U	Z	Asymp. Prob> U	Signif.
C _{Rn,ind} (Bq/m ³)	-0.05803	23	0.95423	NOT	47.5	-0.1359	0.8919	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: F(x) = G(y) Alternative Hypothesis: F(x) < G(y) At the 0.05 level, the two distributions are NOT significantly different.			

Tabela 9. t-test i Mann-Whitney test za crnicu i rendzinu

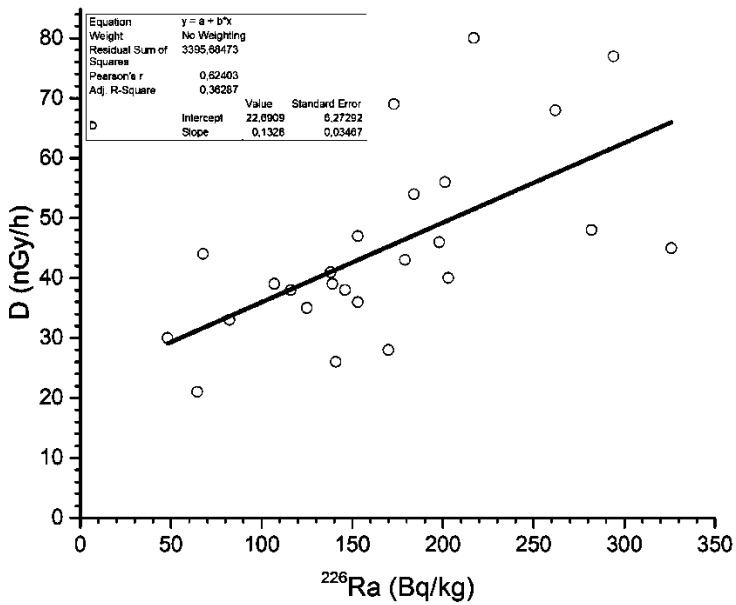
Parametar	t-test				Mann-Whitney test			
	t _{stat}	DF	Prob> t	Signif.	U	Z	Asymp. Prob> U	Signif.
c (kBq/m ³)	-0.23489	22	0.81647	NOT	49	-0.63511	0.52536	NOT
k (10 ⁻¹³ m ²)	0.27419	22	0.7865	NOT	66	0.45405	0.64979	NOT
GRP	-0.63576	22	0.53149	NOT	45.5	-0.85758	0.39112	NOT
²²⁶ Ra (Bq/kg)	0.93088	22	0.36202	NOT	71	0.69877	0.4847	NOT
D (nSv/h)	0.78897	22	0.43855	NOT	69.5	0.60361	0.5461	NOT
C _{Rn,ind} (Bq/m ³)	0.34416	22	0.734	NOT	61.5	0.09529	0.92409	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: F(x) = G(y) Alternative Hypothesis: F(x) < G(y) At the 0.05 level, the two distributions are NOT significantly different.			

Tabela 10. Spearmanovi koeficijenti korelacije i pripadajuće p -vrijednosti za sve varijable (za svih 25 lokacija)

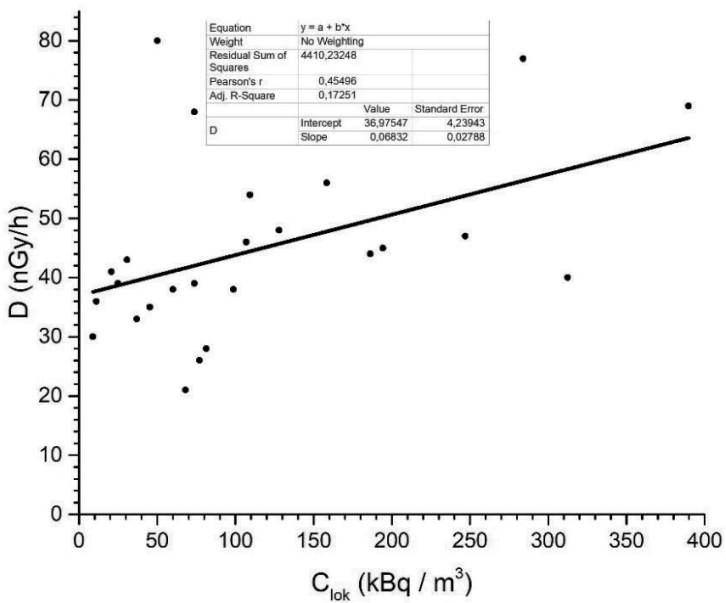
	c	k	GRP	H	pH	EC	^{235}U	^{238}U	^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K	D
c	Spearman	—										
	p-value	—										
k	Spearman	-0.320										
	p-value	0.120										
GRP	Spearman	0.906	—									
	p-value	<0.001	0.867									
H	Spearman	-0.123	-0.029	—								
	p-value	0.558	0.891	0.422								
pH	Spearman	0.181	-0.458	0.049	0.097							
	p-value	0.385	0.021	0.816	0.644							
EC	Spearman	-0.442	0.614	-0.267	-0.299	—						
	p-value	0.027	0.001	0.196	0.147	0.178						
^{235}U	Spearman	0.465	-0.055	0.342	0.318	-0.092	—					
	p-value	0.019	0.793	0.094	0.122	0.662	0.138					
^{238}U	Spearman	0.400	0.007	0.367	-0.006	-0.042	0.708	—				
	p-value	0.048	0.975	0.071	0.977	0.106	<0.001	0.707				
^{226}Ra	Spearman	0.521	0.014	0.475	0.183	-0.293	0.764	0.707	—			
	p-value	0.008	0.947	0.016	0.38	0.172	<0.001	<0.001	0.275			
^{232}Th	Spearman	-0.254	0.200	-0.299	-0.037	-0.008	0.204	0.136	0.275	—		
	p-value	0.220	0.339	0.147	0.859	0.972	0.328	0.517	0.184	—		
^{40}K	Spearman	-0.458	0.296	-0.451	0.212	0.077	-0.102	-0.167	-0.006	0.657	—	
	p-value	0.021	0.150	0.024	0.310	0.715	0.626	0.426	0.975	<0.001	—	
D	Spearman	0.517	-0.284	0.388	0.019	-0.438	0.615	0.426	0.719	0.117	-0.237	—
	p-value	0.008	0.168	0.055	0.926	0.848	0.001	0.034	<0.001	0.576	0.255	—
$C_{\text{Ra,ind}}$	Spearman	-0.084	0.359	-0.02	0.171	0.068	0.078	0.017	0.09	-0.068	-0.012	0.171
	p-value	0.689	0.078	0.924	0.414	0.746	0.711	0.936	0.67	0.746	0.955	0.415

Zbog relativno malog broja ispitivanih lokacija ($n = 25$), za statističku analizu korelacija među posmatranim parametrima lokacija (varijablama) korišćena je neparametarska metoda Spearmanove korelacije ranga. Ona utvrđuje postojanje relacije između parametara koji se ne mijenjaju zajedno istom brzinom, a pri tome ne pretpostavlja normalnu raspodjelu varijable, niti linearnu povezanost među varijablama. Spearmanovi koeficijenti korelacije ranga, prikazani na Tabeli 10, otkrivaju postojanje jake veze između varijabli c i GRP ($r_s = 0.906, p < 0.001$), umjerene (srednje) veze između c i D ($r_s = 0.517, p = 0.008$), c i ^{226}Ra ($r_s = 0.521, p = 0.008$), k i EC ($r_s = 0.614, p = 0.001$), i slabe veze između varijabli c i ^{238}U ($r_s = 0.400, p = 0.048$), c i ^{235}U ($r_s = 0.465, p = 0.019$), c i EC ($r_s = -0.442, p = 0.027$), GRP i ^{226}Ra ($r_s = 0.475, p = 0.016$), i k i pH ($r_s = -0.458, p = 0.021$). Veza između D i ^{226}Ra je jaka ($r_s = 0.719, p < 0.001$), između D i ^{235}U ($r_s = 0.615, p = 0.001$) je umjerena, dok je ona slaba između varijabli D i ^{238}U ($r_s = 0.426, p = 0.034$) i između D i EC ($r_s = -0.438, p = 0.029$). Sadržaj ^{232}Th u tlu je slabo korelisan sa pH faktorom tla ($r_s = -0.463, p = 0.020$). Kao što se moglo i očekivati, veza između koncentracija ^{226}Ra i ^{238}U ($r_s = 0.707, p < 0.001$) i ^{235}U ($r_s = 0.764, p < 0.001$) u tlu je veoma jaka, kao i između ^{235}U i ^{238}U ($r_s = 0.708, p < 0.001$). Tabela 10 pokazuje i da postoji korelacija, iako slaba, između koncentracije ^{40}K u tlu i koncentracije radona c ($r_s = -0.458, p = 0.021$) i vrijednosti GRP ($r_s = -0.451, p = 0.024$), što je teško razumjeti i objasniti sa aspekta fizike.

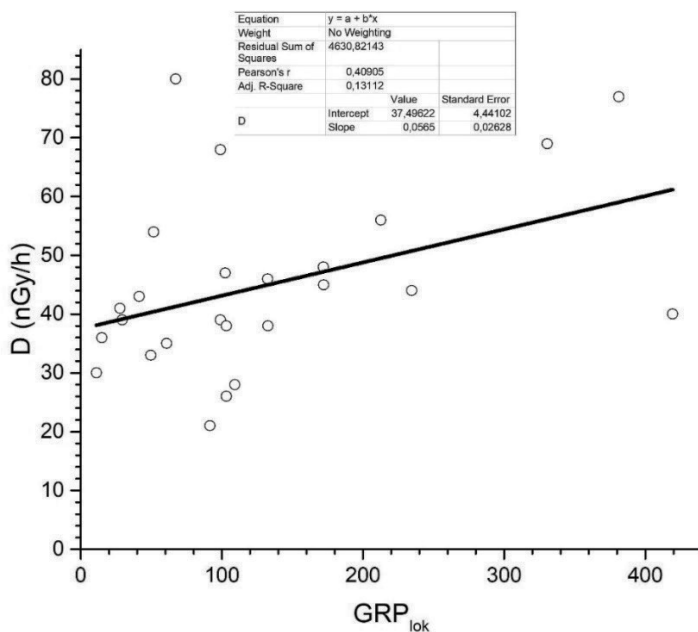
Pearsonove korelacije analiziraju linearnu povezanost između dva parametra. One pokazuju pozitivnu linearnu povezanost jačine doze gama zračenja (D) u vazduhu na lokaciji sa koncentracijama ^{226}Ra i radona (c) u tlu, i sa GRP lokacije (Slika 4), sa Pearsonovim koeficijentima r jednakim 0.624, 0.455 i 0.409, respektivno. To znači da se na karstnim terenima jačina doze gama zračenja (D) u vazduhu može koristiti kao prvi, mada grubi indikator koncentracija radijuma i radona u tlu, kao i geogenog radonskog potencijala (GRP) lokacije, što je od praktičnog značaja jer su mjerenja D znatno brža i jednostavnija od mjerenja sadržaja ^{226}Ra i određivanja geogenog radonskog potencijala lokacije (mjerenja koncentracije radona u tlu i permeabilnosti tla).



(a)



(b)



(c)

Slika 4. Linearna korelacija jačine doze gama zračenja u vazduhu i: (a) koncentracije aktivnosti ^{226}Ra u tlu, (b) koncentracije radona u tlu, (c) GRP lokacije

Pozitivna linearna korelacija između jačine doze gama zračenja u vazduhu i koncentracije aktivnosti ^{226}Ra u tlu je nađena i u nekim drugim istraživanjima i za druge tipove zemljišta [42, 43], kao i između jačine doze gama zračenja u vazduhu i koncentracije radona u tlu [41, 44]. Kao i u našem slučaju, ali čak i još jača korelacija između koncentracija radona i radijuma u tlu nađena je takođe u nekim studijama [45, 46], dok je drugdje ta korelacija bila nesigurna [41, 47].

Kada je u pitanju korelacija između koncentracija aktivnosti radona u zgradama ($C_{Rn,ind}$) i varijabli koje karakterišu zemljište, primjera radi, u ravničarskom regionu Srbije, u kojem dominira tip zemljišta černoziem (crnica), nađena je veoma slaba takva linearna korelacija, od kojih je najjača ona sa koncentracijom ^{226}Ra u zemljištu na dubini od 30 cm ($r = 0.27$) [44], a slabija je za površinski sloj zemljišta. Međutim, za ispitivani karstni region u Crnoj Gori, Spearmanove korelacije ne pokazuju statistički značajnu vezu između $C_{Rn,ind}$ i bilo koje od mjerenih varijabli koje karakterišu zemljište na ispitivanim lokacijama (Tabela 10). Stoga, za cjelovitije sagledavanje mogućih uzroka povećanih koncentracija radona u zgradama na ispitivanim lokacijama, neophodno je uzeti u obzir i konstruktivne karakteristike zgrada, a i navike korisnika zgrada (grijanje, provjetranje).

5. ZAKLJUČCI

U zemljištu ispitivanog područja nađene su srednje koncentracije ^{238}U i ^{232}Ra od 128 Bq/kg i 167 Bq/kg respektivno, relativno visoke za tla sa krečnjacima i dolomitima u podlozi. To se objašnjava time što je ispitivano područje bogato ležištima boksita, a boksiti sadrže povećane koncentracije uranijuma.

Koncentracije aktivnosti radona u tlu na ispitivanim lokacijama u karstnom području su u opsegu (8.9–390) kBq/m³, sa srednjom vrijednošću 115 kBq/m³, što mogu biti uobičajene vrijednosti za različite vrste stijena u podlozi. Međutim, permeabilnost tla za zemni gas, a time i radon na ispitivanim lokacijama je izuzetno visoka, u srednjem $1.53 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2$, što uslovljava i vrlo visoke vrijednosti geogenog radonskog potencijala ($AM = 129$), koje čine da radonski indeks većine lokacija pripada najvećim kategorijama — za devet ispitivanih lokacija on je *vrlo visok*, a za drugih devet lokacija je čak *ekstremno visok*. To kazuje da na posmatranom karstnom području postoji visok rizik od radona ako se pri gradnji zgrada ne preduzimaju odgovarajuće zaštitne mjere za sprečavanje prodora radona iz tla u unutrašnjost objekta.

Zbog relativno malog broja ispitivanih karstnih lokacija (uzorak $n = 25$), ni jesu nađene statistički značajne razlike među srednjim vrijednostima i medijanima parametara c , k , GRP , ^{226}Ra , D i $C_{Rn,ind}$ za različite kategorije karbonatnih stijena u podlozi (krečnjaci, dolomiti) i tipova zemljišta (crnica, rendzina).

Spearmanovi koeficijenti korelacije ranga pokazuju postojanje jake veze između varijabli c i GRP ($r_s = 0.906$, $p < 0.001$), a umjerene veze između c i D , c i ^{226}Ra , k i EC . Veza između D i ^{226}Ra je jaka ($r_s = 0.719$, $p < 0.001$), a između D i ^{235}U je umjerena. Kao što je i očekivano, veza između sadržaja ^{238}U i ^{235}U u tlu je veoma jaka, kao i njihova veza sa ^{226}Ra .

Pearsonove korelacije pokazuju pozitivnu linearnu povezanost jačine doze gama zračenja (D) u vazduhu na lokaciji sa koncentracijama ^{226}Ra i radona (c) u tlu, i sa GRP lokacije. Prema tome, D može poslužiti kao grubi indikator koncentracija radijuma i radona u tlu na kraškom području, kao i geogenog radonskog potencijala lokacije.

Spearmanove korelacije ne pokazuju statistički značajnu vezu koncentracije radona u zgradama sa bilo kojom od mjerenih varijabli koje karakterišu zemljište na ispitivanim karstnim lokacijama. To kazuje da je za cjelovitije sagledavanje uzroka povećanih koncentracija radona u zgradama na tim lokacijama neophodno uzeti u obzir i konstruktivne karakteristike zgrada, a i navike njihovih korisnika (grijanje, provjetranje).

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] UNSCEAR 2008. Sources and Effects of Ionizing Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, UNSCEAR 2008 Report, Volume 1, Annex B: Exposures of the public and workers from various sources of radiation. United Nations, New York.
- [7] 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.
- [8] EURATOM, 2013. Council Directive 2013/59/EURATOM of 5 December 2013. Off. J. European Union 57 L 13/1, 17. 01. 2014.
- [9] Stanley, F. K. T., Irvine, J. L., Jacques, W. R., Salgia, S. R., Innes, D. G., Winquist, B. D., Torr, D., Brenner, D. R., Goodarzi, A. A., 2019. Radon exposure is rising steadily within the modern North American residential environment, and is increasingly uniform across seasons. *Scientific Reports* 9:18472. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-54891-8>
- [10] IAEA, 2013. National and Regional Surveys of Radon Concentration in Dwellings — Review of Methodology and Measurement Techniques. IAEA Analytical Quality in Nuclear Applications No. IAEA/AQ/33, International Atomic Energy Agency, Vienna.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] ICRP, 2014. Radiological protection against radon exposure. ICRP Publication 126. Ann. ICRP 43 (3).
- [14] 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.

- [15] Vukotić, P., i sar., 2018. Izvještaj o nacionalnom projektu „MNE9005 — Radon u crnogorskim školama i vrtićima”, Crnogorska akademija nauka i umjetnosti, nepublikovano. Dvogodišnji projekt MNE9005 finansirali su Međunarodna agencija za atomsku energiju (IAEA) i Vlada Crne Gore.
- [16] 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.
- [17] Ielsch, G., Greau, C., Sainz Fernandez, C., 2020. Task 4.3.3: Estimation of Rn priority areas based on Rn extremes, with case studies in France and Spain. MetroRADON Workshop, Vienna 25–26 February 2020. http://metroradon.eu/wp-content/uploads/2020/03/17_WP4_Greau.pdf
- [18] Haneberg, W. C., Wiggins, A., Curl, D. C., Greb, S. F., Andrews, W. M. Jr., Rademacher, K., Rayens, M. K., Hahn, E. J., 2020. A Geologically Based Indoor-Radon Potential Map of Kentucky. *GeoHealth* 4, e2020GH000263. <https://doi.org/10.1029/2020GH000263>
- [19] Long, S. C., Fenton, D., Scivyer, C., Monahan, E., 2016. Factors underlying persistently high radon levels in a house located in a karst limestone region of Ireland — lessons learned about remediation. *Nukleonika* 1(3), 327–332.
- [20] Leonardi, F., Botti, T., Buresti, G., Caricato, A. P., Chezzi, A., Pepe, C., Spagnolo, S., Tonnarini, S., Veschetti, M., Trevisi, R., 2021. Radon Spatial Variations in University’s Buildings Located in an Italian Karst Region. *Atmosphere* 12, 1048. <https://doi.org/10.3390/atmos12081048>
- [21] Appleton, J. D., Miles, J. C. H., Young, M., 2011. Comparison of Northern Ireland radon maps based on indoor radon measurements and geology with maps derived by predictive modelling of airborne radiometric and ground permeability data. *Sci. Total Environ.* 409 (8), 1572–83. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/21310464/>
- [22] Pajović, M., 1999. Metalogenetska karta Crne Gore, 1:200 000. Posebna izdanja Geološkog glasnika, knjiga XVI, Podgorica.
- [23] Pajović, M., 2000. Geologija i geneza crvenih boksita Crne Gore, Posebna izdanja Geološkog glasnika, knjiga XVII Geološki zavod, Podgorica.
- [24] Dragović, D., 1988. Bijeli boksiti Crne Gore. Izdavač Univerzitetstva riječ, Nikšić.
- [25] Voros, I., 1977. Investigations of district for United Nations -YUG/73/010 Mineral project in the S. R. of Montenegro. FSD Republičkog zavoda za geološka istraživanja, Podgorica.
- [26] Radusinović, S., i sar., 2019. Istraživanje mikroelemenata i elemenata rijetkih zemalja u ležištima karstnih boksita zapadne Crne Gore. FSD Geološkog zavoda, Podgorica.
- [27] Pljevaljčić, B., i sar., 2018. Metalogenetsko-prognozna karta boksitonosnog područja zapadne Crne Gore, 1:50 000. FSD Geološkog zavoda, Podgorica .
- [28] Radulović, M., 1996. Hidrogeološke karakteristike karstnih terena u široj okolini Nikšića. Geološki glasnik, knjiga XV, Geološki zavod, Podgorica.
- [29] Kemski, J., Siehl, A., Stegemann, R., Valdivia-Manchego, M., 2001. Mapping the geogenic radon potential in Germany. *Sci. Tot. Environ.* 272, 217–230.
- [30] Friedmann, H., 2005. Final results of the Austrian radon project. *Health Phys.* 89, 339–348.
- [31] 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.

- [32] 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.
- [33] 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>
- [34] Radolić V., Miklavčič, I., Poje Sovilj, M., Stanić, D., Petrinc, B., Vuković B., 2019. The natural radioactivity of Istria, Croatia. *Radiat. Phys. Chem.* 155, 332–340.
- [35] HASL-300, 1997. EML Procedures Manual, 28 Edition. U.S. Department of Energy, Environmental Measurements Laboratory, New York.
- [36] International Atomic Energy Agency, 1989. Measurement of Radionuclides in Food and the Environment — A Guidebook. Technical Reports Series No. 295. Vienna.
- [37] 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>
- [38] Appleton, J. D., Doyle, E., Fenton, D., Organo, C., 2011. Radon potential mapping of the Tralee-Castleisland and Cavan areas (Ireland) based on airborne gamma-ray spectrometry and geology. *J. Radiol. Prot.* 31, 221–235.
- [39] Borgoni, R., De Francesco, D., De Bartolo, D., Tzavidis, N., 2014. Hierarchical modeling of indoor radon concentration: how much do geology and building factors matter? *J. Environ. Radioact.* 138, 227–237.
- [40] Vukotić, P., Borisov, G. I., Kuzmič, V. V., Kulakov, V. M., Antović, N., Dapčević, S., Mirković, M., Pajović, M., Svrkota, R., Fušić, B., Đuretić, G., 1977. Background gamma-radiation in Montenegro. Proceedings of The IRPA Regional Symposium on Radiation Protection in Neighboring Countries of Central Europe, Prague, Czech Republic, 477–479.
- [41] 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.
- [42] Garcia-Talavera, M., Garcia-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.
- [43] Berens, A. S., Diema, J., Stauber, C., Dai, D., Foster, S., Rothenberg, R., 2017. The use of gamma-survey measurements to better understand radon potential in urban areas. *Sci. Total Environ.* 607–608, p. 888–899.
- [44] 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>
- [45] Forkapic, S., Maletic, D., Vasin, J., Bikit, K., Mrdja, D., Bikit, I., Udovicic, 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.
- [46] Pisapak, P., Todorovic, 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.
- [47] Huynh Nguyen, P. T., Thang Nguyen, V., Ba Vua, N., Dong Nguyen, V., Le Cong, H., 2018. Soil radon gas in some soil types in the rainy season in Ho Chi Minh City, Vietnam. *J. Environ. Radioact.* 193–194, 27–35.

*Perko Vukotić, Vanja Radolić, Ranko Svrkota, Denis Stanić,
Tomislav Anđelić, Radivoje Mrdak, Budimir Fušić*

Radon potential of the karstic locations in the western part of the Nikšić municipality

Abstract

The Montenegrin national radon surveys have shown that the municipality of Nikšić has the highest annual average radon (^{222}Rn) concentrations in dwellings ($\text{AM} = 201 \text{ Bq/m}^3$), and the second highest radon concentrations in ground-floor school rooms ($\text{AM} = 599 \text{ Bq/m}^3$). More precisely, the highest radon concentrations in Montenegrin dwellings and schools were found in the western, rural part of the Nikšić municipality, which is a typical high karst region. In this region, during the national radon surveys, radon was measured in ground-floor rooms of 9 houses and 16 schools, at 25 locations which belong to an area of 800 km^2 , and the radon concentrations in them were found to be very high: range (219–2494) Bq/m^3 , $\text{AM} = 977 \text{ Bq/m}^3$.

In order to investigate the geogenic radon potential of these 25 karstic locations, as a probable cause of the high indoor radon levels, the following soil parameters were measured in the immediate vicinity of the mentioned 9 houses and 16 schools: humidity (H), electrical conductivity (EC), pH , activity concentrations of ^{226}Ra , ^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th and ^{40}K , radon activity concentration (c), permeability (k) for radon gas, and gamma dose rate (D) in the air 1 m above the soil. The geogenic radon potential of the location (GRP) is calculated from c and k values.

Quantities which characterize radon in soils of the investigated area are found to have high values: c — range (8.9–390) kBq/m^3 , $\text{AM} = 115 \text{ kBq/m}^3$; k — range (3.9–180) $\cdot 10^{-13} \text{ m}^2$, $\text{AM} = 153 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2$; GRP — range 11–419, $\text{AM} = 129$. Also, concentrations of ^{226}Ra , as ^{222}Rn parent, are found to be elevated (range (48–326) Bq/kg , $\text{AM} = 167 \text{ Bq/kg}$), probably because of traces of bauxite presence at some of the investigated locations. Among the 25 investigated locations, 9 of them has a radon index (RI) which is categorized as *extremely high*, and the other 9 location as *very high*.

Spearman correlation reveals a strong relationship between c and GRP ($r_s = 0.906$, $p < 0.001$), and a moderate relationship of c with D and ^{226}Ra , and k with EC . Relationship between D and ^{226}Ra is strong ($r_s = 0.719$, $p < 0.001$).

Pearson correlation shows a positive linear relationship between gamma dose rate (D) in the air at a location with ^{226}Ra and radon concentration (c) in soil and with GRP of the location, which means that D could be used at karstic terrains as the first, although rough indicator of radium content in the soil, and geogenic radon potential at the location as well.

Probably due to a relatively small number of the investigated karstic locations (sample size $n = 25$), the t-test and Mann-Whitney test do not show statistically significant differences (at the significance level of 95%) between the average values and medians of the parameters c , k , GRP , ^{226}Ra and D for different categories of carbonate rocks (limestones, dolomites), and of soil types (calcomelanosol, rendzina).

Spearman correlation does not reveal any statistically significant relationship between indoor radon concentrations and measured variables that characterize soils at investigated sites.

Acknowledgement

The paper presents a part of the research conducted within the project funded by the Montenegrin Academy of Sciences and Arts. The authors would like to thank the Academy for making this research possible.

