

## **RADON U ŠPILJAMA HRVATSKE – DOZE KOJE PRIME ZAPOSLENICI I POSJETITELJI**

*Vanja Radolić<sup>1</sup>, Igor Miklavčić<sup>1</sup>, Marina Poje<sup>1</sup>, Denis Stanić<sup>1</sup>,  
Branko Vuković i Dalibor Paar<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Sveučilište u Osijeku, Osijek

<sup>2</sup>Sveučilište u Zagrebu, Zagreb

[vanja@fizika.unios.hr](mailto:vanja@fizika.unios.hr)

### **UVOD**

Špilje su u krškom području većinom izgrađene od vapnenca. Budući da vapnenac sadrži u prosjeku 1,3 – 2,5 ppm uranija  $^{238}\text{U}$  [1], a radon je jedan od uranijevih potomaka, za očekivati je da postoje krške špilje s povećanom koncentracijom radona. Općenito, koncentracija radona u špiljama ovisi o različitim parametrima, a dominantni su: ekshalacija radona s površina u špilji, oblik i veličina špilje, dotok zraka izvana i njegovo miješanje sa zrakom unutar špilje. Tako je temperaturna razlika između vanjskog zraka i zraka unutar špilje vodeći mehanizam izmjene zraka u horizontalnim špiljama, dok kod vertikalnih špilja tu ulogu ima razlika tlakova između gornjeg i donjeg dijela špilje [2]. Prema tome, kod horizontalnih špilja su, zbog temperaturnog gradijenta i efekta dimnjaka, koncentracije radona uglavnom najveće ljeti. Zbog smanjene prirodne cirkulacije zraka u špiljama, moguće su visoke koncentracije radona u nekima od njih. Hakl i suradnici [1] su sistematizirali izmjerene radonske koncentracije u špiljama diljem svijeta te su zaključili da im je distribucija približno log-normalna, s aritmetičkom sredinom  $2,8 \text{ kBq m}^{-3}$ , a vrijednosti su bile u rasponu od 0,1 do  $20 \text{ kBq m}^{-3}$ . Sličan rezultat od  $2,5 \text{ kBq m}^{-3}$  dobio je i Cigna [3] analizirajući novopublicirane radonske koncentracije. Tu su potencijalnu opasnost prepoznale međunarodne agencije: Međunarodna komisija za zaštitu od zračenja (ICRP) i Međunarodna agencija za atomsku energiju (IAEA) koje su dale preporuku te sigurnosni standard za radon i njegove potomke prema kojima godišnja efektivna doza za posjetitelje ne treba prelaziti 3 mSv, a za zaposlenike (radnike na održavanju, turističke vodiče) 20 mSv (usrednjeno u petogodišnjem razdoblju). Unatoč ovim preporukama mnogi radnici u špiljama zbog visoke koncentracije radona primaju dozu koja premašuje navedene preporučene vrijednosti [4-6]. Stoga je jedan od najprihvatljivijih načina za smanjenje primljene doze

ograničavanje broja radnih sati unutar špilje, što se nadzire kontinuiranim monitoringom kako špilje tako i zaposlenika [7]. Za određivanje efektivne doze primljene od radona i njegovih kratkoživućih potomaka korišten je epidemiološki model opisan u ICRP-65 publikaciji [8], koja daje konverzijske faktore između efektivne doze i ekspozicije (efektivna doza od 1,1 mSv za opću populaciju, odnosno 1,425 mSv za zaposlenike ekvivalentna je izloženosti radonovim potomcima od  $1 \text{ mJ h m}^{-3}$ ). Pritom omjer između izloženosti radonovim potomcima i ekvivalentne ravnotežne koncentracije radona iznosi  $5,56 \times 10^{-6} \text{ mJ h m}^{-3}$ . Time se, uz poznavanje ravnotežnog faktora (omjer ekvivalentne ravnotežne koncentracije radona i stvarne koncentracije radona), dolazi do relacije koja povezuje izračunatu efektivnu dozu  $E$  s izmjerenom radonskom koncentracijom  $c$ , određenim ravnotežnim faktorom  $F$  i vremenom ekspozicije  $t$ :

$$E[\text{mSv}] = 7,923 \cdot 10^{-6} \cdot F \cdot c [\text{Bq m}^{-3}] \cdot t [\text{h}]. \quad (1)$$

## MATERIJALI I METODE

Mjerenje koncentracije radona u zraku u špilji vrši se pasivnom metodom s detektorima nuklearnih tragova LR-115 tip II. Cilindrični plastični nosač detektora (posuda promjera 11 cm i visine 7 cm), prekriven je na vrhu filtar papirom površinske gustoće  $0,078 \text{ kg/m}^2$ . Unutar nosača, na njegovom dnu, nalazi se jedan film LR-115 tip II, veličine  $2 \times 3 \text{ cm}^2$ , koji služi kao difuzni detektor. Drugi je film pričvršćen na vanjsku stijenku plastičnog nosača i služi kao otvoreni detektor. Pritom, difuzni detektor bilježi samo tragove alfa čestica emitirane od radona, jer radonovi potomci ne mogu proći kroz filtar papir. Otvoreni detektor bilježi ukupan broj alfa čestica koje potječu i od radona i od njegovih kratkoživućih potomaka. Ova metoda mjerenja dvama detektorima nuklearnih tragova omogućuje određivanje ravnotežnog faktora  $F$  između radona i njegovih kratkoživućih potomaka u zraku te bolju procjenu primljene radonske doze korištenjem jednadžbe (1) [9].

Kontinuirano mjerenje koncentracije radona i njegovih kratkoživućih potomaka u zraku kao i mjerenje određenih meteoroloških parametara (temperature zraka, barometarskog tlaka, relativne vlažnosti zraka) izvodi se AlphaGUARD mjernim sustavom, a s ciljem praćenja dnevne varijacije radona i njegovih kratkoživućih potomaka. Određivanje ekvivalentne ravnotežne koncentracije radonovih potomaka kao i tzv. ravnotežnog faktora određuje se pomoću Radon WL Meter TN-WL-02 koji se spaja na AlphaGUARD mjerni sustav.

U Republici Hrvatskoj, radon u jamama i špiljama se sustavnije mjeri od 2004. godine. Detektori se postavljaju tijekom speleoloških istraživanja kojima se istražuju fizikalna i kemijska svojstva krškog podzemlja. Dosad su izmjerene vrijednosti radona u 20-tak špilja Velebita i Žumberačkog gorja. Pored toga, napravljen je i monitoring radona u Đurovića špilji koja se nalazi u blizini kontrolnog tornja zračne luke Dubrovnik što je čini interesantnom za turistički obilazak. Detektori nuklearnih tragova su izlagani u kasnu jesen 2008. te proljeće i ljeto 2009. godine na 14 mjernih lokacija unutar špilje. U lipnju 2010. započet je petnaestomjesečni monitoring radona i njegovih kratkoživućih potomaka u špilji Manita peć – jedinoj špilji unutar Nacionalnog parka Paklenica koja se koristi za turističku namjenu, a s ciljem procjene doze koju primaju kako posjetitelji tako i turistički vodiči.

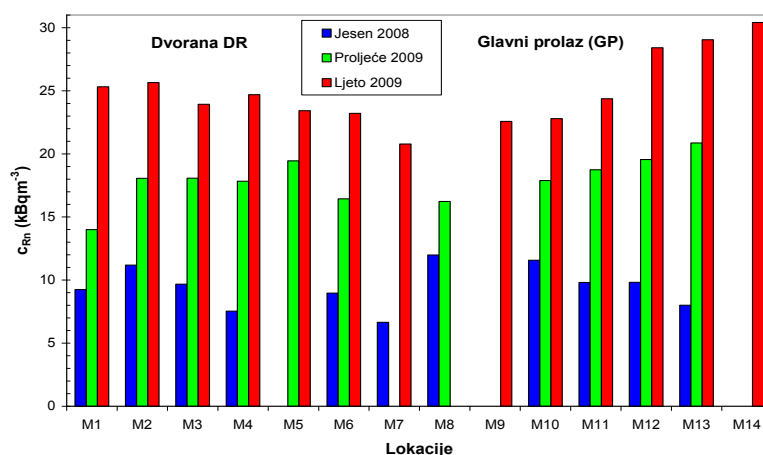
## REZULTATI

Mjerenja radona provedena speleološkim istraživanjima dubokih jamama na Velebitu su pokazala da je najviša koncentracija radona izmjerena u Lubuškoj jami ( $3,8 \text{ kBq m}^{-3}$ ) na 260 metara dubine [10] dok je na Žumberačkom gorju najviša vrijednost izmjerena u špilji Dolača u ljetnom periodu ( $21,8 \text{ kBq m}^{-3}$ ), 250 metara od ulaza u špilju [11].

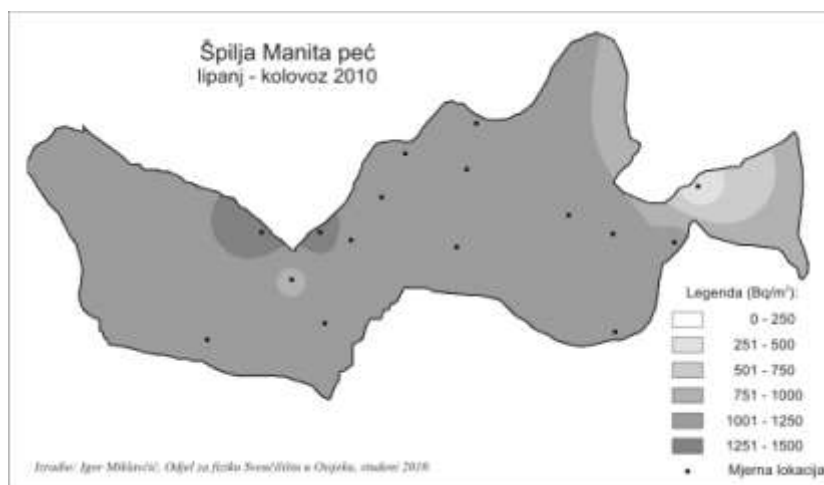
Monitoringom radona u Đurovića špilji u tri klimatološka razdoblja dobivene su sljedeće srednje koncentracije radona u špilji: 9,5 (kasna jesen), 17,9 ( proljeće) i  $25,0 \text{ kBq m}^{-3}$  (ljeto) (Slika 1). Srednja godišnja radonska koncentracija od  $17,6 \text{ kBq m}^{-3}$  svrstava Đurovića špilju među krške špilje s visokom koncentracijom radona (i do 10 puta veća koncentracija ljeti od srednje koncentracije radona u špiljama u svijetu). S obzirom na preporučenu maksimalnu godišnju dozu od 20 mSv za radna mjesta i srednju brzinu doze u špilji od  $44 \mu\text{Sv/h}$ , zaposlenici koji dio radnog vremena provode u njoj (turistički vodiči) trebaju ograničiti svoj boravak unutar špilje na 454 sata godišnje. Maksimalna efektivna doza od radona i njegovih kratkoživućih potomaka koju prima posjetitelj Đurovića špilje tijekom ljeta, za vrijeme polusatnog obilaska, iznosi  $30,6 \mu\text{Sv}$ .

Preliminarni rezultati monitoringa radona na 17 mjernih lokacija u špilji Manita peć pokazuju da ona pripada krškim špiljama s ispodprosječnom koncentracijom radona jer je srednja koncentracija radona u ljetnom razdoblju iznosila  $1,1 \text{ kBq m}^{-3}$ . Pritom je koncentracija radona uniformno distribuirana unutar špilje (Slika 2). Kontinuirano mjerenje radona i njegovih kratkoživućih potomaka AlphaGUARD mjernim sustavom nije pokazalo njihove dnevne varijacije koje bi bile posljedica

ljudske aktivnosti za vrijeme ili nakon turističkih obilazaka. Izloženost srednjoj ljetnoj brzini doze od  $3,7 \mu\text{Sv/h}$  u špilji za turističke vodiče znači da su u klimatološkom ljetu na radnom mjestu primili dozu od  $0,42 \text{ mSv}$ . Prosječna efektivna doza od radona i kratkoživućih potomaka koju prima posjetitelj za vrijeme polusatnog obilaska špilje u ljetnom razdoblju iznosi  $1,86 \mu\text{Sv}$ .



Slika 1. Sezonske varijacije koncentracije radona ( $c_{Rn} / \text{kBq m}^{-3}$ ) na mjernim lokacijama (M1 – M14) u Đurovića špilji.



Slika 2. Prostorna razdioba radona u špilji Manita peć za ljetno klimatološko razdoblje u 2010.

## Zahvala

Autori zahvaljuju Upravi Nacionalnog parka Paklenica, a posebno gđi. Nataliji Andačić, stručnom suradniku – geografu, kao i Upravi zračne luke Dubrovnik te posebno g. Tomislavu Macanu, direktoru tehnike i inženjeringa, na punoj suradnji prilikom izlaganja detektora.

## LITERATURA

- [1] Hakl J, Hunyadi I, Csige I, Géczy G, Lénárt L, Várhegyi, A. Radon transport phenomena studied in karst caves – International experiences on radon level and exposures. *Radiation Measurements* 1997;28:675-684.
- [2] Hakl J, Csige I, Hunyadi I, Várhegyi A, Géczy G. Radon transport in fractured porous media - experimental study in caves. *Environ Int* 1996;22 (Suppl. 1):S433-S437.
- [3] Cigna AA. Radon in caves. *International J Speleol* 2005;34:1-18.
- [4] Papastefanou C, Manolopoulou M, Savvides E, Charalambous S. Natural radiation dose in Petralona Cave. *Health Physics* 1986;50:281-286.
- [5] Pinza-Molina C, Alcaide JM, Rodriguez-Bethencourt R, Hernandez-Armas J. Radon exposure in the caves of Tenerife (Canary Islands). *Radiat Protect Dosim* 1999;82:219-224.
- [6] Jovanovič P. Radon measurements in karst caves in Slovenia. *Environment International* 1996;22 (Suppl.1):S429-S432.
- [7] Vaupotič J, Csige I, Radolić V, Hunyadi I, Planinić J, Kobal I. Methodology of radon monitoring and dose estimates in Postojna cave, Slovenia. *Health Phys* 2001;80:142-147.
- [8] International Commission on Radiological Protection (ICRP). Protection against Radon-222 at Home and at Work. Pergamon Press, ICRP Publication 65. 1994.
- [9] Planinić J, Radolić V, Faj Z, Šoveljak B. Radon equilibrium factor and aerosols, *Nucl Instrum Method Phys Reas A*, 1997;396:414-417.
- [10] Paar D, Ujević M, Bakšić D, Lacković D, Čop A, Radolić V. Physical and Chemical Research in Velebita pit (Croatia). *Acta Carsolog* 2008;37(2-3):273-278.
- [11] Paar D, Radolić V, Lacković D, Buzjak N, Čop A, Bakšić D. Radon concentration measurements on Mt. Velebit and Mt. Žumberak (Croatia). U: Gabrovšek F, Mihevc A, ur. *The Book of Abstracts of the 17<sup>th</sup> International Karstological School "Classical Karst"*, 15.-19. lipnja 2009; Postojna, Slovenija. IZRK ZRC SAZU; 2009. str. 78.

## **RADON CONCENTRATION IN CAVES OF CROATIA – ASSESSING EFFECTIVE RADON DOSES FOR OCCUPATIONAL WORKERS AND VISITORS**

*Vanja Radolić<sup>1</sup>, Igor Miklavčić<sup>1</sup>, Marina Poje<sup>1</sup>, Denis Stanić<sup>1</sup>,  
Branko Vuković and Dalibor Paar<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>University of Osijek, Osijek, Croatia

<sup>2</sup>University of Zagreb, Zagreb, Croatia

[vanja@fizika.unios.hr](mailto:vanja@fizika.unios.hr)

Radon monitoring at potentially highly radioactive location such as caves is important to assess the radiological hazards to occupational workers and occasional visitors. In its Publication 65 the ICRP has produced recommendations dealing with exposure to elevated background radiation, in particular, the risk associated with the inhalation of radon and radon progeny. Recommended annual effective dose from radon <sup>222</sup>Rn and its short-lived progeny for workers should not exceed 20 mSv and for occasional users (visitors) the same recommendation is 1 mSv. Measurements were performed with series of track etched detectors (LR115 – type II) in several caves in Croatia. The obtained values for the radon concentration ranged from ambient values up to several thousand Bq m<sup>-3</sup>.

Radon concentration was measured in about 20 caves of Velebit and Žumberak mountains and the highest radon concentration was in Lubuška jama (3.8 kBq m<sup>-3</sup>) and cave Dolača (21.8 kBq m<sup>-3</sup>), respectively.

Đurovića cave is especially interested because of its huge tourist potential due to its location bellow Dubrovnik airport. Its mean annual radon concentration of 17.6 kBq m<sup>-3</sup> classifies Đurovića cave among caves with high radon concentration. A visitor during half an hour visit at summer time would receive an effective dose of 30.6 μSv. Calculated mean dose rate of 44 μSv/h means that workers (mainly tourist guides) should limit their time inside cave to 454 hours per year. Manita peć is the only cave open for tourists on the territory of Paklenica National Park. The preliminary radon measurements performed during summer 2010, gave an average radon concentration of 1.1 kBq m<sup>-3</sup>. An exposure to average dose rate of 3.7 μSv/h means that the tourist guides would receive an effective dose of 0.42 mSv during summer period according to their working schedule. A visitor during half an hour visits would receive an effective dose of 1.86 μSv.