

CRNOGORSKA AKADEMIJA NAUKA I UMJETNOSTI
GLASNIK ODJELJENJA PRIRODNIH NAUK, 27, 2024.

ЧЕРНОГОРСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК И ИСКУССТВ
ГЛАСНИК ОТДЕЛЕНИЯ ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК, 27, 2024

THE MONTENEGRIN ACADEMY OF SCIENCES AND ARTS
PROCEEDINGS OF THE SECTION OF NATURAL SCIENCES, 27, 2024

UDK 504.75:546.296]:373.3(497.16)

IZLOŽENOST RADONU UČENIKA SREDNJIH ŠKOLA U CRNOJ GORI

Perko VUKOTIĆ

Crnogorska akademija nauka i umjetnosti, R. Stijovića 5, 81000 Podgorica, Crna Gora

Sažetak

Radon (^{222}Rn) je tokom školske godine mjereno pasivnim detektorima u 47 zgrada svih srednjih škola u Crnoj Gori. Uzorkovane su sve učionice i kancelarije u prizemlju svih škola (507 prostorija), kao i 40 prostorija na prvom spratu u 22 škole.

Na prvom spratu su koncentracije aktivnosti radona relativno niske ($AM = 70 \text{ Bq/m}^3$, $MAX = 231 \text{ Bq/m}^3$), i samo u šest prostorija veće su od 100 Bq/m^3 .

Statistika rezultata mjerenja u prizemlju škola pokazuje da je, za srednje vrijednosti koncentracija aktivnosti radona po zgradama škola, opseg (34–1053) Bq/m^3 , $AM = 226 \text{ Bq/m}^3$, $MED = 160 \text{ Bq/m}^3$, $GM = 164 \text{ Bq/m}^3$ i $GSD = 2,14$. U devet škola (19% svih škola) je srednja koncentracija radona za sve prostorije u prizemlju veća od 300 Bq/m^3 , dok 27 zgrada (57%) ima bar jednu prostoriju sa koncentracijom radona iznad 300 Bq/m^3 , a pet zgrada (11%) bar jednu prostoriju sa više od 1000 Bq/m^3 .

Urađena je i procjena efektivnih godišnjih doza za učenike od udisanja radona i njegovih potomaka. Najveća je u dvije srednje škole, gdje u pojedinim prostorijama učenici tokom školske godine prime efektivnu dozu od 10 do 20 mSv.

Zahvalnost

Mjerenja radona u školama u Crnoj Gori finansirale su Međunarodna agencija za atomsku energiju i Vlada Crne Gore. Autor je zahvalan finansijerima i svojim saradnicima na realizaciji mjerenja.

1. UVOD

Radon (Rn) je prirodan gas. Nema boju, ni miris, ni ukus, tako da čovjek svojim čulima ne može osjetiti njegovo prisustvo. Radon je radioaktivan gas. Njegovi kratkoživeći potomci daju najveći doprinos efektivnoj dozi, koju stanovništvo prima od prirodnih izvora

zračenja [1]. Dugotrajna ekspozicija visokim nivoima radona povećava rizik nastanka kancera pluća [2].

Radon se prirodno pojavljuje u vidu tri radioizotopa: radona (^{222}Rn), torona (^{220}Rn) i aktinona (^{219}Rn). Sa aspekta zaštite od zračenja, najvažniji njegov radioizotop je radon ^{222}Rn , jer predstavlja potencijalno najveći izvor radijacione izloženosti čovjeka u zatvorenim prostorima [3]. On potiče iz prirodnog lanca raspada uranijuma ^{238}U , koji je u životnoj sredini prisutan u stijenama, zemljištu, vodama i u građevinskom materijalu. Većina radona nastalog u tlu 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. U atmosferskom vazduhu on se razblažuje i njegova koncentracija u prizemnim slojevima vazduha je tipično na nivou od 10 Bq/m^3 [4]. Međutim, u vazduhu zatvorenih prostora, kao što su zgrade, radon se akumulira i može doseći koncentracije od više stotina, pa i hiljada Bq/m^3 .

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.

Radon u zgradama doprinosi približno polovini srednje godišnje efektivne doze, koju stanovništvo prima od prirodnih izvora jonizujućeg zračenja [1]. Postoje jasni dokazi da dugovremeno izlaganje radonu, tokom kojeg se udišu produkti njegovog radioaktivnog 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 (SZO), Međunarodna agencija za atomsku energiju (MAAE) i Savjet Evropske unije (SEU) preporučuju državama članicama mjere i standarde koje treba primijeniti u cilju zaštite ljudi od izlaganja radonu u stanovima i na radnim mjestima. Tako preporučuju i referentni nivo, tj. srednju godišnju koncentraciju aktivnosti radona iznad koje bi trebalo preduzimati mjere za smanjenje rizika od radona po zdravlje ljudi. SEU [5] i MAAE [6] preporučuju državama članicama referentni nivo od 300 Bq/m^3 , a SZO [2] znatno zahtjevniji nivo od 100 Bq/m^3 , jer novije epidemiološke studije pokazuju statistički značajan porast rizika od kancera pluća pri dugotrajnoj rezidencijalnoj izloženosti koncentracijama radona iznad tog nivoa. Ako taj referentni nivo zbog socioekonomskih okolnosti objektivno nije moguće postići, tada i SZO preporučuje usvajanje referentnog nivoa od 300 Bq/m^3 . U Crnoj Gori još uvijek važi referentni nivo od 400 Bq/m^3 , prema 25 godina starom propisu, iako je još 2016. godine završen projekt mapiranja radona u stanovima u Crnoj Gori na osnovu kojeg je tada preporučeno nadležnim državnim organima da se usvoji novi referentni nivo od 300 Bq/m^3 [7].

2. MATERIJAL I METODE

U okviru nacionalnog projekta “MNE9005 – Radon u crnogorskim školama i vrtićima” [8], radon (^{222}Rn) je mjereno pasivnim detektorima kontinuirano tokom čitave školske 2016/17. godine (septembar–jun) u svim javnim ustanovama preduniverzitetakog obrazovanja i vaspitanja – vrtićima, osnovnim i srednjim školama, resursnim centrima i domovima učenika. Radon je tada mjereno u 47 zgrada svih srednjih škola u Crnoj Gori, u

svim učionicama, kabinetima i kancelarijama u prizemlju, ukupno u 507 prostorija, kao i na prvom spratu u 22 škole, ukupno u 40 prostorija. Zbog planiranog devet mjeseci dugog mjerenja i očekivanja da koncentracija aktivnosti radona u nekim prizemnim prostorijama može biti vrlo visoka, za mjerenja je odabran Radossysov detektor tipa RSFV. Prema podacima proizvođača, taj detektor nije osjetljiv na toron (^{220}Rn) i na gama zračenje, a ima dva CR-39 čipa različitih osjetljivosti, tako da može mjeriti radon (^{222}Rn) do 80 MBq/m^3 , što znači da za devetomjesečnu ekspoziciju može mjeriti srednju koncentraciju radona do oko 10 kBq/m^3 . U cilju provjere tačnosti mjerenja koncentracija radona, na svakom desetom mjernom mjestu postavljana su po dva detektora u paru, jedan u blizini drugog. Tokom mjerenja izgubljeno je ili oštećeno 11% detektora. Nakon devetomjesečnog izlaganja detektori su poslani proizvođaču, u čijoj laboratoriji je zatim rađeno nagrzanje detektora i brojanje tragova alfa čestica. Tada se pokazalo da ni u jednom od korišćenih detektora nije došlo do saturacije oba čipa, tj. da u srednjim školama nije bilo koncentracija radona na nivou 10 kBq/m^3 ili većem.

Sve zgrade srednjih škola nalaze se u urbanim naseljima. Većina njih ima prizemlje i sprat (21 zgrada) ili prizemlje i dva sprata (18 zgrada), dok su samo osam zgrada prizemne. Samo 11 zgrada ima podrum. Četiri zgrade su izgrađene prije 1945. godine, 22 od 1945. do 1980, a 21 zgrada poslije 1980. godine. Materijal spoljašnjih zidova je najčešće kombinacija betona i opeke (24 zgrade), zatim beton (13 zgrada), dok je kod šest zgrada kamen, a kod četiri zgrade opeka. U većini zgrada (35) ugrađena je PVC/Al stolarija, dok je kod ostalih (12 zgrada) ona drvena. Gotovo u svim školama kažu da je debljina temeljne betonske ploče veća od 5 cm, što je veoma nesiguran podatak jer škole ne posjeduju odgovarajuću tehničku dokumentaciju.

3. REZULTATI I DISKUSIJA

Deskriptivna statistika rezultata mjerenja radona na prvom spratu u 22 od 47 zgrada svih srednjih škola u Crnoj Gori, u 40 prostorija, data je u Tabeli 1.

Tabela 1. Karakteristike koncentracija aktivnosti radona na prvom spratu srednjih škola

n	AM (Bq/m^3)	SE (Bq/m^3)	MED (Bq/m^3)	Opseg (Bq/m^3)	GM (Bq/m^3)	GSD
40	70	6,5	60	17–231	60,8	1,69

n – broj uzorkovanih prostorija; AM – aritmetička sredina; SE – standardna greška; MED – medijana; GM – geometrijska sredina; GSD – geometrijska standardna devijacija

Iz opsega izmjerenih vrijednosti vidi se da ni u jednoj uzorkovanoj prostoriji na prvom spratu tih škola koncentracija radona nije veća od 300 Bq/m^3 , a samo u šest prostorija (ili 15%) ona je veća od 100 Bq/m^3 . Stoga, može se zaključiti da problemi sa radonom ne postoje na prvom i na višim spratovima srednjih škola u Crnoj Gori. Međutim, Tabela 2, koja prikazuje deskriptivnu statistiku rezultata mjerenja radona u prizemlju svih 47 zgrada srednjih škola, pokazuje da je sasvim drugačija situacija u prizemlju škola, i da tamo itekako postoji problem visokih koncentracija aktivnosti radona. Štaviše, Tabela 2 pokazuje i da su u prizemlju srednje vrijednosti koncentracija radona u srednjim školama dvostruko veće nego u stambenim zgradama u Crnoj Gori [9], što znači da su učenici, u prosjeku, znatno više izloženi radonu u školi nego kod kuće.

Tabela 2. Karakteristike koncentracija aktivnosti radona u prizemlju srednjih škola i stanova u Crnoj Gori

Tip zgrade	N	AM (Bq/m ³)	SE (Bq/m ³)	MED (Bq/m ³)	Opseg (Bq/m ³)	GM (Bq/m ³)	GSD
Škole	47	226	32,2	160	34–1053	164	2,14
Stanovi [9]	732	131	7,4	65	4–2321	71,5	2,88

N – broj uzorkovanih zgrada

Za škole, AM u Tabeli 2 predstavlja aritmetičku sredinu srednjih devetomjesečnih koncentracija aktivnosti radona u prizemnim prostorijama pojedinačnih škola. U stambenim zgradama radon je mjereno tokom čitave godine samo u jednom stanu u prizemlju.

Poređenja radi, u Tabeli 3 date su karakteristike koncentracija radona u školama u nekim geografski nam bliskim državama – u Italiji, u provinciji Leće, u srednjim školama [10], na jugu Bugarske u osnovnim i srednjim školama [11], kao i u osnovnim školama na jugu Srbije [12], u Bosni i Hercegovini, u Banjoj Luci [13] i u Sjevernoj Makedoniji u tri opštine [14]. Vidi se da je po svim relevantnim parametrima (opseg, AM, MED, GM) situacija sa radonom u srednjim školama u Crnoj Gori nepovoljnija nego u tim državama, posebno ako se ima u vidu da u svim tim državama, osim Italije, statistika prikazana u Tabeli 3 obuhvata i osnovne škole, od kojih su mnoge u ruralnim sredinama i obično su lošijih građevinskih karakteristika nego srednje škole u gradovima.

Tabela 3. Karakteristike koncentracija radona u školama nekih država geografski bliskih Crnoj Gori

Država	N	AM (Bq/m ³)	SE (Bq/m ³)	MED (Bq/m ³)	Opseg (Bq/m ³)	GM (Bq/m ³)	GSD
Italija [10]	69	188	18	145	21–671	139	-
Bugarska [11]	46	144	12	-	20–544	117	1,78
Srbija [12]	207	118	5	96	17–428	97	1,90
Bosna i Herceg. [13]	25	128	17	82	36–549	99	1,94
Sjev. Makedonija [14]	29	215	46	115	22–990	129	2,76

Tabela 4. Zgrade i prostorije srednjih škola u Crnoj Gori sa koncentracijama radona iznad 300 Bq/m³ i 1000 Bq/m³

Zgrade sa $C_{Rn,sr} \geq 300 \text{ Bq/m}^3$	Zgrade sa $C_{Rn,sr} \geq 1000 \text{ Bq/m}^3$	Zgrade sa prostorijama sa $C_{Rn} > 300 \text{ Bq/m}^3$	Zgrade sa prostorijama sa $C_{Rn} \geq 1000 \text{ Bq/m}^3$	Prostorije sa $C_{Rn} > 300 \text{ Bq/m}^3$	Prostorije sa $C_{Rn} > 1000 \text{ Bq/m}^3$
9 (19,1%)	2 (4,2%)	27 (57,4%)	5 (10,6%)	83 (16,4%)	12 (2,4%)

$C_{Rn,sr}$ – srednja koncentracija aktivnosti radona za sve prostorije u prizemlju zgrade;

C_{Rn} – koncentracija aktivnosti radona u prostoriji

Tabela 5. Škole sa srednjom koncentracijom radona u prizemlju $C_{Rn,sr} \geq 300 \text{ Bq/m}^3$

Škola	Lokacija	n	$C_{Rn,sr}$ (Bq/m ³)	Opseg (Bq/m ³)	n ₁	n ₂
Gimnazija	Bijelo Polje	7	300	73–931	1	0
Gimnazija	Danilovgrad	14	1053	201–3374	13	5
Prva stručna škola	Nikšić	8	353	133–970	3	0

ET „V. Aligrudić“	Podgorica	9	728	274–2237	8	2
SS „M. Radević“ objekat 1	Podgorica	10	434	178–825	7	0
SS „M. Radević“ objekat 2	Podgorica	3	490	325–785	3	0
SS „S. Raspopović“ objekat 1	Podgorica	4	549	76–1158	2	1
Srednja mješovita	Petnjica	1	396	396	1	0
Obrazovni centar	Šavnik	6	1005	493–1332	6	3

n – broj prostorija u prizemlju zgrade u kojima je mjeran radon; n_1 – broj prostorija u prizemlju zgrade u kojima je $C_{Rn} > 300 \text{ Bq/m}^3$; n_2 – broj prostorija u prizemlju zgrade u kojima je $C_{Rn} > 1000 \text{ Bq/m}^3$

Tabela 4 jasno pokazuje ozbiljnost problema zbog visokih koncentracija radona u prizemlju srednjih škola u Crnoj Gori. Od ukupno 47 zgrada tih škola, u njih 27 (57%) postoji bar jedna prostorija u kojoj je tokom školske godine srednja koncentracija aktivnosti radona veća od 300 Bq/m^3 , i pet zgrada (11%) sa bar jednom prostorijom u kojoj je ona veća od 1000 Bq/m^3 . Srednja koncentracija radona za sve prostorije u prizemlju škole je veća od 300 Bq/m^3 u devet zgrada (19,1%), a u dvije od tih devet zgrada ona je veća čak i od 1000 Bq/m^3 . Od 507 uzorkovanih prostorija u prizemlju srednjih škola, 85 prostorija (16%) ima koncentracije aktivnosti radona veće od 300 Bq/m^3 , a 12 prostorija (2,4%) veće od 1000 Bq/m^3 .

Podaci o koncentracijama aktivnosti radona u devet zgrada srednjih škola u kojima je srednja koncentracija radona za sve prostorije u prizemlju veća od 300 Bq/m^3 prikazani su u Tabeli 5. U tim zgradama je remedijacija radona prioritetno neophodna i hitna.

Tabela 6. Karakteristike koncentracija aktivnosti radona u srednjim školama po opštinama

Opština	N	AM (Bq/m^3)	SE (Bq/m^3)	MED (Bq/m^3)	Opseg (Bq/m^3)
Andrijevica	1	132	-	-	-
Bar	2	108,5	51,5	108,5	57–160
Berane	3	134	16,7	135	105–163
Bijelo Polje	3	186	62,3	176	84–299
Budva	1	204	-	-	-
Cetinje	2	148	31,0	148	117–179
Danilovgrad	1	1053	-	-	-
Gusinje	0				
Herceg Novi	1	105	-	-	-
Kolašin	1	171	-	-	-
Kotor	2	48,5	13,5	48,5	35–62
Mojkovac	1	181	-	-	-
Nikšić	6	154	44,0	139	55–353
Podgorica	15	270	50,1	204	68–728
Petnjica	1	396	-	-	-
Plav	1	185	-	-	-
Plužine	1	266	-	-	-
Pljevlja	1	89	-	-	-
Rožaje	1	73	-	-	-

Šavnik	1	1005	-	-	-
Tivat	1	34	-	-	-
Ulcinj	1	68	-	-	-
Žabljak	0				

N – broj zgrada srednjih škola u opštini

Remedijacija zgrade škole, zavisno od njenih građevinskih karakteristika, u nekim slučajevima može biti tehnički veoma zahtjevna i zato vrlo skupa. Zbog toga, do trajnijeg rješenja problema sa radonom u zgradi škole, tj. do njene remedijacije, bilo bi neophodno preduzeti privremene moguće mjere za smanjenje izlaganja radonu učenika i nastavnika. Te mjere bi bile sljedeće:

– U prostorijama u prizemlju škole u kojima su koncentracije aktivnosti radona veće od 300 Bq/m^3 , trebalo bi raditi obavezno svakodnevno provjetravanje, koje bi moralo biti češće i intenzivnije ukoliko je koncentracija radona veća.

– Zavisno od konkretnih prostornih uslova i mogućnosti organizovanja nastave u školi, neophodno je hitno premještanje nastave, potpuno ili najvećim dijelom, iz učionica sa koncentracijama radona iznad 1000 Bq/m^3 u neke od prostorija na spratu zgrade, ili u druge neke prostorije u prizemlju u kojima su izmjerene relativno niske koncentracije radona.

U tabelama 6 i 7 prikazane su karakteristike koncentracija radona u srednjim školama po opštinama.

Tabela 7. Srednje škole, po opštinama, u kojima je bar jedna prostorija sa $C_{Rn} > 300 \text{ Bq/m}^3$ i $C_{Rn} > 1000 \text{ Bq/m}^3$

Opština	N	$N_1 (> 300 \text{ Bq/m}^3)$	$N_2 (> 1000 \text{ Bq/m}^3)$
Andrijevića	1	1	0
Berane	3	2	0
Bijelo Polje	3	1	0
Budva	1	1	0
Cetinje	2	2	0
Danilovgrad	1	1	1
Herceg Novi	1	1	0
Kolašin	1	1	0
Mojkovac	1	1	0
Nikšić	6	2	0
Podgorica	15	9	3
Petnjica	1	1	0
Plav	1	1	0
Pljevlja	1	1	0
Plužine	1	1	0
Šavnik	1	1	1
Ukupno	40	27	5
Ukupno Crna Gora	47	57%	11%

N – ukupan broj srednjih škola; N_1 – broj srednjih škola sa prostorijama u kojima je $C_{Rn} > 300 \text{ Bq/m}^3$; N_2 - broj srednjih škola sa prostorijama sa $C_{Rn} > 1000 \text{ Bq/m}^3$

Godišnja efektivna doza za učenike zbog udisanja u školi radona ^{222}Rn i njegovih potomaka procijenjena je prema formuli [4]:

$$E = C_{Rn} \cdot F \cdot d \cdot t, \quad (1)$$

gdje je: E – efektivna doza (Sv/god), C_{Rn} – srednja devetomjesečna koncentracija aktivnosti radona (Bq/m^3); F – faktor ravnoteže (odnos ravnotežne ekvivalentne koncentracije radona i koncentracije radona), uzet sa tipičnom vrijednošću $F = 0,4$; d – dozni konverzioni faktor ($Sv/Bq\ m^{-3}\ h$); t – vrijeme (h) koje učenik provede u učionici tokom školske godine.

Za dozni konverzioni faktor UNSCEAR preporučuje vrijednost $d = 9\ nSv/Bq\ m^{-3}\ h$ [15], dok ICRP preporučuje gotovo dvostruko veću vrijednost, odnosno dozni koeficijent $F \cdot d = 6,7\ nSv/Bq\ m^{-3}\ h$, uz pretpostavku da je $F = 0,4$ [16]. Zbog toga, procjena efektivne godišnje doze za učenike urađena je na osnovu preporuka i UNSCEAR-a i ICRP-a, a rezultati su dati u tabelama 8 i 9.

Na osnovu nastavnih planova za gimnazije i srednje stručne škole u Crnoj Gori, važećih za školsku 2016/17. godinu, tokom koje je mjereno radon u školama, u formuli (1) uzeto je $t = 940\ h$ godišnje za učenike gimnazija i $t = 910\ h$ godišnje za učenike srednjih stručnih škola. Za procjenu srednje efektivne doze E_{sr} za učenike, za sve srednje škole i prosjek koncentracija radona od $226\ Bq/m^3$ u njima (Tabela 8), u formuli (1) korišćeno je prosječno godišnje vrijeme, koje učenik provede u školi $t = 915\ h$. Opseg E računat je sa $t = 910$ sati za stručnu školu u Tivtu, koja ima najmanju srednju devetomjesečnu koncentraciju radona u prizemlju ($C_{Rn,sr} = 34\ Bq/m^3$), a za gimnaziju u Danilovgradu, koja ima najveću srednju koncentraciju radona ($C_{Rn,sr} = 1053\ Bq/m^3$), sa $t = 940$ sati. U Tabeli 9 date su posebno efektivne godišnje doze za učenike u školama kod kojih je srednja koncentracija radona u svim prostorijama u prizemlju zgrade $C_{Rn,sr} \geq 300\ Bq/m^3$.

Tabela 8. Efektivne godišnje doze za učenike od udisanja ^{222}Rn i njegovih potomaka u srednjim školama procijenjene na osnovu srednjih koncentracija radona $C_{Rn,sr}$ u prizemlju zgrada škola

N	$AM_{C_{Rn,sr}}$ (opseg $C_{Rn,sr}$) (Bq/m^3)	E_{sr} (opseg E) (mSv) UNSCEAR	E_{sr} (opseg E) (mSv) ICRP
47	226 (34–1053)	0,74 (0,11–3,56)	1,38 (0,21–6,63)

N – broj zgrada srednjih škola; $C_{Rn,sr}$ – srednja koncentracija radona u prizemlju škole; $AM_{C_{Rn,sr}}$ – aritmetička sredina srednjih vrijednosti koncentracija radona u svim zgradama srednjih škola; E – godišnja efektivna doza za učenike u školi; E_{sr} – srednja godišnja efektivna doza za učenike u prizemlju svih srednjih škola

Tabela 9. Efektivne godišnje doze za učenike od ^{222}Rn u školama sa srednjom koncentracijom radona u prizemlju $C_{Rn,sr} \geq 300\ Bq/m^3$

Škola	n	$C_{Rn,sr}$ (opseg C_{Rn}) (Bq/m^3)	E_{sr} (opseg E) (mSv) UNSCEAR	E_{sr} (opseg E) (mSv) ICRP
Gimnazija, Bijelo Polje	7	300 (73–931)	1,01 (0,25–3,15)	1,88 (0,46–5,86)
Gimnazija, Danilovgrad	14	1053 (201–3374)	3,56 (0,68–11,42)	6,63 (1,26–21,25)
Prva stručna, Nikšić	8	353 (133–970)	1,16 (0,44–3,12)	2,15 (0,81–5,91)
ET „V. Aligrudić“, Podgorica	9	728 (274–2237)	2,38 (0,90–7,33)	4,44 (1,67–13,64)
SS „M. Radević“, objekat 1, Podgorica	10	434 (178–825)	1,42 (0,58–2,70)	2,65 (1,08–5,03)
SS „M. Radević“,	3	490 (325–785)	1,60 (1,06–2,57)	2,99 (1,98–4,79)

objekat 2, Podgorica				
SS „S. Raspopović“, objekat 1, Podgorica	4	549 (76–1158)	1,80 (0,25–3,79)	3,35 (0,46–7,06)
Srednja mješovita, Petnjica	1	396	1,30	2,41
Obrazovni centar, Šavnik	6	1005 (493–1332)	3,29 (1,62–4,36)	6,13 (3,00–8,12)

n – broj prostorija u prizemlju zgrade u kojima je mjeran radon

Iz Tabele 9 se vidi da u Gimnaziji u Danilovgradu, Elektrotehničkoj školi u Podgorici i u Obrazovnom centru u Šavniku učenici od udisanja radona i njegovih potomaka primaju tokom školske godine zabrinjavajuće visoke vrijednosti efektivne doze, u pojedinim učionicama čak na nivou 10 do 20 mSv, što je mnogostruko veće od prosječne za svijet efektivne godišnje doze (1 mSv), koje stanovništvo prima od radona u zatvorenim prostorima [4].

Na osnovu podataka u Tabeli 5 i Tabeli 9 očigledno je da bi apsolutni prioritet za hitnu remedijaciju školskih zgrada, tj. intervenciju u cilju smanjenja izloženosti radonu učenika i nastavnog osoblja morali imati Gimnazija u Danilovgradu, Elektrotehnička škola u Podgorici i Obrazovni centar u Šavniku, a naročito prve dvije škole zbog nastave u dvije smjene u njima i mnogo puta većeg broja učenika i nastavnika u odnosu na Obrazovni centar.

4. ZAKLJUČAK

Crna Gora ima ozbiljan problem sa radonom u srednjim školama. U 27 od ukupno 47 zgrada srednjih škola postoje prostorije u prizemlju u kojima su srednje godišnje koncentracije aktivnosti radona iznad 300 Bq/m^3 , i koje prema međunarodnim standardima zahtijevaju remedijaciju.

U devet srednjih škola neophodne su vrlo hitne intervencije u cilju smanjenja veoma visoke izloženosti radonu učenika i nastavnog osoblja, a tri od njih, Gimnazija u Danilovgradu, Elektrotehnička škola u Podgorici i Obrazovni centar u Šavniku, morale bi imati apsolutni prioritet.

U skladu sa stavom Međunarodne komisije za radiološku zaštitu (ICRP) [17], direktori škola i ministarstava prosvjete i zdravlja Crne Gore trebalo bi da imaju i zakonsku odgovornost za zdravlje učenika i zaposlenih u školama.

LITERATURA

1. 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.
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. 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.
5. EURATOM, 2013. Council Directive 2013/59/EURATOM of 5 December 2013. Off. J. European Union 57 L 13/1, 17. 01. 2014.
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. 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.
8. Vukotic, P., 2018. Izvještaj o nacionalnom projektu "MNE9005 – Radon u crnogorskim školama i vrtićima", Crnogorska akademija nauka i umjetnosti, nepublikovano. Dvogodišnji projekt MNE9005 finansirali Međunarodna agencija za atomsku energiju (IAEA) i Vlada Crne Gore.
9. Vukotic, P., Antovic, N., Zekic, R., Djurovic, A., Andjelic, T., Svrkota, N., Mrdak, R., Dlabac, A., 2021. Influence of climate, building and residential factors on radon levels in ground-floor dwellings in Montenegro. *Nucl. Technol. Radiat.* 36, 74–84.
10. Trevisi, R., Leonardi, F., Simeoni, C., Tonnarini, S., Veschetti, M., 2012. Indoor radon levels in schools of South-East Italy. *J. Environ. Radioact.*, 12, 160–164.
11. Ivanova, K., Chobanova, N., Kunovska, B., Djounova, J., Stojanovska, Z., 2022. Exposure due to radon in Bulgarian schools. *Aerosol Air Qual. Res.*, 22(12), 220279.
12. Zunic, Z.S., Carpentieri, C., Stojanovska, Z., Antignani, S., Veselinovic, N., Tollefsen, T., Carelli, V., Cordedda, C., Cuknic, O., Filipovic, J., Bossew, P., Bochicchio, F., 2013. Some results of a radon survey in 207 Serbian schools. *Rom. Journ. Phys.*, 58, S320–S327.
13. Ćurguz, Z., Stojanovska, Z., Žunić, Z. S., Kolarž, P., Ischikawa, T., Omori, Y., Mishra, S., Sapra, B. K., Vaupotič, J., Ujić, P., Bossew, P., 2015. Long-term measurements of radon, thoron and their airborne progeny in 25 schools in Republic of Srpska. *J. Environ. Radioact.*, 48, 163–169.
14. Stojanovska, Z., Boev, B., Zunic, Z. S., Bossew, P., Jovevska, S., 2016. Results of radon CR-39 detectors exposed in schools due two different long-term periods. *Nukleonika*, 61(3), 385–389.
15. UNSCEAR, 2019. Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, UNSCEAR 2019 Report, Annex B: Lung cancer from exposure to radon. United Nations, New York 2020.
16. ICRP, 2017. Occupational intakes of radionuclides: Part 3. International Commission On Radiological Protection (ICRP) Publication 137. Ann. ICRP 46(3/4).
17. ICRP, 2014. Radiological protection against radon exposure. International Commission On Radiological Protection (ICRP) Publication 126. Ann. ICRP 43(3).

Exposure to radon of secondary school students in Montenegro

Perko Vukotić

Montenegrin Academy of Sciences and Arts, Rista Stijovića 5, Podgorica, Montenegro

Abstract

During the school year, radon (^{222}Rn) was continuously measured with passive detectors in 47 buildings of all secondary schools in Montenegro. All classrooms and offices on the ground floor (507 rooms) were sampled, as well as 40 rooms on the first floor in 22 schools.

On the first floor, the radon activity concentrations were relatively low (AM = 70 Bq/m³, MAX = 231 Bq/m³), and only in six rooms they were above 100 Bq/m³.

The statistics of the average radon activity concentrations on the ground floor by buildings showed that it was: AM = 226 Bq/m³, range (34-1053) Bq/m³, MED = 160 Bq/m³, GM = 164 Bq/m³ and GSD = 2,14. The average radon concentration was higher than 300 Bq/m³ in nine schools (19%), while 27 school buildings (57%) had at least one room with radon concentration above 300 Bq/m³, and five buildings (11%) have at least one room with more than 1000 Bq/m³.

An assessment of the effective annual doses for students from inhalation of radon and its progeny was also made. The effective dose was the highest in two secondary schools, where students in some classrooms received an annual effective dose even at a level of 10 to 20 mSv per school year.

Acknowledgement

The author is grateful to the International Atomic Energy Agency and the Government of Montenegro, who financed the measurement of radon in schools in Montenegro, as well as to his associates who carried out the measurement.