



УНИВЕРЗИТЕТ У КРАГУЈЕВЦУ  
ПРИРОДНО-МАТЕМАТИЧКИ ФАКУЛТЕТ

Душица М. Спасић

**ИДЕНТИФИКАЦИЈА ВИСОКИХ КОНЦЕНТРАЦИЈА  
РАДОНА У ОБЈЕКТИМА: ПРОЦЕНА ЕФЕКТИВНЕ  
ДОЗЕ И РАЗВОЈ МЕРА РАДИЈАЦИОНЕ ЗАШТИТЕ**

Докторска дисертација

Крагујевац, 2025



UNIVERSITY OF KRAGUJEVAC  
FACULTY OF SCIENCES AND MATHEMATICS

Dušica M. Spasić

**IDENTIFICATION OF HIGH RADON  
CONCENTRATIONS IN OBJECTS: ASSESSMENT OF  
THE EFFECTIVE DOSE AND DEVELOPMENT OF  
RADIATION PROTECTION MEASURES**

Doctoral Dissertation

Kragujevac, 2025

Идентификациона страница докторске дисертације

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Аутор</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Име и презиме: <b>Душица М. Спасић</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Датум и место рођења: <b>23.06.1987.</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| Садашње запослење: асистент, Природно-математички факултет, Универзитет у Приштини са привременим седиштем у Косовској Митровици                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| <b>Докторска дисертација</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Наслов: <b>Идентификација високих концентрација радона у објектима: процена ефективне дозе и развој мера радијационе заштите</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| Број страница: 120                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Број слика: 37                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Број библиографских података: 257                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Установа и место где је рад израђен: Природно-математички факултет, Универзитет у Крагујевцу                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Научна област (УДК): 616-006.4:[539.1:546.64(497.11)(043.3)<br>616.4-006:[539.1:546.64(497.11)(043.3)]                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| <b>Ментор:</b> Др Љиљана Гулан, редовни професор, Природно-математички факултет, Универзитет у Приштини са привременим седиштем у Косовској Митровици                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| <b>Оцена и одбрана</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Датум пријаве теме: 17.05.2023.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Број одлуке и датум прихватања теме докторске/уметничке дисертације: 370/XIII-1, 30.08.2023.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Комисија за оцену научне заснованости теме и испуњености услова кандидата:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| 1. Др Драгана Крстић, ванредни професор, Природно-математички факултет, Универзитет у Крагујевцу<br>2. Др Ненад Стевановић, ванредни професор, Природно-математички факултет, Универзитет у Крагујевцу<br>3. Др Љиљана Гулан, ванредни професор, Природно-математички факултет, Универзитет у Приштини са привременим седиштем у Косовској Митровици                                                                                                                                                                                                            |
| Комисија за оцену и одбрану докторске/уметничке дисертације:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| 1. Др Драгана Крстић, редовни професор, Природно-математички факултет, Универзитет у Крагујевцу<br>2. Др Ненад Стевановић, ванредни професор, Природно-математички факултет, Универзитет у Крагујевцу<br>3. Др Софија Форкапић, виши научни сарадник, Природно-математички факултет, Универзитет у Новом Саду<br>4. Др Јелена М. Стајић, виши научни сарадник, Институт за информационе технологије Крагујевац, Универзитет у Крагујевцу<br>5. Др Биљана Никић, виши научни сарадник, Институт за информационе технологије Крагујевац, Универзитет у Крагујевцу |
| Датум одбране дисертације:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |

---

## Захвалница

---

*Боју хвала на великом дару.*

*Неизмерну захвалносћ дујујем својој менторки проф. др Љиљани Гулан, збој несечичне помоћи коју ми је јужала у свим фазама израде докторске дисертације. Хвала за исказану дуошрљивосћ, разумевање и материнску љубав.*

*Захвалносћ дујујем професорима Природно-математичкој факултету Универзитета у Крајевцу, Института за физику, професору Ненаду Стевановићу и осталим члановима комисије, као и др Софији Форкајћ са Дејармана за физику Природно-математичкој факултету Универзитета у Новом Саду, који су нам на располаање ставили своје уређаје у Лабораторији за испитивање радиоактивности узорака и дозе јонизујуће и нејонизујуће зрачења.*

*Велика захвалносћ целокујној катедри за физику Природно-математичкој факултету Универзитета у Приштини, бившим професорима и онима који више нису.*

*Хвала мојој мајци, сугру, синовима и сестрама.*

*Тата мој, ово посвећујем теби ♥*

## Списак слика

**Слика 1.1** Радиоактивни низ урана ( $^{238}\text{U}$ )

**Слика 1.2** Радиоактивни низ торијума ( $^{232}\text{Th}$ )

**Слика 1.3** Шематски приказ проласка радона кроз земљиште

**Слика 1.4** Шематски приказ феномена еманације радона (Sakoda и др, 2011)

**Слика 1.5** Улазак радона и нагомилавање у затвореном простору

**Слика 1.6** Фактори који утичу на концентрацију радона у затвореном простору

**Слика 1.7 а)** Шематски приказ понашања радонових потомака у затвореном простору  
**б)** Понашање радонових потомака у близини површине објекта и инкорпорација неких атома у танки потповршински слој (Nikezić и Yu, 1999)

**Слика 1.8** Процењени допринос глобалној изложености од различитих извора зрачења (UNSCEAR, 2008)

**Слика 1.9** Различити типови подрума

**Слика 1.10** Проточни вентилатор за прозор

**Слика 1.11** Активни систем потпритиска са унутрашњом и спољашњом постављеном одводном цеви

**Слика 2.1** Геолошка карта истраживаног подручја (Geološki atlas Srbije, 2002)

**Слика 2.2** Металургија олова и енергетике комплекса „Трепча“, Звечан

**Слика 2.3** Детектор радона, Airthings Corentium Home

**Слика 2.4** Угљени канистери на једном од мерних места (Gulan и др, 2023)

**Слика 2.5** Унутрашња запремина уређаја RAD7 (DurrIDGE, 2014)

**Слика 2.6** RAD7 уређај са додатком за мерење радона у земном гасу

**Слика 2.7** RAD7 уређај са додатком за воду ( $\text{H}_2\text{O}$  мерни комплет)

**Слика 2.8** Насеља Грабовац и Рударе

**Слика 2.9** Породична тест кућа

**Слика 2.10** Проучавана зграда пре и после реновирања

**Слика 2.11** Шема основе сутерена са радним просторијама

**Слика 2.12** Обданишта у Косовској Митровици и Звечану

**Слика 3.1** Краткорочна просечна концентрација (STA) и дугорочна просечна концентрација радона (LTA) за дневну и спаваћу собу

**Слика 3.2** Просечне месечне концентрације радона (дневни боравак)

**Слика 3.3** Просечне месечне концентрације радона (дечија соба)

**Слика 3.4** Краткорочна просечна (STA) и дугорочна просечна (LTA) концентрација радона у спаваћој соби тест куће током једне године

**Слика 3.5** Краткорочна просечна концентрација (STA) у радним просторијама са различитим типом подних облога

**Слика 3.6** График (нормализовани подаци) и хистограм концентрација радона према спратности

**Слика 3.7** График (нормализовани подаци) и хистограм концентрација радона за спроведене студије

**Слика 3.8** График (нормализовани подаци) и хистограм концентрација радона за подне облоге

**Слика 4.1** Шема основе сутерена тест куће

**Слика 4.2** Стање подова и зидова у дечијој соби и спаваћој соби

**Слика 4.3** Изглед тест куће након спроведених мера радијационе заштите

**Слика 4.4** Краткорочно (STA) и дугорочно (LTA) мерење концентрације радона у тест кући након примена мера за ублажавање

**Слика 4.5** Предлог за уградњу вентилационог система

**Слика 4.6** Предлог депресуризације у спаваћој соби

## Списак табела

- Табела 1.1** Средња вредност и опсег концентрације активности  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и  $^{40}\text{K}$  у типичним стенама (EPA, 1993; NCRP, 1987)
- Табела 1.2** Средња вредност и опсег специфичне активности  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и  $^{40}\text{K}$  у земљишту у неким земљама и регионима у свету према подацима (UNSCEAR, 2000)
- Табела 1.3** Средња вредност (опсег) концентрација активности  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и  $^{40}\text{K}$  у грађевинским материјалима који се производе у Србији (Kuzmanović и др, 2020a)
- Табела 1.4** Коефицијент еманације радона у земљишту, стенама и грађевинском материјалу (опсег/средња вредност)
- Табела 1.5** Просечне концентрације радона у затвореним просторијама у свету (EURATOM, 2006)
- Табела 1.6** Концентрација радона у затвореном простору распоређене по окрузима у републици Србији (аритметичка средина са стандардном девијацијом) (Eremić-Savković и др, 2020)
- Табела 1.7** Различите вредности дозних коефицијента за израчунавање ефективне дозе (E) од излагања радону
- Табела 2.1** Период мерења у којем се добија вредност грешке
- Табела 2.2** Мерна несигурност (%) за седмичну средњу вредност при различитим концентрацијама
- Табела 2.3** Карактеристике објеката у насељима Грабовац и Рударе
- Табела 2.4** Карактеристике радних просторија
- Табела 2.5** Карактеристике вртића у Косовској Митровици и Звечану
- Табела 3.1** Три серије мерења концентрације радона угљеним канистерима
- Табела 3.2** Резултати мерења RAD7 уређајем на одређеним локацијама у ваздуху, земљишту у близини објекта и подземним водама из бунара у новембру 2019. године
- Табела 3.3** Процена радонског индекса (ризика) (Barnet и др, 2008)

**Табела 3.4** Максималне концентрације радона у затвореном простору и концентрације радона у земљишту са процентом fine фракције и проценом геогеног радонског потенцијала (Geogenic Radon Potencial-GRP)

**Табела 3.5** Минимале и максималне дневне вредности метеоролошких параметара и Пирсонови коефицијенти корелације

**Табела 3.6** Резултати и упоредне анализе из три различите студије у згради факултета пре и после реновирања

**Табела 3.7** Концентрација радона у 25 соба вртића у Косовској Митровици Звечану

**Табела 3.8** Дескриптивна статистика мерења концентрације радона у вртићима

**Табела 3.9** Специфичне активности радионуклида у стенама

**Табела 3.10** Специфичне активности радионуклида у земљишту

**Табела 4.1** Резултати мерења радона у тест кући различитим детекторима у периоду од 2010. до 2024. године

---

## *Анстракт*

---

У заштити здравља становништва пажња се посвећује мерењу радона у објектима, што представља један од првих корака у подизању свести о здравственом ризику услед излагања радону и његовим потомцима. Светска здравствена организација препоручује да концентрација радона у затвореном простору не прелази  $100 \text{ Bq m}^{-3}$ . У циљу заштите становништва од излагања радону, постоји препорука Савета Европске уније, државама чланица ЕУ, да национални референтни нивои концентрације радона у затвореном простору не прелазе  $300 \text{ Bq m}^{-3}$ . Стратегије за превенцију и смањење изложености радону у затвореном простору подразумевају свођење на ниске вредности колико је разумно могуће постићи (ALARA принцип) и укључују: креирање националних референтних нивоа за радон у затвореним просторијама и води за пиће; препоруке станарима за смањење концентрације радона у постојећим објектима уколико премашују референтне нивое; примену механичке вентилације и/или радонске мембране у комбинацији са активним или пасивним системом за одвод радона.

Најдоминантнији извори радона у затвореном простору су тло и стене богате ураном које се налазе испод објеката. Концентрација радона у просторијама углавном зависи од садржаја урана у земљишту и стенама, еманације, дифузије и ексхалације радона, порозности и пропустљивости тла, карактеристика објеката (размене ваздуха, херметичности зграде и топлотне изолације), понашања станара и метеоролошких параметара.

Предмет овог истраживања је идентификација високих концентрација радона у објектима рударског подручја „Трепча“ у околини Косовске Митровице, где су на основу ранијих истраживања забележени високи нивои концентрације радона у појединим објектима и висок садржај природних радионуклида у земљишту. Циљ истраживања је процена ефективне дозе и развој мера радијационе заштите (протокола заштите од радона) за изабрану тест кућу.

**Кључне речи:** радон, идентификација високих концентрација радона, детектори радона, енергетска ефикасност, утицај геологије, корелација са метеоролошким параметрима, процена ефективне дозе, мере радијационе заштите.

---

## *Abstract*

---

In protecting public health, attention is given to measuring radon in buildings as one of the first steps in raising awareness about health risks due to exposure to radon and its progeny. The World Health Organization recommends that indoor radon concentrations should not exceed 100 Bq m<sup>-3</sup>. To protect the population from radon exposure, the Council of the European Union recommends that EU member states set national reference levels for indoor radon concentrations not exceeding 300 Bq m<sup>-3</sup>.

Strategies for preventing and reducing indoor radon exposure aim to minimize levels as low as reasonably achievable (ALARA principle) and include: establishing national reference levels for radon in indoor air and drinking water; providing recommendations to residents on how to reduce radon concentrations in existing buildings if they exceed reference levels; by applying mechanical ventilation and/or radon membranes in combination with an active or passive ventilation system.

The most dominant sources of radon in indoor spaces are soil and rocks rich in uranium located beneath buildings. The concentration of radon in rooms mainly depends on the uranium content in the soil and rocks, radon emanation, diffusion, and exhalation, soil porosity and permeability, building characteristics (air exchange, building airtightness, and thermal insulation), occupant behavior, and meteorological parameters.

The subject of this research is the identification of high radon concentrations in buildings within the "Trepča" mining area near Kosovska Mitrovica, where previous studies recorded high radon levels in some buildings and high natural radionuclide content in the soil. The goal of the research is to assess the effective dose for occupants of residential and workspaces and to develop radiation protection measures (radon protection protocols) for a selected test house.

**Keywords:** radon, identification of high radon concentration, radon detectors, energy efficiency, geological influence, correlation with meteorological parameters, assessment of effective dose, radiation protection measures.

## САДРЖАЈ

|       |                                                                |    |
|-------|----------------------------------------------------------------|----|
| 1     | ОПШТА РАЗМАТРАЊА .....                                         | 1  |
| 1.1   | Физичко-хемијске карактеристике радона и његових потомака..... | 2  |
| 1.2   | Извори радона у природи .....                                  | 5  |
| 1.2.1 | Стене и земљиште.....                                          | 5  |
| 1.2.2 | Грађевински материјал .....                                    | 7  |
| 1.2.3 | Вода .....                                                     | 8  |
| 1.3   | Миграција радона у стенама и земљишту .....                    | 9  |
| 1.3.1 | Еманација радона.....                                          | 10 |
| 1.3.2 | Транспорт.....                                                 | 12 |
| 1.3.3 | Ексхалација радона .....                                       | 13 |
| 1.4   | Понашање радона и потомака у атмосфери .....                   | 15 |
| 1.4.1 | Утицај геогених фактора .....                                  | 17 |
| 1.4.2 | Утицај метеоролошких параметара .....                          | 18 |
| 1.4.3 | Понашање радона и његових потомака у затвореном простору.....  | 20 |
| 1.4.4 | Хоризонтална и вертикална дистрибуција радона.....             | 22 |
| 1.4.5 | Дневне и сезонске промене концентрације радона .....           | 22 |
| 1.4.6 | Енергетска ефикасност и радон.....                             | 23 |
| 1.4.7 | Проблем NORM-а и TENORM-а .....                                | 24 |
| 1.5   | Преглед истраживања радона у свету и у нашој земљи .....       | 25 |
| 1.6   | Ефективна доза од радона и потомака .....                      | 27 |
| 1.7   | Здравствени ризик од радона .....                              | 29 |
| 1.8   | Мере за ублажавање високих концентрација радона .....          | 31 |
| 1.8.1 | Природна и форсирана вентилација.....                          | 32 |
| 1.8.1 | Заптивање .....                                                | 33 |
| 1.8.2 | Мера снижавања притиска (депресуризација) .....                | 34 |
| 1.8.3 | Заштитне баријере .....                                        | 36 |
| 1.8.1 | Анти радонски премази.....                                     | 37 |
| 1.8.2 | Замена прозора, подова и постављање фасаде.....                | 37 |
| 2     | ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ДЕО .....                                      | 39 |
| 2.1   | Полазне основе, предмет и циљ истраживања.....                 | 40 |
| 2.2   | Подручје истраживања и геологија .....                         | 42 |
| 2.2.1 | Географске карактеристике места истраживања.....               | 42 |

|       |                                                                              |     |
|-------|------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 2.2.2 | Геолошке карактеристике истраживаног простора.....                           | 42  |
| 2.2.3 | Клима .....                                                                  | 44  |
| 2.2.4 | Рударски комбинат „Трепча“ .....                                             | 45  |
| 2.3   | Технике мерења примењене у дисертацији .....                                 | 47  |
| 2.3.1 | Радон детектор Airthings Corentium Home .....                                | 48  |
| 2.3.2 | Угљени канистери .....                                                       | 50  |
| 2.3.3 | RAD7 уређај .....                                                            | 52  |
| 2.3.4 | Мерење јачине амбијенталног дозног еквивалента .....                         | 55  |
| 2.3.5 | Гамаспекрометријска метода одређивања садржаја радионуклида .....            | 56  |
| 2.4   | Методологија истраживања .....                                               | 57  |
| 2.4.1 | Карактеристике испитиваних објеката .....                                    | 59  |
| 3     | РЕЗУЛТАТИ МЕРЕЊА И ДИСКУСИЈА.....                                            | 67  |
| 3.1   | Идентификација високих концентрација радона у објектима .....                | 68  |
| 3.1.1 | Резултати пасивне радонске технике .....                                     | 68  |
| 3.1.2 | Резултати активне радонске технике.....                                      | 70  |
| 3.1.3 | Процена геогеног потенцијала.....                                            | 71  |
| 3.2   | Мерење концентрације радона у тест кући испитиваног рударског подручја ..... | 72  |
| 3.2.1 | Утицај метеоролошких параметара на концентрацију радона у тест кући.....     | 74  |
| 3.2.2 | Годишње мерење концентрације радона.....                                     | 75  |
| 3.3   | Мерење концентрације радона у радним просторијама.....                       | 77  |
| 3.4   | Концентрација радона у вртићима рударске области .....                       | 82  |
| 3.5   | Јачина гама дозе у испитиваним објектима.....                                | 86  |
| 3.6   | Гама спектрометријска мерења радионуклида у стенама и земљишту .....         | 86  |
| 3.7   | Процена ефективне дозе.....                                                  | 87  |
| 4     | МЕРЕ РАДИЈАЦИОНЕ ЗАШТИТЕ.....                                                | 89  |
| 4.1   | Анализа високих концентрација радона у тест кући.....                        | 90  |
| 4.2   | Мере санације спроведене на кући .....                                       | 92  |
| 4.3   | Примена техничких мера у циљу радијационе заштите .....                      | 95  |
|       | ПРИЛОГ .....                                                                 | 99  |
| 5     | ЗАКЉУЧАК .....                                                               | 100 |
| 6     | ЛИТЕРАТУРА.....                                                              | 103 |
|       | Биографија .....                                                             | 120 |

# 1 ОПШТА РАЗМАТРАЊА



## 1.1 Физичко-хемијске карактеристике радона и његових потомака

Давне 1900. године немачки научник Фридрих Ернст Дорн открио је гас радон  $^{222}\text{Rn}$ , проучавајући радијум  $^{226}\text{Ra}$ . Рамсеј му даје име „нитон“ изведено од латинске речи *nitens* (сијати), због особине да на температурама испод тачке топљења емитује светлост, тј. исијава. Та боја мења се од жуте до наранџасте како се температура смањује (Wilkening, 1990). Прву детекцију у ваздуху извршили су Елстер и Гејтел 1901. године (Cook, 1961). Од 1923. године носи име које и данас има.

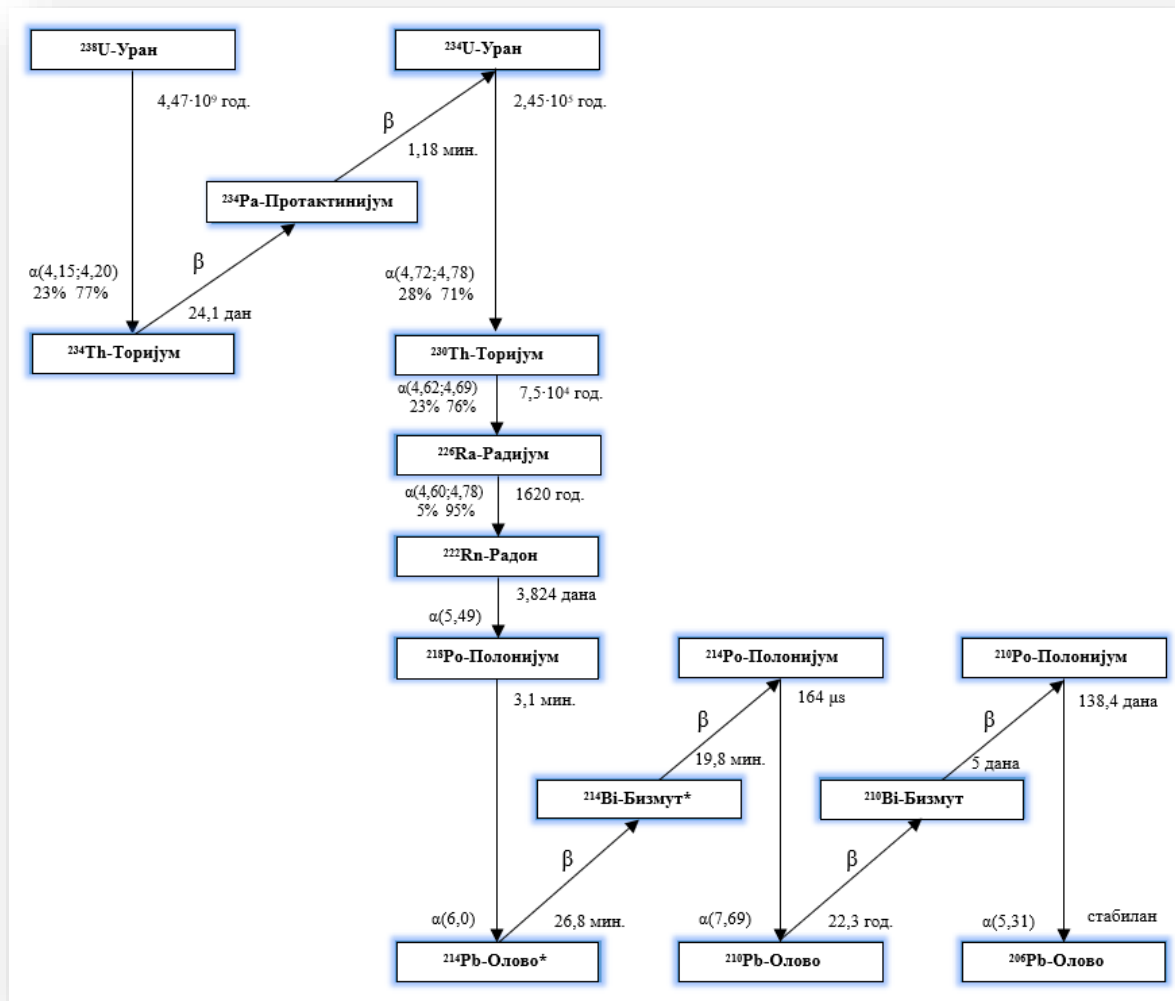
Радон је гас без боје, мириса и укуса. По много чему је јединствен: то је једини племенити радиоактивни гас и најтежи гас у природи при стандардним условима (скоро 8 пута тежи од ваздуха). Радон спада у VIIIA групу периодног система елемената, најмасивнији је племенити гас чији се атом састоји од 86 протона и 136 неутрона. Електронска конфигурација радона је  $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2 3d^{10} 4p^6 5s^2 4d^{10} 5p^6 6s^2 4f^{14} 5d^{10} 6p^6$ , електрони у спољашњој љусци су чврсто везани па је енергија јонизације висока и износи  $10,75 \text{ eV}$  ( $1037 \text{ kJ mol}^{-1}$ ). Хемијски је скоро у потпуности инертан, али се ипак сматра да реагује са кисеоником (O) и флуором (F). Његова растворљивост у води је веома висока и смањује се са порастом температуре (Durani и Ilić, 1997). Густина радона на  $0^\circ \text{C}$  је  $0,00973 \text{ g cm}^{-3}$ , температура топљења  $-71^\circ \text{C}$ , температура кључања  $-61,8^\circ \text{C}$ , а критична температура износи  $104,4^\circ \text{C}$ , док је критични притисак  $63,2 \cdot 10^5 \text{ Pa}$  (Vikit и др, 2012).

Радон се у природи среће као члан три радиоактивна низа (серије) којима припада већина радионуклида на Земљи са редним бројем већим од 82. То су: уран-радијумски, са родоначелником низа, ураном  $^{238}\text{U}$ ; уран-актинијумски, са родоначелником низа  $^{235}\text{U}$  и торијумски низ од изотопа прародитеља торијума  $^{232}\text{Th}$ . Сва три елемента су примордијални радионуклиди, који се карактеришу јако дугим временом полураспада, па су стога и данас присутни и још увек траје процес њиховог распада. Низови се међу собом разликују по масеном броју, а заједничке карактеристике су им: појава гранања низа, услед могућности да радионуклиди могу да се распадну  $\alpha$  или  $\beta$  распадом са одговарајућом вероватноћом; друга заједничка карактеристика је да сва три низа садрже изотоп инертног гаса радона који у већој или мањој мери еманира са места у коме се генерише.

У природи се јављају три изотопа радона:

- $^{222}\text{Rn}$ -познатији као **радон**, појављује се у низу урана  $^{238}\text{U}$ ; његово време полураспада је најдуже у односу на остала два изотопа и износи 3,824 дана; најзначајнији је и најдетектабилнији радонов изотоп (Слика 1.1);
- $^{220}\text{Rn}$ -познатији као **торон**, појављује се у низу  $^{232}\text{Th}$ , време полураспада му је 55,6 s, и због тога прелази много мање растојање од извора до места распада, па га је теже детектовати (Слика 1.2);
- $^{219}\text{Rn}$ -са називом **актинон**, јавља се у низу урана  $^{235}\text{U}$ , са најкраћим временом полураспада од 3,96 s; веома је слабо заступљен у природи, те је његов удео у озрачивању незнатан.

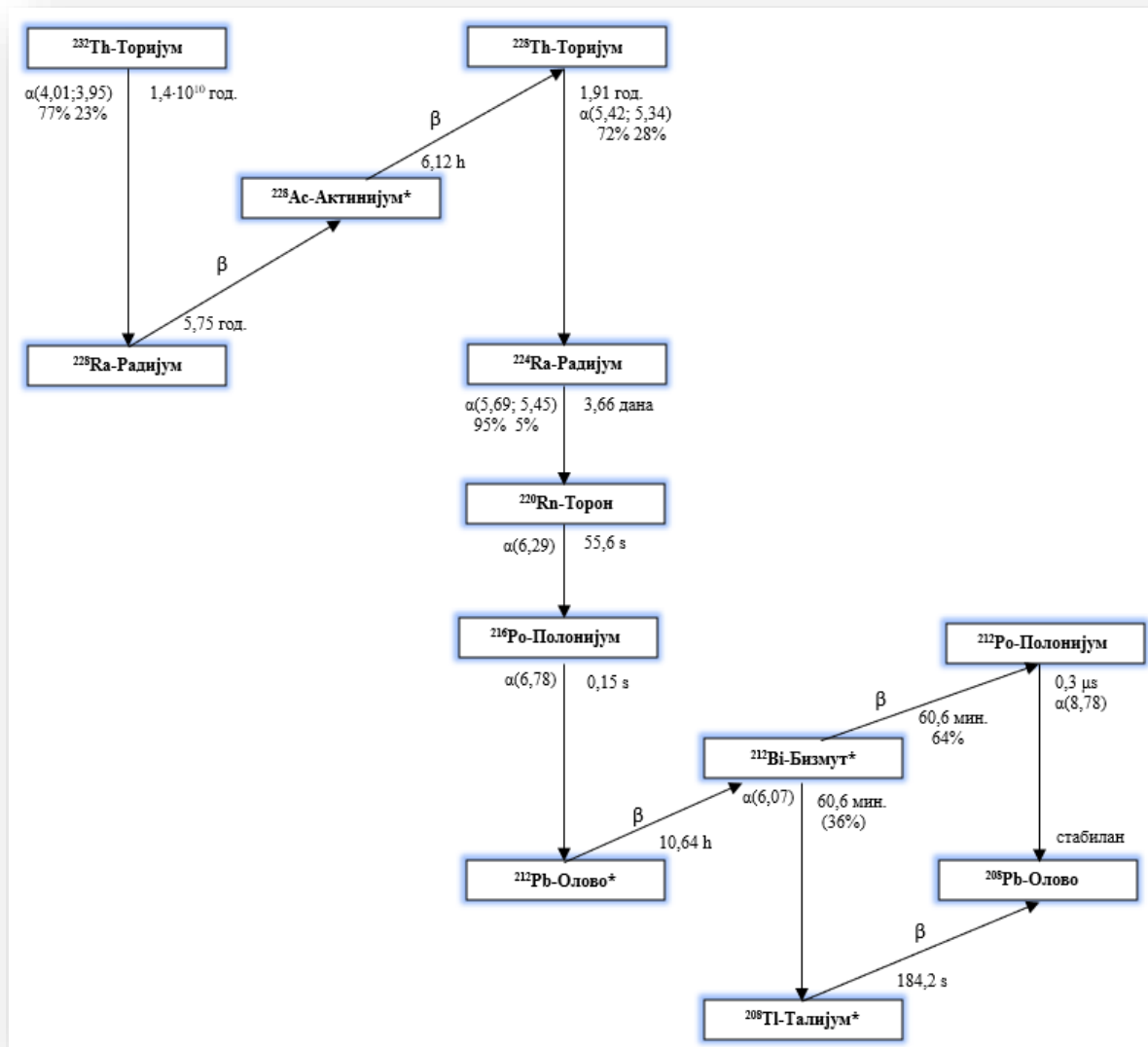
Може се произвести још двадесетак изотопа радона, али ниједан од њих не потиче из данашњих природних процеса. На Сликама 1.1 и 1.2 дати су радиоактивни низови урана  $^{238}\text{U}$  и торијума  $^{232}\text{Th}$  где укосо на десно горе померање представља емисију електрона ( $\beta$ -распад) која повећава атомски број за 1, али не мења атомску масу; вертикално померање је емисија  $\text{He}^{2+}$  ( $\alpha$ -распад), која смањује атомски број за 2 и атомску масу за 4.



Слика 1.1 Радиоактивни низ урана ( $^{238}\text{U}$ ), (\*) означава да је радионуклид интензиван гама емитер

У сваком радиоактивном низу, изотоп радона је резултат алфа распада радијума; стога се може закључити да је производња радона пропорционална садржају радијума присутног у земљи. У кондензованим чврстим материјама се налази прародитељски радионуклид радијум,  $^{222}\text{Rn}$  и  $^{219}\text{Rn}$  се производе тамо где се налази уран, а  $^{220}\text{Rn}$  тамо где је торијум. Међутим, и овде постоји изузетак, па се место где је радон растворен, транспортован и поново накупљен може налазити далеко од првобитног извора урана (Levinson и Coetzee, 1978).

Релативни значај три изотопа радона расте са њиховим средњим животом и релативним заступљеношћу.  $^{219}\text{Rn}$  најкраће живи и практично се увек производи у много мањим количинама од  $^{222}\text{Rn}$ , пошто природни однос активности радиоизотопа  $^{235}\text{U}$  и  $^{238}\text{U}$  износи 0,00719. Стога се  $^{219}\text{Rn}$  углавном игнорише.  $^{220}\text{Rn}$  је такође кратког века у односу на  $^{222}\text{Rn}$  и због тога се у ваздуху помера на много мању удаљеност од свог извора.



Слика 1.2 Радиоактивни низ торијума ( $^{232}\text{Th}$ ), (\*) означава да је радионуклид интензиван гама емитер

Током средњег времена живота прорачунате дифузионе дужине у ваздуху износе 2,2 m за  $^{222}\text{Rn}$  и 0,029 m за  $^{220}\text{Rn}$  (Durrani и Ilić, 1997). У околностима у којима се траже сигнали из релативно удаљених ресурса или процеса у земљи,  $^{222}\text{Rn}$  је далеко доминантнији нуклид, а  $^{220}\text{Rn}$  се током детекције искључује. Међутим, у затвореном простору, због емисије алфа честица високих енергија све већа пажња се посвећује и торону.

Већина студија које проучавају торон показале су да торон у затвореном простору потиче углавном од грађевинског материјала и да његова концентрација експоненцијално опада са растојањем од површине зида. Међутим, услед дужег периода полураспада, тороновни потомци  $^{212}\text{Pb}$  и  $^{212}\text{Bi}$  имају хомогену просторну дистрибуцију и њихово удисање може значајно допринети бронхијалној дози (Forčarić и др, 2019).

Као што се може видети са Слика 1.1 и 1.2, алфа распадом радона  $^{222}\text{Rn}$  настаје изотоп полонијума  $^{218}\text{Po}$ , чија алфа честица носи енергију од 5,49 MeV. Настали полонијум има кратак период полураспада од 3,05 минута, а затим се алфа распадом трансформише у нестабилни изотоп  $^{214}\text{Pb}$ , а емитована алфа честица има енергију од 6,0 MeV-а.  $^{214}\text{Pb}$  има период полураспада од 26,8 минута, налази се у чврстом агрегатном стању и распада се емисијом бета честице и гама зрака на  $^{214}\text{Bi}$ , који је такође у чврстом агрегатном стању емитује бета честицу и има период полураспада од 19,8 минута. Даље његовим распадом настаје  $^{214}\text{Po}$  који у овом ланцу има најкраћи период полураспада од свега 164  $\mu\text{s}$ , алфа је емитер са енергијом алфа честице од 7,69 MeV-а. Распада се на нестабилни дугоживећи изотоп олова  $^{210}\text{Pb}$  са периодом полураспада од 22,3 године. Што се тиче торона  $^{220}\text{Rn}$ , ситуација је нешто другачија. Он се практично заједно распада са својим првим краткоживећим потомком  $^{216}\text{Po}$  (време полураспада 0,15 s).

## 1.2 Извори радона у природи

### 1.2.1 Стене и земљиште

Генерално, доминантни извори радона су тло и стене дубоко у земљи који су богати ураном. Стога, концентрација радона, углавном зависи од садржаја урана и радијума у стенама и земљишту. Постоји много врста стена које садрже уран, ако су на дубини већој од 100 метара, да би биле значајан извор радона неопходно је да концентрација урана у њима буде преко 50 ppm (1 ppm =  $12,35 \text{ Bq kg}^{-1}$ ) (Jonson, 1991). Због геохемијских процеса садржај радијума у земљишту испод и око објекта доминантно утиче на концентрацију радона у објектима (Forkarić и др, 2017).

Природни радионуклиди,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и  $^{40}\text{K}$ , налазе се у свим стенама Земљине коре: магматским, седиментним и метаморфним, са највећим присуством у периферном делу литосфере, у гранитној љусци, на дубини од 10-15 km (Smislov, 1974). Због великог удела глиновитих минерала, као и органског материјала, највећу радиоактивност показују шкриљци (Grahovac, 1986), а најмањи садржај радионуклида имају карбонатне стене: кречњак, доломит, камена со (Vesić 1987; NCRP, 1987). Глина и глинени шкриљци имају већу концентрацију урана и радијума од осталих седиментних стена, јер се добро адсорбују на аморфним телима. Примери седиментних стена са релативно високим концентрацијама урана су неке врсте црног глинца (тј. глинени шкриљац у Шведској и Норвешкој и Катанга глинац у САД) и седиментне фосфатне насlage у Мароку, Јордану и Флориди. Међу седиментним минералима најмање радиоактивне су чисте органске и хемијске насlage (камена со, гипс, анхидрит, доломит, чисти кварц, кварцни песак и различити облици силицијума (Pertsov, 1964).

У Табели 1.1 приказана је концентрација активности  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и  $^{40}\text{K}$  (у  $\text{Bq kg}^{-1}$ ) у неким основним типовима стена. Одговарајући масени удео елемента у стени добија се конверзијом: 1% K ( $10^{-2} \text{ g K l}^{-1} \text{ g}$  стенског материјала) =  $313 \text{ Bq kg}^{-1}$   $^{40}\text{K}$ , 1 ppm U ( $10^{-6} \text{ g U / 1 g}$  стенске масе) =  $12,35 \text{ Bq kg}^{-1}$   $^{238}\text{U}$  (или  $^{226}\text{Ra}$ ), 1 ppm Th =  $4,06 \text{ Bq kg}^{-1}$   $^{232}\text{Th}$  (IAEA, 1989). У свету постоје региони са повишеним концентрацијама радионуклида у стенама и земљишту (у Бразилу, Кини, Египту, Ирану, Индији, Француској, Италији и Швајцарској), које се манифестују високим апсорбованим дозама у ваздуху (UNSCEAR, 2000).

У неколико студија је проучавана емисија из радиоактивних извора коришћењем односа радона и торона (Giamanco и др, 2007; Yang и др, 2005). Закључак је, да ако је ниво радона висок, а ниво торона низак, онда је извор радона дубок, док нижа концентрација радона са високом активношћу торона указује на плитак извор радона. Висок однос радона према торону сугерише да је радон доспео на површину из дубоких извора ношен другим гасовима услед промена напрезања/деформације земљине коре. Опет, низак однос радон-торон сугерише на миграцију радона из плитког извора услед микро ломљења пре умерених земљотреса (Yang и др, 2005).

**Табела 1.1** Средња вредност и опсег концентрације активности  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и  $^{40}\text{K}$  у типичним стенама (EPA, 1993; NCRP, 1987)

| Тип стене                      | Активност ( $\text{Bq kg}^{-1}$ ) |                   |                 |
|--------------------------------|-----------------------------------|-------------------|-----------------|
|                                | $^{238}\text{U}$                  | $^{232}\text{Th}$ | $^{40}\text{K}$ |
| <b>Магматске стене</b>         |                                   |                   |                 |
| Базне                          | 7                                 | 7                 | 70 – 400        |
| Киселе                         | 50                                | 60                | 1100 – 1500     |
| Базалт – средњи састав         | 7 – 10                            | 10 – 15           | 300             |
| Гранит – средњи састав         | 40                                | 70                | >1000           |
| <b>Седиментне стене</b>        |                                   |                   |                 |
| Шкриљци                        | 40                                | 50                | 800             |
| Пешчари                        |                                   |                   |                 |
| Кварцни чисти                  | <10                               | <8                | <300            |
| Кварцни прљави                 | 40                                | 10 – 25           | 400             |
| Аркоза                         | 10 – 25                           | <8                | 600 – 900       |
| Песак са плажа                 | 40                                | 25                | <300            |
| Карбонати                      | 25                                | 8                 | 70              |
| <b>Метаморфне стене</b>        |                                   |                   |                 |
| Мермер                         | 20 – 30                           | 20                | 40 – 200        |
| <b>Све стене</b>               |                                   |                   |                 |
| Опсег                          | 7 – 60                            | 7 – 80            | 700 – 1500      |
| Земљина кора – средња вредност | 36                                | 44                | 850             |

Просечне вредности природних радионуклида  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и  $^{40}\text{K}$  у земљишту у свету износе: 33, 45 и  $420 \text{ Bq kg}^{-1}$ , респективно (UNSCEAR, 2000); за неке земље и регионе вредности су приказане у Табели 1.2 различити нивои природне радиоактивности условљени су геолошким и географским карактеристикама сваког региона, а природну радиоактивност терестричног типа карактеришу састав стена и земљишта. У нашој земљи више аутора се бавило мерењем радиоактивности земљишта појединих региона. На подручју наше северне аутономне покрајине Војводине измерене су следеће средње вредности специфичних активности  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и  $^{40}\text{K}$ : 39; 53 и  $554 \text{ Bq kg}^{-1}$  (Bikit и др, 2005). Средње концентрације  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и  $^{40}\text{K}$  у површинском слоју земљишта са 213 локација у Републици Србији износиле су 32,8; 37,8 и  $550 \text{ Bq kg}^{-1}$  (Dragović и др, 2014). У земљишту на Косову и Метохији специфичне активности  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и  $^{40}\text{K}$  су редом: 33; 35 и  $608 \text{ Bq kg}^{-1}$  (Gulan, 2014). За регион Косовске Митровице аутори су известили да је расподела радионуклида дифузна (неуниформна) и да се специфичне активности  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и  $^{40}\text{K}$

крећу у опсегу: 21,2-91,1 Bq kg<sup>-1</sup>, 20,3-103,8 Bq kg<sup>-1</sup> и 365,1-1148,7 Bq kg<sup>-1</sup>, респективно (Gulan и др, 2013).

**Табела 1.2** Средња вредност и опсег специфичне активности <sup>238</sup>U, <sup>232</sup>Th и <sup>40</sup>K у земљишту у неким земљама и регионима у свету према подацима (UNSCEAR, 2000)

| Земља /регион                | Активност (Bq kg <sup>-1</sup> ) |                   |                   |                 |
|------------------------------|----------------------------------|-------------------|-------------------|-----------------|
|                              | <sup>238</sup> U                 | <sup>226</sup> Ra | <sup>232</sup> Th | <sup>40</sup> K |
| Руска Федерација/И.Европа    | 19 (0-67)                        | 27 (1-76)         | 30 (2-79)         | 520 (100-1400)  |
| САД/Северна Америка          | 35(4-140)                        | 40 (8-160)        | 35 (4-130)        | 370 (100-700)   |
| Кина/Источна Азија           | 33 (2-690)                       | 32 (2-440)        | 41 (1-360)        | 440 (9-1800)    |
| Јапан/Источна Азија          | 29 (2-59)                        | 33 (6-98)         | 28 (2-88)         | 310 (15-990)    |
| Норвешка/Северна Европа      | 50                               | 50                | 45                | 850             |
| Пољска/Источна Европа        | 26 (5-120)                       | 26 (5-120)        | 21 (4-77)         | 410 (110-970)   |
| Румунија/Источна Европа      | 32 (8-60)                        | 32 (8-60)         | 38 (11-75)        | 490 (250-1100)  |
| Ирска/Западна Европа         | 37 (8-120)                       | 60 (100-200)      | 26 (3-60)         | 350 (40-800)    |
| Немачка/Западна Европа       | (11-330)                         | (5-200)           | (7-134)           | (40-1340)       |
| Мађарска/Источна Европа      | 29 (12-66)                       | 33 (14-76)        | 28 (12-45)        | 370 (79-570)    |
| Бугарска/Источна Европа      | 40 (8-190)                       | 45 (12-210)       | 30 (7-160)        | 400 (40-800)    |
| Шпанија/Јужна Европа         | -                                | 32 (6-250)        | 33 (2-210)        | 470 (25-1650)   |
| Албанија/Јужна Европа        | 23 (6-96)                        | -                 | 24 (4-160)        | 360 (15-1150)   |
| Грчка/Јужна Европа           | 25 (1-240)                       | 25 (1-240)        | 21 (1-190)        | 360 (12-1570)   |
| Северна Македонија/Ј.Европа* | 36,9 (11,5-92,7)                 | 23,4 (0-31,7)     | 25 (19,8-37,9)    | 456 (0-699)     |

## 1.2.2 Грађевински материјал

Други значајан извор радона је грађевински материјал, нарочито у затвореном простору. Он се може наћи у природи и може се користити као непрерађена сировина или се мануфактурном или индустријском производњом добија као полупрерађени материјал за најширу примену у грађевинарству као што су бетон, цигла, гас бетон (структурни материјали), као и грађевинска керамика и керамичке плочице (прекривни материјали). Ту су и везивни материјали добијени посебним технолошким поступцима: гипс, цемент, креч, смола који се користе за прављење маса са везивном и прекривном функцијом (малтер).

Сматра се да готово сви грађевински материјали у некој мери садрже <sup>238</sup>U и друге природне радионуклиде, у зависности од тога где су експлоатисани, од геолошког састава саме локације као и од технолошких процеса њихове обраде. Високе концентрације активности <sup>226</sup>Ra и <sup>224</sup>Ra у грађевинским материјалима представљају ризик за људе због удисања потомака радона (<sup>222</sup>Rn и <sup>220</sup>Rn) и због пропратног гама зрачења. Ексклација радона (дефинисана ниже у тексту) из грађевинских материјала не зависи само од садржаја радијума, већ и од фактора као што су фракција произведеног радона који се ослобађа из материјала, порозност материјала, припрема површине и завршна обрада зида. Грађевински материјали, који као нуспроизвод садрже гипс и бетон са садржајем шкриљаца могу имати високу концентрацију радијума, као и вулкански туф и пуцолан (вулкански пепео), где садржај радијума и торијума може достићи стотине Bq kg<sup>-1</sup> (Borgoni и др, 2014). Просечне концентрације активности <sup>226</sup>Ra, <sup>232</sup>Th и <sup>40</sup>K за грађевинске материјале широм света су 50 Bq kg<sup>-1</sup>, 50 Bq kg<sup>-1</sup> и 500 Bq kg<sup>-1</sup>, респективно (UNSCEAR, 1993; 2000), а њихов садржај у појединим врстама грађевинских материјала у нашој земљи дат је у Табели 1.3.

Употреба гранита и сипорекса се не препоручује за куће са лошом вентилацијом (подрум и просторије без прозора), због могућности да унутрашња концентрација радона превазиђе  $300 \text{ Bq m}^{-3}$  (Kuzmanović и др, 2020a). У студији коју су 2015. године спровели Стајић и Никезић на 15 узорак најчешће коришћених грађевинских материјала у Србији, највећа брзина површинске ексхалације радона измерена је у узорку камена за поплочавање (калдрма) ( $855 \text{ mBq m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ), а највећа брзина масене ексхалације процењена је за један од два узорка цемента ( $11,4 \text{ mBq kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$ ) (Stajic и Nikezic, 2015). Ранија истраживања концентрација природних радионуклида у грађевинским материјалима увезеним из иностранства као и домаће производње, показала су навећу концентрацију  $^{40}\text{K}$  ( $986 \text{ Bq kg}^{-1}$ ) у мермеру и  $^{226}\text{Ra}$  ( $174 \text{ Bq kg}^{-1}$ ) у керамици из Грчке и  $^{232}\text{Th}$  ( $188 \text{ Bq kg}^{-1}$ ) у гипсу из Македоније; у појединим домаћим грађевинским материјалима активносне концентрације  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и  $^{40}\text{K}$  кретале су се у опсегу 4,8–79; 5,1–71 и 9,2–1049  $\text{Bq kg}^{-1}$ , респективно (Krstić и др, 2007).

**Табела 1.3** Средња вредност (опсег) концентрација активности  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и  $^{40}\text{K}$  у грађевинским материјалима који се производе у Србији (Kuzmanović и др, 2020a)

| Врста                    | Активност грађевинског материјала ( $\text{Bq kg}^{-1}$ ) |                   |                  |
|--------------------------|-----------------------------------------------------------|-------------------|------------------|
|                          | $^{226}\text{Ra}$                                         | $^{232}\text{Th}$ | $^{40}\text{K}$  |
| <b>Бетон</b>             | 17,4 (7,2-29,8)                                           | 21,3 (11,2-41,0)  | 253 (160-410)    |
| <b>Малтер</b>            | 21,2(7,1-34)                                              | 25,1 (12-48)      | 218 (165-318)    |
| <b>Глинена цигла</b>     | 45 (36-55)                                                | 49 (35-58)        | 646 (548-790)    |
| <b>Гранит</b>            | 200 (75-325)                                              | 77 (68-85)        | 1280 (1170-1390) |
| <b>Сипорекс</b>          | 82 (53-135)                                               | 58 (32-102)       | 782 (313-1880)   |
| <b>Керамичке плочице</b> | 67 (56-91)                                                | 61 (45-72)        | 828 (740-1060)   |
| <b>Бетонске плочице</b>  | 30 (21-39)                                                | 18,2 (5,3-31)     | 255 (56-453)     |
| <b>Цреп</b>              | 51 (48-56)                                                | 64 (54-78)        | 705 (652-752)    |

За контролу специфичне активности  $^{226}\text{Ra}$  у грађевинским материјалима зграда које су већ у употреби, предлаже се *in situ* метода (гамаспектрометријска метода) са фиксном геометријом положаја детектора у просторији. Развијена метода је верификована за просторије у савременим вишеспратним енергетски ефикасним зградама. Развијеном методом могу се мерити и концентрације  $^{232}\text{Th}$  и  $^{40}\text{K}$  у грађевинским материјалима који доприносе излагања зрачењу у затвореном простору (Yarmoshenko и др, 2021).

### 1.2.3 Вода

Један од мање важних, али не и занемарљивих, извора радона у затвореном простору је вода из градске мреже водоснабдевања као и природни извори, бунари. Обично је допринос из водовода веома мали, јер вода путује на велике удаљености од станица за пречишћавање воде до кућа и већим делом радон се распада дуж пута. Радон се из воде у градским водоводима углавном губи и при процесима пречишћавања и обраде (нпр. при процесу аерације). Важнији допринос концентрацији радона у затвореном простору дају куће са приватним бунарима; то су практично затворени системи, радон прође знатно мање растојање од воде у бунару до водоводних цеви у становима.

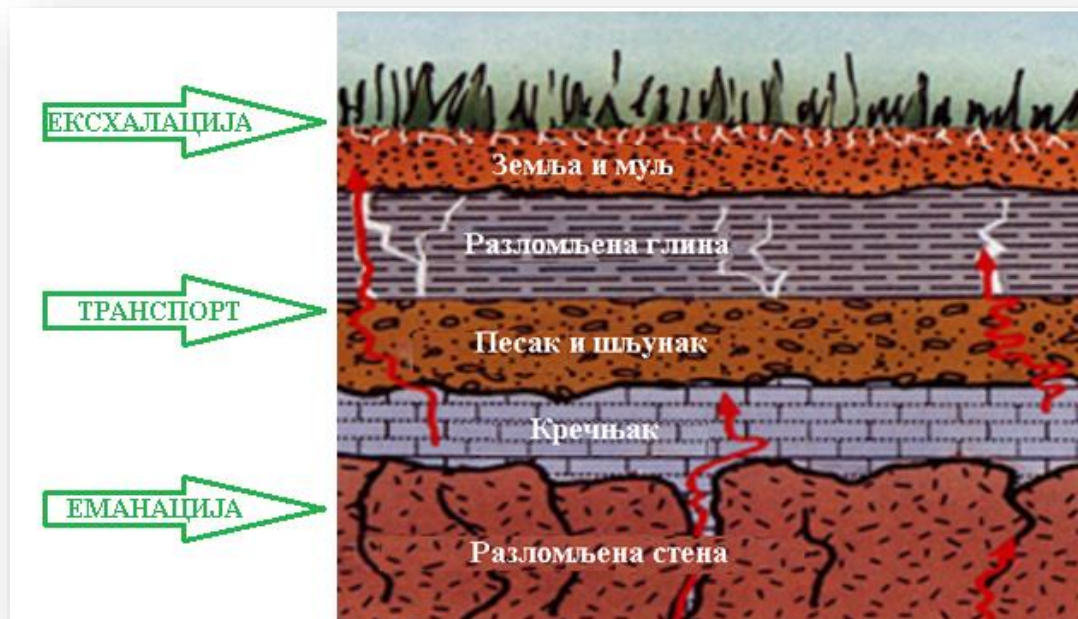
Свега око 1% изложености радону долази из извора питке воде: највећи део овог излагања потиче од инхалације радона који се ослободи услед разних активности из текуће воде (када она истиче под притиском и ствара мехуриће) дајући највећи допринос у случају туширања, кувања, прања судова, док 0,1% изложености потиче од ингестије радона из воде за пиће, при чему већи део дозе зрачења прима желудац (Radolić и др, 2006). Ипак је необично то што унос воде богате радоном није главни проблем, чак и у случају када су нивои високи због тога што се услед термичке обраде највећи део радона губи. Већи ризик представља удисање радона ослобођеног из воде која се користи за купање јер се ту користи већа количина воде (Рајин и др, 1985). Еколошка студија публикована 1993. године спроведене у Мејну (САД), анализирао је утицај радона из воде на туморе мозга, и није пронађена никаква повезаност (Hess и др, 1983).

У случају концентрације радона у води од  $1000 \text{ Bq l}^{-1}$ , употребом такве воде може доћи до повећања концентрације радона у затвореном за  $100 \text{ Bq m}^{-3}$ . Приликом третирања воде у просторијама јавних водовода, може доћи до ослобађања и нагомилавања радона; у Шведској је измерена концентрација радона од  $20000 \text{ Bq m}^{-3}$  (Kulich и др, 1988). Дозвољена горња граница радона у подземној води која се користи за пиће је  $100 \text{ Bq l}^{-1}$  (WHO, 2011), док Агенција за заштиту животне средине САД препоручује да горња граница концентрације радона у води за пиће буде  $11,1 \text{ Bq l}^{-1}$  (USEPA, 1999). На простору северног дела Косова и Метохије вредности радона у истраживаним изворима воде, која се користи за пиће крећу се од  $1,6 \pm 0,5$  до  $46,3 \pm 6,3 \text{ Bq l}^{-1}$  (средња вредност  $12 \text{ Bq l}^{-1}$ ), што је далеко испод горње границе (Vučković и др, 2023). Према Правилнику републике Србије, садржај радона у води за пиће износи  $100 \text{ Bq l}^{-1}$  (Službeni Glasnik RS, 2018).

### 1.3 Миграција радона у стенама и земљишту

За разлику од својих предака, урана и радијума, који су у чврстом стању и везани у кристалним решеткама носећег материјала, радон је гас, и самим тим врло покретљив. Најмања пукотина у суседној стени је довољна да се „заробљени“ радон отпусти. Може да продире кроз тло и да се креће даље ка површини. Радон се лакше креће кроз пропусна земљишта, као што су крупни песак и шљунак, него кроз непропусна тла, као што је глина. Уколико глина садржи пукотине, радон ће несметано пролазити и кроз тај слој (Слика 1.3).

Процеси еманације, транспорта и екshalације условљавају миграцију радона из стена/земљишта до атмосфере. Еманација је процес у коме се атоми радона ослобађају из зрна земљишта или стена у запремину пора. Радон је веома мобилан у земљи, али мали део еманира из свог места порекла у поре испуњене ваздухом у стенама. Након што еманира из минералних зрна радон даље може да мигрира у неком медијуму кретањем атома и то са тенденцијом опадања градијента концентрације (дифузијом) кроз поре и шупљине у земљишту, при чему се везује за ваздух или воду док је у земљи. Радон се до површине транспортује и конвективним и адвективним кретањима. Процес конвекције ће повећати кретање течности кроз поре у земљишту што ће дати више могућности за транспортни механизам земног гаса радона. Конвекцијом, радон се преноси на велике удаљености јер бива ношен током гасова из околине као што су  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$ . Дифузија је важна само у капиларама или стенама са малим порима; адвекција може преузети кључну улогу у већим порима или у разломљеним структурама (Somlai и др, 2006).



Слика 1.3 Шематски приказ проласка радона кроз земљиште

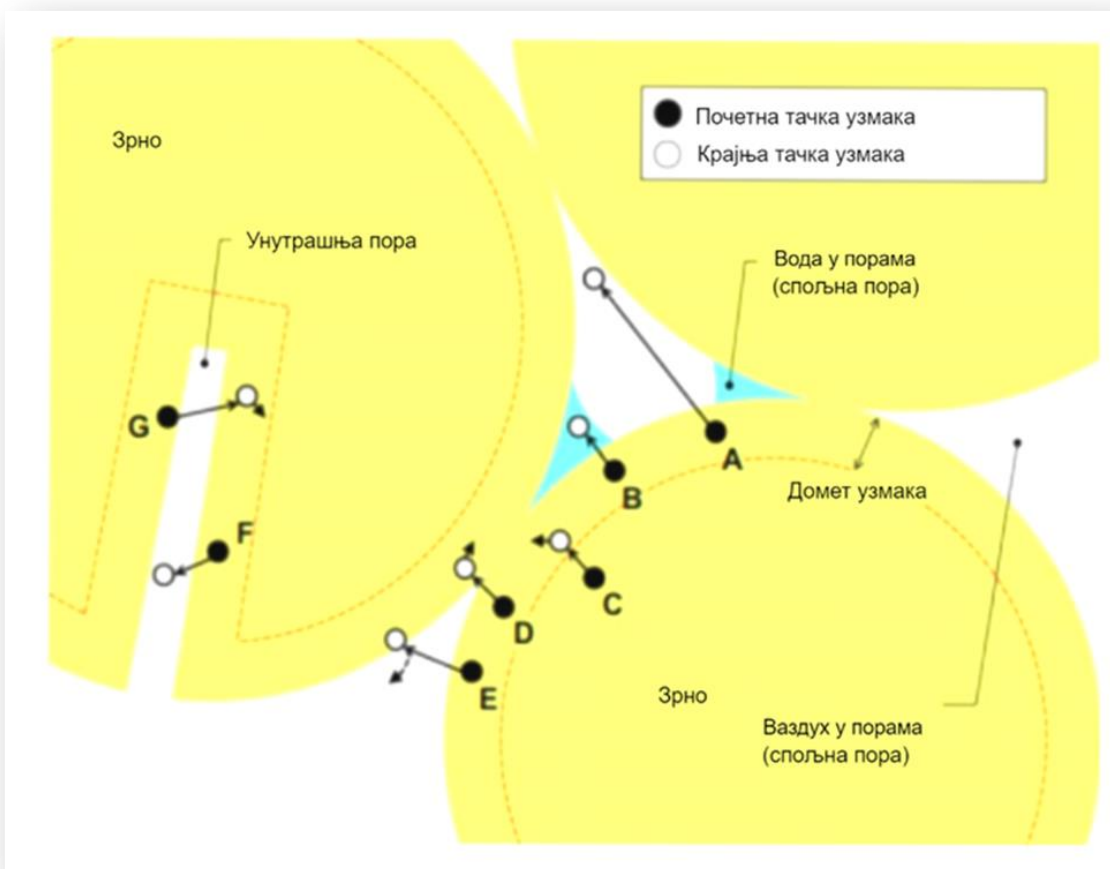
### 1.3.1 Еманација радона

Атом радона настаје распадом атома радијума унутар чврстог зрна у земљишту или стени. Распадом атома радијума истовремено настаје атом радона, и алфа честица. Свака честица (атом и алфа честица) носи део расположиве енергије обрнуто пропорционалан њиховој маси. Због очувања импулса, алфа честица и атом радона се крећу у супротним смеровима. Атом радона се креће у свом правцу све док се његова енергија не пренесе на околну средину. Узмак радона је неколико десетина нанометара у већини чврстих материјала, што му омогућава да доспе у поре материјала и затим дифузијом дође до атмосфере. Може да путује 20-70 nm у уобичајеним минералима, 100 nm у води и 63  $\mu\text{m}$  у ваздуху; ово растојање се назива домет узмака радона (Nazaroff, 1992). Домет узмакнутог атома радона варира у зависности од састава средине. Када се гас радон генерише у чврстом зрну, он може имати три могућности за еманацију:

- може остати уграђен у исто зрно,
- може изаћи из зрна у којем је створен и проћи кроз простор пора и уградити се у суседно зрно, или
- може бити избачен у простор пора и зауставити се.

Ако је у простору пора била течност, атоми радона би се могли тамо зауставити што ће повећати коефицијент еманације (о чему ће бити речи касније). Атом радона заустављен у суседном зрну (Слика 1.4) опет може дифузијом да мигрира у простор пора, док је његова путања још у флуиду (Tanner, 1980). Однос количине радона који улази у поре између зрнаца у односу на количину генерисаног радона назива се коефицијент еманације (Hassan и др, 2011). То је бездимензиони параметар, и може бити представљен било као фракција или као

проценат. Проценат атома радона који се ослободи у поре се назива коефицијент еманације и креће се од 5% до 70% за већину типова стена и земљишта (UNSCEAR, 2000).



**Слика 1.4** Шематски приказ феномена еманације радона. Еманација (A), (B) и (F). Нема еманације: (C), (D) и (G). Ако радон не може да дифундује из унутрашње пору у спољашње, у тачки (E) га не треба сматрати еманираним. Стрелице, које прате крајње тачке узмака представљају процес дифузије, нису сразмерне (Sakoda и др, 2011).

Постоји много метода и мерних техника за одређивање коефицијента еманације радона из материјала. Заједничко за све њих је да зависе од мерења максималне концентрације радона из узорка у затвореном простору, односно мерења концентрације радона у затвореном простору након постизања радиоактивне секуларне равнотеже између радона и радијума. Фактори који утичу на еманацију радона из материјала су: расподела радијума у зрнима, величина и облик зрна, садржај воде, температура, атмосферски притисак, величина спољашњих пора, величина унутрашњих пора, радијациона оштећења, густина паковања (кристална структура и елементи). Ови фактори у основи контролишу узмак и дифузиону дужину радона у зрну и његово заустављање узмаком у порима. Пре свега, просторна расподела радијума у зрнима је најважнија за одређивање почетне тачке алфа узмака радона (Sakoda и др, 2011).

Величина и облик зрна су два важна фактора који контролишу еманаацију радона у земљишту. Они одређују колико је радијума довољно близу површине зрна да омогући радону да побегне у поре. Генерално, фактор еманације радона је обрнуто пропорционалан величини зрна. Влажност земљишта (испуњеност пора водом) значајно утиче на коефицијент еманације-зауоставна моћ воде у порама за узмакнуте атоме радона је знатно већа од исте у ваздуху-што повећава вероватноћу да атоми радона остану у порама (UNSCEAR, 2000). Измерене вредности коефицијента еманације радона многих узорака земљишта, стена и грађевинских материјала из разних земаља света дати су у Табели 1.4. Коефицијент еманације варира међу различитим узорцима због разлике у методологији експерименталног истраживања; зато ови подаци нису лако упоредиви, али као такви могу бити добри индикатори неких очекиваних вредности на терену.

**Табела 1.4** Коефицијент еманације радона у земљишту, стенама и грађевинском материјалу (опсег/средња вредност)

| Материјали                   | Земља порекла         | Коефицијент еманације (%) | Референца             |
|------------------------------|-----------------------|---------------------------|-----------------------|
| <b>Грађевински материјал</b> | Аустрија              | 0,50-30                   | Bossew, 2003          |
| <b>Бетон</b>                 | Аустрија, Бад Гаштајн | 2,1                       | Sakoda и др, 2008     |
| <b>Земља</b>                 | Словенија             | 14±3,0                    | Brajnik и др, 1992    |
| <b>Земља</b>                 | САД, Сан Хозе         | 25                        | Ingersoll и др, 1983  |
| <b>Земља</b>                 | Италија               | 6,0-60                    | De Martino и др, 1998 |
| <b>Бетон</b>                 | Пољска                | 2,5±0,21                  | Morawska, 1989        |
| <b>Седиментне стене</b>      | Бангладеш             | 23-32                     | Chowdhury и др, 1999  |
| <b>Бетон</b>                 | САД                   | 13-25                     | Ingersoll и др, 1983  |
| <b>Гранит</b>                | Јапан, Мисаса         | 29                        | Sakoda и др, 2008     |

### 1.3.2 Транспорт

Транспорт радона кроз материјал одвија се кроз систем пора испуњених ваздухом. Приликом математичког изражавања користи се изванстан степен апроксимације, а главни услов при извођењу једначина је да се проблеми решавају као једнодимензионални случајеви, где је основна х-оса нормална на површину постављеног материјала. Једначине узимају у обзир чињеницу да се радон распада током мерења и током дифузионог процеса, тако да је уважен прилив нових атома радона.

Дифузија представља процес нето миграције гаса од веће концентрације ка нижој кроз средње поре, а његова покретачка сила кроз матрицу земљишта је градијент концентрације радона у земљишту. Степен дифузије гаса радона у земљишту се мери као коефицијент дифузије. Процес дифузије се описује Фиковим законом, који повезује градијент концентрације са флуksom радона:

$$J(x) = -D_e \frac{dC(x)}{dx} \quad (1.1)$$

где је:  $J(x)$  флуks радона изражен у ( $\text{Bq m}^{-2} \text{s}^{-1}$ );  $D_e$  коефицијент дифузије изражен у ( $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ );  $\partial C/\partial z$  градијент концентрације дуж правца  $z$  изражен у ( $\text{Bq m}^{-4}$ ). Негативан предзнак испред дифузионог коефицијента указује да се дифузија врши у правцу смањења концентрације.  $D_e$  се може навести као ефективни коефицијент дифузије, у који је урачунат ефекат порозности материјала. Типична вредност коефицијента дифузије радона за ваздух је око  $1,2 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \text{s}^{-1}$ , што се може користити као почетна вредност за итеративни поступак рачунања коефицијента дифузије радона у експерименту, а може се узети и нижа вредност нпр.  $1 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{s}^{-1}$ . Коефицијент дифузије утиче на брзину ексхалације радона са површине земљишта, а зависи од гранулације земљишта и садржаја воде у узорку.

Процес адвекције, настаје услед протока ваздуха кроз порозни материјал, који у себи садржи радон, а узрокован је разликом притиска и ова појава се узима као главни разлог померања радона у земљишту испод грађевинских објеката. Радон путује све до грађевинских материјала, где даље процесом дифузије улази у унутрашњост грађевинских објеката. Студијом је утврђено да разлика у притисцима изазива мале промене у еманацији радона из материјала (Van der Spoel и др, 1997). Међутим, уколико су разлике у притиску далеко веће него у већини испитиваних случајева мора се узети у обзир и процес адвекције.

Процес адвекције описује Дарсијев закон, где је за једнодимензионални случај транспорта радона кроз земљиште, тумачен као да је настао услед разлике притиска који влада између ваздуха у порама земљишта и спољашњег ваздуха, дат у облику:

$$v_d = - \frac{K'}{\mu} \frac{dp}{dx} \quad (1.2)$$

где је:  $v_d$  брзина протока радона ( $\text{m s}^{-1}$ );  $dp/dx$  градијент притиска дуж слоја дебљине  $x$  ( $\text{Pa m}^{-1}$ );  $K'$  пермеабилност медијума ( $\text{m}^2$ );  $\mu$  динамички коефицијент вискозности у ваздуху на  $10^\circ\text{C}$  ( $\text{Ns m}^{-2}$ ).

Главни фактори који утичу на транспорт радона су порозност, пермеабилност и влага у земљишту. Покренут транспортним механизмима, као што су адвекција (разлика у притиску), конвекција (разлика у температури) или дифузија (разлика у концентрацији), ресуспензија честица земље са површине тла, радон се креће и долази у атмосферу или се акумулира у стамбене објекте. Тако је вероватније да ће домови изграђени на високо пропусним земљиштима имати високе концентрације радона.

### 1.3.3 Ексхалација радона

Земљиште и грађевински материјали сврставају се међу главне изворе радона и дају значајан допринос његовој концентрацији у затвореном простору док други извори углавном имају мали удео у томе. Конвенционални грађевински материјали на бази земље, као што су цигле, песак, цемент, итд, садрже уран и торијум у различитим количинама. Радиоактивни гасови произведени у овим материјалима услед распада  $^{226}\text{Ra}$  и  $^{224}\text{Ra}$  се такође транспортују дифузијом и конвекцијом у ваздух у затвореном простору. У већини случајева само мали део атома радона створеног у материјалу може да побегне у атмосферу (Pankaj и др, 2017).

Уопштено говорећи, ексхалација радона у атмосферу контролише се пропустљивошћу тла за гас. У ситнозрним седиментима одвијају се процеси дифузије, док се пасивна адвекција радона са флуидима повећава са повећањем порозности, ломљења,

цепања раседа и подземних шупљина. И радон и торон могу да еманирају у гасове или течности у порама зрна, а затим да мигрирају на значајну удаљеност од места настанка у стенама, земљишту и/или грађевинским материјалима у атмосферу (ексхалација) пре него што буду подвргнути радиоактивном распаду (Rankaj и др, 2017). Постоје два квантитавна описа ексхалације: површинска и масена. Површинска ексхалација ( $E_s$ ) се дефинише као количина активности која се ослободи по јединици површине неког материјала у јединици времена ( $Bq\ m^2\ s^{-1}$ ), а масена ексхалација се дефинише као ослобођена активност по јединици масе у јединици времена ( $Bq\ kg^2\ s^{-1}$ ).

Укупан флукс радона  $J(x)$  у материјалу се може изразити као збир једначина (1.1) и (1.2):

$$J(x) = -D_e \frac{dC(x)}{dx} + v_d \cdot C(x) \quad (1.3)$$

Ако се узму гранични услови:  $C(x=d)=0$ ,  $C(x=0)=0$ ; тако да се може претпоставити да је на горњој и доњој граници слоја концентрација радона у околном ваздуху изразито мала у поређењу са оном у датом материјалу, тада је јачина површинске ексхалације радона:

$$E_s = -D_e \frac{dC(x)}{dx} \Big|_{x=0} \quad (1.4)$$

Да би се добила површинска ексхалација радона, примењује се други Fick-ов закон, који се односи на промену концентраје радона у јединици времена:

$$\frac{dC(x,t)}{dt} = \frac{d^2C(x,t)}{dx^2} - \frac{d(v_d(x)C(x,t))}{dx} - \lambda C(x,t) + \lambda C_m \quad (1.5)$$

где је:  $\lambda$  константа радиоактивног распада радона а  $C_m$  максимална концентрација радона у материјалу на великој дубини за случај када  $x=\infty$  и може се изразити помоћу релације (1.6). У овом случају проток радона се одвија кроз бесконачни водоравни слој хомогеног материјала, а концентрација радона која се одаје са јединице површине у јединици времена  $C(x,t)$  се добија решавањем претходних једначина под условом стабилне равнотеже:

$$\frac{D_e}{P_{eff}} \cdot \frac{d^2C(x,t)}{dx^2} - \frac{1}{P_{eff}} \cdot \frac{d(v_d C(x,t))}{dx} - \lambda C(x,t) + \lambda C_m = 0 \quad (1.6)$$

где је:  $P_{eff}$  ефективна порозоност датог материјала, а  $C_m$  максимална концентрација радона у материјалу на великој дубини (случај  $x=\infty$ ) и изражава се помоћу релације:

$$C_m = \frac{\varepsilon \cdot A_{Ra} \cdot \rho}{P_{eff}} \quad (1.7)$$

где је  $\varepsilon$  коефицијент еманиције радона,  $A_{Ra}$  концентрација активности  $^{226}Ra$  у датом материјалу,  $\rho$  густина материјала (Awhida и др, 2016; Porstentörfer, 1994; Schroeyers, 2017).

Претпостављајући да се транспорт радона врши искључиво дифузијом и да је почетна концентрација радона са обе стране материјала  $d$  занемарљива ( $C_0(0)=C_0(d)=0$ ), јачина површинске ексхалације може се представити следећом релацијом (Porstentörfer, 1994):

$$E_S = C_m \cdot \frac{1 - \cosh\left(\frac{-d}{L}\right)}{\sinh\left(\frac{-d}{L}\right)} \cdot L \cdot \lambda \cdot P_{eff} \quad (1.8)$$

где је  $L$  дужина дифузије радона (m), као мера средњег растојања које атоми радона пређу у матрици пре њиховог радиоактивног распада, а израчунава се помоћу једначине (Awhida и др, 2016; IAEA, 2013; Lopez-Coto и др, 2009; Kumar и Chauhan, 2014):

$$L = \sqrt{\frac{D_e}{\lambda}} \quad (1.9)$$

## 1.4 Понашање радона и потомака у атмосфери

У слободној атмосфери радон нема радиолошки значај због кратког полуживота и релативно ниске заступљености свог дугоживећег родитеља.  $^{232}\text{Th}$  је заступљенији од  $^{238}\text{U}$ , али време полураспада торона је 55,6 секунди. Само мали део  $^{220}\text{Rn}$  који се произведе у тлу доспе у атмосферу. Због брзог распада  $^{220}\text{Rn}$  се углавном налази унутар првих неколико метара изнад површине земље.

Пошто су атоми радона хемијски инертни, молекуларна дифузија и промене атмосферског притиска главни су механизми за ослобађање радона на граници између земље и ваздуха. Када се нађе у слободној атмосфери, шири се хоризонтално и вертикално струјањима у разним правцима. Испитујући механизме ширења радона у атмосфери, уочено је да промена концентрације радона и његових потомака зависи у већој мери од вертикалних токова него од хоризонталних. На концентрације радона у спољашњој средини утиче не само брзина ексхалације из земље, већ и феномени мешања атмосфере. У турбулентним условима, какви се обично дешавају током дана, дешава се много више вертикалног мешања него ноћу, када инверзије могу заробити радон близу земље. То значи да концентрације радона на отвореном могу варирати дневно за више од фактора 10. Међутим, његова расподела у простору и времену, физичко стање и начин учествовања у динамици атмосфере још увек нису у потпуности схваћени. У многим случајевима, изотопи радона пружају јединствен скуп трагова за проучавање процеса транспорта и мешања у атмосфери.

Потомци  $^{222}\text{Rn}$  могу се поделити на групу с кратким временом полураспада: изотопи полонијума, олова и бизмута, који имају време полураспада од пола сата или мање, и на групу с дужим временом полураспада, коју чине  $^{210}\text{Pb}$  (21 година) и његова два непосредна потомка,  $^{210}\text{Bi}$  (5,0 дана) и  $^{210}\text{Po}$  (138 дана) (Wilkening, 1981). У атмосферском ваздуху концентрације гасовитих продуката немају константне вредности. Радон на тим местима где излази из земље се разређује са ваздухом дифузијом до вредности од 8-14  $\text{Bq m}^{-3}$ , на висини 0,5 m изнад земље (Durrani и Ilić, 1997). У спољашњој средини изнад тла средња годишња вредност концентрације радона је у распону од 0,1-10  $\text{Bq m}^{-3}$ , док просечна вредност износи 3  $\text{Bq m}^{-3}$  (UNSCEAR, 1982). Са повећањем висине, концентрација радона се смањује, јер се због кратког времена полураспада атоми радона распаду пре него достигну неку висину (UNSCEAR, 1982). Атом радона је знатно тежи од молекула ваздуха због тога тежи да се нађе ближе тлу.

У приземном слоју ваздуха температура и притисак имају значајан утицај на концентрацију радона. Повећањем садржаја воде у порама тла, повећава се концентрација радона у ваздуху пора, па је већа и еманација. Са порастом температуре и нижим атмосферским притиском елиминише се влага из земљишта, а то има утицај да подстиче ексхалацију радона тј. врши се емисија радона са површине земљишта дифузионим или конвективним кретањем кроз просторе пора (Слика 1.5). Ниске температуре са интензивним падавинама уз ледени покривач или снежне падавине, представљају баријеру за продор радона у атмосферу, тако да се он накупља у порама тла. Овакви услови узрокују малу концентрацију радона у ваздуху у зимском периоду. Међутим, радон се креће кроз међусобно повезане поре у тлу, продире и накупља се у унутрашњости зграда. Акумулација у затвореном простору зависи од природних (геогених) и антропогених фактора. Генерално, вероватно оба, представљају синергистичке ефекте који утичу у већој или мањој мери на концентрације радона у затвореном простору.

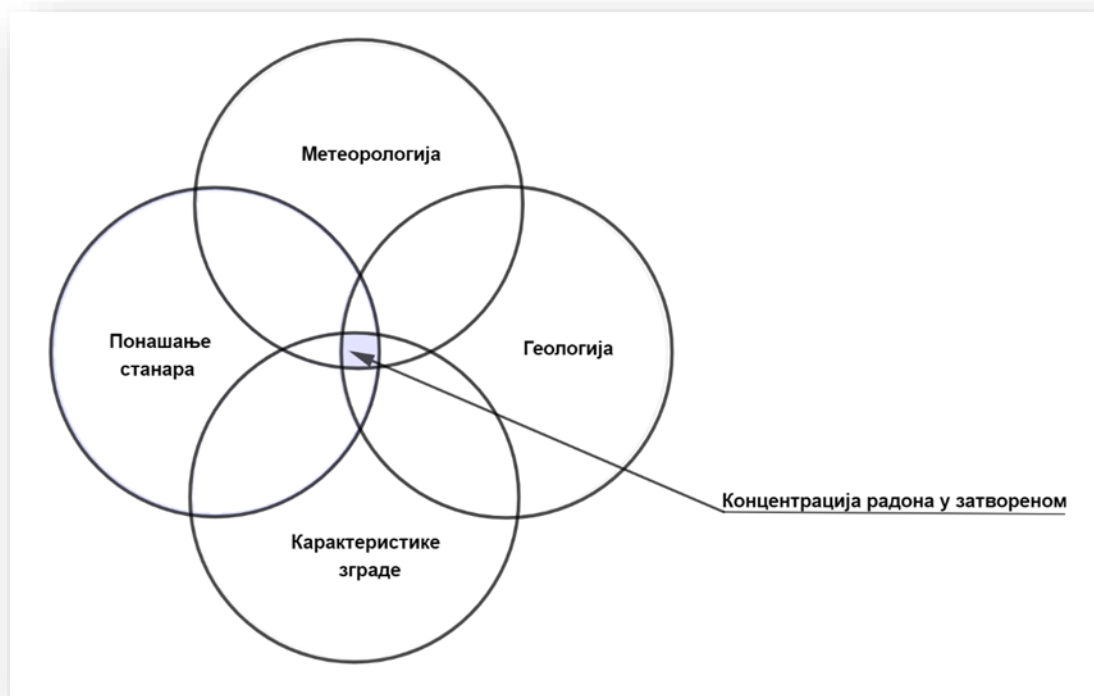


**Слика 1.5** Продирање и нагомилавање радона у затвореном простору

Већина потомака створених распадом радона припаја се постојећим аеросолима у ваздуху, који се услед дејства гравитације таложе на површини тла. Ово је и разлог што се у атмосферском ваздуху не успоставља равнотежа између радона и потомака, док при интензивном струјању ваздуха долази до смањења обе концентрације. У случајевима повећања или смањења температуре и при релативно великој влажности ваздуха, бројчана концентрација радиоактивних аеросола у приземним слојевима ваздуха је већа од концентрације радона (Durrani и Илић, 1997).

С друге стране, на концентрацију радона у затвореном утичу геолошки фактори (еманација радона, дифузија и ексхалација, порозност тла и пропустљивост), карактеристике грађевине (уз подразумевану непропусност на изграђеним површинама у

контакту са земљом, размена ваздуха у затвореном простору, херметичност зграде и топлотна изолација), понашање станара, као и метеоролошки параметри (Слика 1.6).



**Слика 1.6** Фактори који утичу на концентрацију радона у затвореном простору

#### 1.4.1 Утицај геогених фактора

Геогени фактори показују географски тренд и просторну структуру у зависности од геологије, својстава земљишта и хидрологије (Ciotoli и др, 2007; Gulan и др, 2018). Геогени фактори имају највише утицаја на извор радона (тј. геогени извор радона), а односе се на геохемијске особине геолошке јединице, и транспорт радона, квантификован факторима који управљају кретањем радона у подземном слоју (тј. пропусност тла, раседи и пукотине, хидрогеологија и педологија). Ови фактори су обједињени у величину која се зове геогени потенцијал радона (Geogenic Radon Potencial-GRP) и представља брзину којом радон мигрира на површину дуж раседа или директно избија из плитког тла. Може се дефинисати на основу везе концентрације радона у земљишту на фиксној дубини (0,8-1 m) и пропусности земног гаса (Ciotoli и др, 2017).

Уобичајено је да одређени типови стена (геолошке јединице) поседују карактеристичну концентрацију урана, торијума, калијума, а понекад је добро знати и величину зрна, пермеабилност, порозност. Геолошке информације могу послужити као користан индикатор радона у затвореном простору у комбинацији са мерењима гасова у земљишту и специфичним факторима, посебно када нису доступна опсежна мерења у затвореном простору на одређеној територији.

Геогена подручја склона радону су региони у којима се, из природних разлога, могу очекивати повишене концентрације радона у затвореном простору (Bossew, 2014). Неке доступне геолошке информације су веома корисне када се сумња на опасност од радона: јачина гама дозе, висока концентрација активности урана у земљишту и камену и текстура пешчаног тла која омогућава лакши транспорт радона. Повишени нивои природних радионуклида у оближњем земљишту делом могу бити последица технолошких активности (Murty и Karunakara, 2008), као што су рударске операције. Поред тога, на висок ниво радона у затвореном простору може утицати близина зоне раседа која омогућава транспорт радона кроз пукотине пропусног тла. Присуство геолошких раседа повећава нивое радона у тлу обезбеђујући повољне путеве од изворних стена богатих ураном до површине. С друге стране, алтерација магматских и стена кристаласте структуре дуж неактивних раседа може повећати однос минерала глине, што смањује пермеабилност и радонски потенцијал (Barnet и др, 2008). Остали фактори који утичу на радон углавном укључују тип земљишта, величину зрна, садржај воде и порозност (Manohar и др, 2013).

Релативно нов концепт је геогени индекс радонског хазарда (Geogenic Radon Hazard Index-GRHI), произашао из потребе да се одреди одређени индикатор коришћењем регионално доступних геолошких променљивих (Bossew и др, 2020). Први покушаји израде европске мапе геогеног потенцијала радона (GRP карте) започети су око 2008 (Dubois и др, 2008), али се показало да је реализација израде такве карте сложена, јер није доступан конзистентан скуп података GRP са европском покривеношћу.

Због штетних ефеката радона на здравље који су сада добро познати (Corti и др, 2022) многе европске земље су размотриле акционе планове за идентификацију подручја у којима би могао постојати већи ризик од радона (Tollefsen и др, 2014). Мапирање радона се углавном врши двома методама:

- заснованој на просторној расподели мерења радона у затвореном простору, и
- проценом потенцијала радона на основу геогених информација као што су радиометријска истраживања (у земљи и ваздуху), геохемијски подаци (нпр. садржај U и Ra), мерења радона у земном гасу, мерења пропустљивости земљишта, близине раседа, итд (Ciotoli и др, 2014).

За мапе радона припремљене на основу просторне дистрибуције концентрација радона у затвореном простору неопходна је релативно густа мерна мрежа. У овом случају, трошкови мерења могу бити значајни и израђена мапа може имати значење само у насељеним местима и у стандардним условима становања (тј. просторије у приземљу, присуство подрума) (Ciotoli и др, 2014). Као резултат другог приступа, може се развити GRP мапа која може предвидети количину радона транспортованог из оближњих геолошких формација у атмосферу, што би користило регулаторним телима и властима у спровођењу ефективног планирања земљишта и дизајнирању одговарајуће стратегије у смањењу ризика од излагања радону у изграђеном окружењу (Elío и др, 2017).

#### 1.4.2 Утицај метеоролошких параметара

Метеоролошки фактори се могу узети у обзир у односу на геогене и антропогене утицаје у оној мери у којој могу утицати на транспорт радона у земљи, миграцију и задржавање радона у затвореном простору (Marley, 2001; Bossew и Lettner, 2007; Schubert и др, 2018; Aquilina и Fenech, 2019; Ambrosino и др, 2020). Концентрације радона у затвореном

простору су „осетљивије“ на метеоролошке параметре него на карактеристике зграде (Steck, 2009). Локални временски и метеоролошки услови имају такође снажан утицај (Cinelli и др, 2011; Yarmoshenko и др, 2016), као што су влага у земљишту, падавине, температура, притисак, релативна влажност и спољна тачка росе (Walia и др, 2005a; Weinlich и др, 2006; Chaudhuri и др, 2010; Xie и др, 2015). Међутим, резултати пријављени у многим студијама нису увек у сагласности. Многа истраживања показују да температурне разлике између унутрашњег и спољашњег окружења имају велики утицај на радон у затвореном (Kitto 2005; Rowe и др, 2002; Groves-Kirkby и др, 2012; Xie и др, 2015).

Док температура у затвореном простору остаје константна током дана, спољашње температуре варирају, изазивајући разлику притиска између унутрашњег и спољашњег окружења. Када је спољашња температура нижа од унутрашње, разлика у густини између спољашњег и унутрашњег ваздуха изазива смањење притиска у основи зграде, што доводи до инфилтрације ваздуха споља и са земље у унутрашње окружење. Ова последица је позната као ефекат димњака (Jo и др, 2007). Високе унутрашње температуре изазивају узлазни ток, који смањује притисак у подруму, што доводи до уласка радона у зграду. Када је температура у затвореном простору нижа од спољашње, топлота се преноси унутра што заузврат смањује релативну влажност; концентрације радона опадају како се релативна влажност повећава са 30% на 60%, а расте када се релативна влажност повећава изнад 70% (Akbari и др, 2013).

Када се атмосферски притисак повећа, ексхалација радона из тла или зида ће се смањити, а ниво радона у затвореном простору ће се смањити. Смањење атмосферског притиска подстиче дифузију и продирање радона кроз пукотине у зидовима (Nielson и др, 1997). Променљиве разлике унутрашњег/спољног ваздушног притиска откривене су као кључни покретач за размену ваздуха, а самим тим и за варијацију концентрације радона у затвореном простору (Schubert и др, 2018). Чини се да су брзина и смер ветра најзначајнији предиктори концентрације радона.

Други параметри, на пример, коефицијент дифузије и садржај воде у земљишту такође утичу на концентрацију радона (Jönsson, 1997). Влажност земљишта на дубини од 0,9 m посебно има велики утицај на концентрацију радона у затвореном простору; када се влажност земљишта повећава, ефективна густина земљишта се повећа, па настанак пукотина у земљишту и смањење порозности земљишта резултира смањењем дифузије и пропустљивости гаса радона у земљишту, што последично смањује и емисију радона из земљишта (Quanfu и др, 2002).

Најјаче пертурбације концентрације радона се виде у вези са серијама падавина. Са почетком падавина радон показује скок који достиже врхунац са временским кашњењем од 12-15 сати. Повећана влажност земљишта у површинском земљишном покривачу спречава излазак радона у атмосферу и, на тај начин, долази до повећаног „заробљавања“ радона у горњем влажном слоју, до тзв. ефекта затварања (Aroга и др, 2017). Ексхалација радона је у позитивној корелацији са температуром, релативном влажношћу и падавинама, док је у негативној корелацији са брзином ветра за радон у земљишту као и у подземним водама (Walia и др, 2005b). Када кишница ступи у интеракцију са радоном, део гаса радона „тече“ дуж кишнице и после тога се радон смањује; ако је температура ваздуха нижа у односу на температуру земљишта, проток радона се повећава услед процеса конвекције и обрнуто, проток радона се смањује када је температура ваздуха виша од температуре тла (Jaishi и др, 2014). Спољни притисак, влажност и садржај воде у земљишту испод зграде имају већи

утицај на ниво радона у затвореном простору него температура ваздуха, падавине, брзина ветра и температура земљишта (Sun и др, 2002).

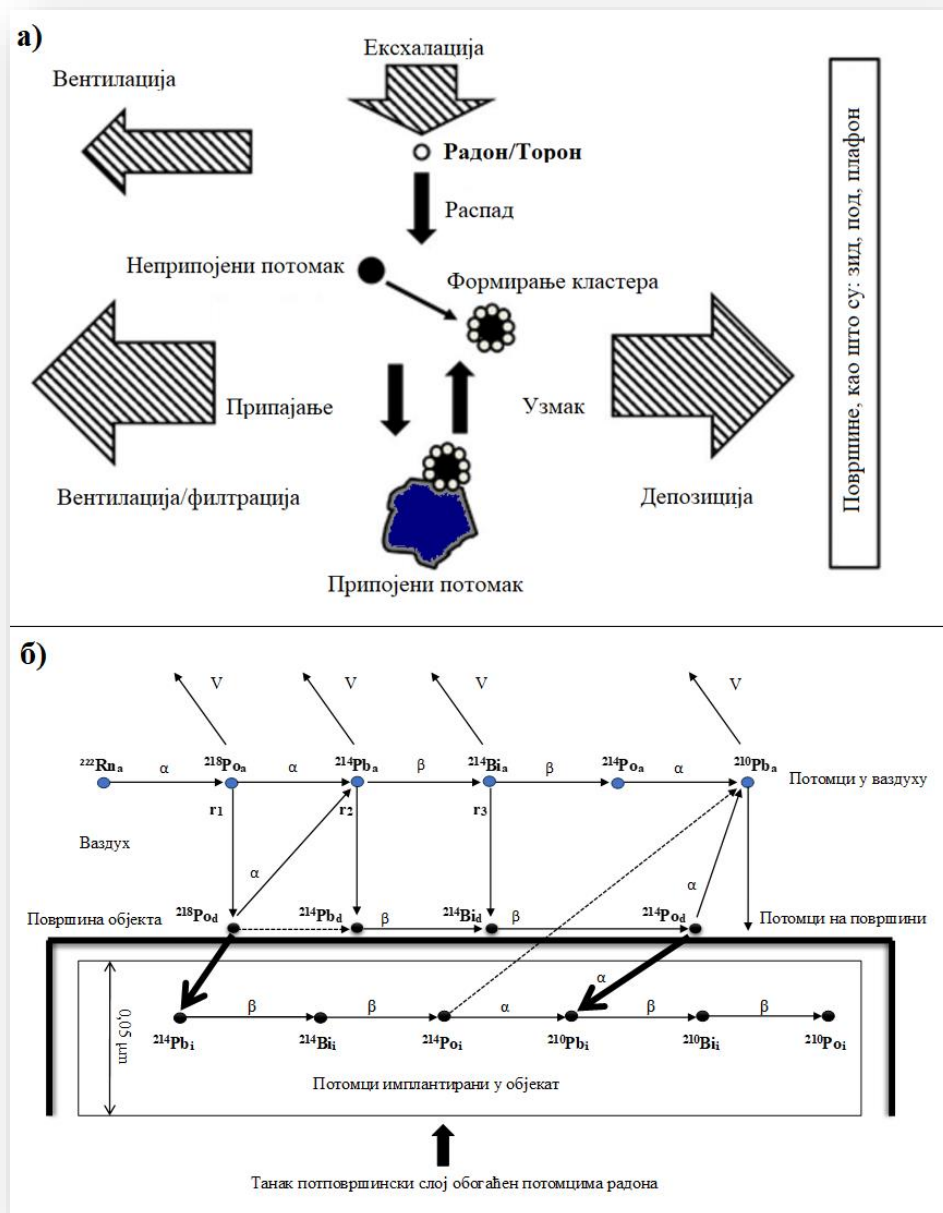
### 1.4.3 Понашање радона и његових потомака у затвореном простору

Распадом језгра  $^{222}\text{Rn}$  настају краткоживећи радонови потомци, метални јони  $^{218}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Pb}$ ,  $^{214}\text{Bi}$  и  $^{214}\text{Po}$ . У ваздуху су присутне мале честице, као што су аеросоли, којима се припајају радонови краткоживећи потомци. Концентрације аеросола је  $10^3 \text{ cm}^{-3}$  у „чистом“ ваздуху и до  $10^5 \text{ cm}^{-3}$  у урбаном простору (Junge, 1963). Око 80% новоформираних потомака је позитивно наелектрисано у тренутку стварања и хемијски су веома активни. Они интерагују са негативним јонима присутним у атмосфери, припајајући се за аеросоле. Први потомак  $^{218}\text{Po}$ , под нормалним спољашњим условима, постоји само 20 s као самосталан мобилан јон или атом, а након тога се припаја поларним молекулима водене паре градећи кластере са њима, који се током сталних међусобних судара постепено повећавају, и припајају постојећим аеросолима. Такође може доћи и до распада и таложења на постојећим површинама (Слика 1.7а). Формирање оваквих кластера одвија се релативно брзо за разлику од њиховог увећања-остају на нивоу малих јона све док се не припоје амбијенталним аеросолима и на тај начин образују велике јоне. Припојени и слободни потомци имају могућност таложења на различитим површинама унутар затворених просторија, при чему је брзина депозиције већа код неприпојених потомака (Stevanović и др, 2009).

Понашање радонових потомака у близини површине, радиоактивни распад, депозиција, одвајање и њихово уграђивање у објекат приказани су на слици 1.7б (Nikezić и Yu, 1999). Изотопи  $^{218}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Pb}$ ,  $^{214}\text{Bi}$  и  $^{210}\text{Pb}$  могу бити уклоњени вентилацијом из ваздуха затворених просторија или наталожени на површини објекта. Алфа распадом депонованог  $^{218}\text{Po}$  настају атоми  $^{214}\text{Pb}$ , који добијају одговарајућу енергију узмака, помоћу које могу да се одвајају од површине и враћају у ваздух или се уграђују у танки површински слој објекта. Вероватноћа да се ови атоми након узмака задрже на површини објекта је занемарљива. На сличан начин, при распаду  $^{214}\text{Po}$  на површини објекта, новонастали атоми  $^{210}\text{Pb}$  се могу одвајати од површине или се уграђивати у њу. Изотоп  $^{210}\text{Pb}$ , настао од  $^{214}\text{Po}$  уграђеног у површински слој објекта, такође може при узмаку доспети у ваздух, али је вероватноћа овог процеса изузетно мала. Енергија узмака изотопа који настају као продукти  $\beta$ -распада није довољна да омогући уграђивање ових потомака у објекат или њихово одвајање од површине.

Ако се честице, било да су наелектрисане или неутралне, не припоје за аеросоле, образују неприпојену фракцију (слободни кластери). Неприпојени потомци као слободни кластери од само неколико молекула лебде у ваздуху и имају најизраженији негативан здравствени ефекат. Вероватноћа таложења потомака у људским плућима знатно је већа за слободне, него за припојене кластере. Део радонових потомака који је у природи у слободној форми зависи од више различитих параметара, и креће се од 0,3 до 33% (Nikezić, 1995). У зависности од концентрације јона у ваздуху и влажности, неприпојени радонови потомци се делимично неутралишу кроз рекомбинацију са негативним јонима или се припајају честицама аеросола формирајући припојене радонове потомке (дијаметра реда величине од 20 до 500 nm). Неприпојена фракција је слабо заступљена у задимљеним и празним просторијама, док је у чистом окружењу са филтрацијом ваздуха више заступљена. Уобичајено је да се потомак  $^{218}\text{Po}$  налази у неприпојеној фракцији са нижом концентрацијом

неприпојеног  $^{214}\text{Pb}$  ( $^{214}\text{Pb}/^{218}\text{Po}$ ). Степен припајања зависи од концентрације аеросола у ваздуху (UNSCEAR, 2000).



**Слика 1.7 а)** Шематски приказ понашања радонових потомака у затвореном простору; **б)** Понашање радонових потомака у близини површине објекта и инкорпорација неких атома у танки потповршински слој (Nikezić и Yu, 1999).  $V$  означава уклањање атома вентилацијом;  $r$  означава флуks таложења. Индекси: **a** атоми у ваздуху; **d** атоми који су већ депоновани на површину; **i** атоми уграђени у слој. Стрелице имају следећа значења:  $\rightarrow$  распад потомака;  $\downarrow$  таложење атома;  $\nearrow$  инкорпорација атома;  $\nwarrow$  уклањање атома вентилацијом;  $\nearrow$  одвајање од површине;  $\cdots$  процеси који се могу занемарити.

#### 1.4.4 Хоризонтална и вертикална дистрибуција радона

Истраживања хоризонталне расподеле концентрације радона показују приближну уједначеност у различитим просторијама на истом спрату објекта (Denman, и др, 2007а). Уколико су зидови, подови и плафони од истог грађевинског материјала на истом спрату, евентуалне разлике у концентрацији радона између две просторије на истом спрату могу потицати од навика укућана, грејања и вентилације (Denman, 2007а). Расподела радона у просторији је униформна. Теоријске и експерименталне студије о променама концентрације радона у појединачним јединицама у стамбеним блоковима пријављене су у студијама из више земаља. У троспратним стамбеним блоковима у Београду, концентрација радона се смањује за приближно 20% по спрату од приземља навише (Poročić и Todorović, 2006), а слично запажање је пријављено у студији о концентрацијама радона у 310 станова у Италији (на основу мерења канистерима са активним угљем) где је утврђен однос концентрација радона на првом спрату и приземљу 0,83 за Ђенову и 0,64 за Савону (Gallelli и др, 1998). У студији од преко 5000 станова распоређених у свим регионима Италије средња концентрација радона се монотонно смањивала од подрума до горњих спратова, приближно 15–20% по спрату (Bohicchio и др, 2005). Поређењем концентрација радона у собама на првом спрату и у приземљу у 55 белгијских домова добијен је однос корелације  $r = 0,76$ , док је такође добра корелација ( $r=0,68$ ) добијена између приземља и подрума за 83 куће (Zhu и др, 1998).

Поједини аутори су проучавали концентрације радона у затвореном простору у односу на спратност. Јасан тренд смањења вредности концентрације радона је присутан на вишим спратовима: аритметичке средине биле су  $94,8 \text{ Bq m}^{-3}$ ,  $95,4 \text{ Bq m}^{-3}$ ,  $64,4 \text{ Bq m}^{-3}$  и  $27,7 \text{ Bq m}^{-3}$  за подрум, приземље, први и други спрат, респективно (López-Pérez и др, 2022). Исти аутори приказали су резултате за две учионице на различитим спратовима: нивои радона у учионицама на другом спрату и под земљом (учионица са слабом вентилацијом) били су  $11,7 \pm 9,8$  и  $106,4 \pm 39,8 \text{ Bq m}^{-3}$ , респективно.

Студије које се односе на просторну расподелу радона у затвореном простору фокусирали су се на просторне карактеристике унутар региона (или специфичних региона) и на варијабилност унутар зграда, а могу да укључују и оба фактора. Анализа варијабилности концентрације радона у студији која је обухватила 334 основне школе у Србији (693 просторије, углавном са једним или два спрата) показала је већу варијабилност између школа (коэффициент варијације,  $CV = 65\%$ ) него између спратова ( $CV = 24\%$ ) и између просторија на истом спрату ( $CV = 21\%$ ), (Bohicchio и др, 2014). Неки аутори су пријавили средње варијације од просторије до просторије од 30,9% у приземљу и 14,5% на горњем спрату, што је ниже од варијација између свих школа ( $CV = 73,1\%$ ) (Madureira и др, 2016). Сличне средње варијације од просторије до просторије у приземљу ( $CV = 27\%$ ) и првом спрату ( $CV = 14\%$ ) добијене су у истраживању спроведеном у 50 школа у Републици Српској (Curguz и др, 2020).

#### 1.4.5 Дневне и сезонске промене концентрације радона

Типична дугорочна просечна концентрација радона на отвореном је око  $10 \text{ Bq m}^{-3}$ . Међутим, оне варирају од приближно 1 до више од  $100 \text{ Bq m}^{-3}$ , при чему је прва вредност можда типична за изолована мала острва, а друга типична за места са високом ексхалацијом

радона на великим површинама (UNSCEAR, 2000). У областима где топографска ограничења и ефекти атмосферске стабилности инхибирају дисперзију, концентрације радона у ваздуху могу бити веома високе.

Дневне варијације концентрације радона у затвореном простору су углавном изазване дневном променом унутрашње температуре и запремине унутрашњег ваздуха. Нижа температура ваздуха у поређењу са температуром тла током раног јутра изазива конвективно ослобађање радона (Schubert и Schulz 2002). Током поподнева, температурни градијент је инверзан, што отежава „термално дисање“ тла и омета ексхалацију радона. Слабо конвективно кретање током ноћи, када је атмосфера релативно мирна, поново доводи до постепеног повећања концентрације радона (Chambers и др, 2014).

Тренд концентрације радона показује врхунац у раним јутарњим часовима, од 24.00-06.00 часова, и током поноћи. Како се сунчева светлост појачава, концентрација радона се смањује и показује нижи тренд раста у периоду од 12.00-16.00 часова. Кад год се температура земљишта повећа, сушење повећава ослобађање радионуклида из земљишта; концентрација радона се полако повећава након сати са сунчевим пиковима (Crawford и др, 2015). Дуготрајна мерења концентрације радона у земљишту на дубини од 0,8 m и краткорочна на дубини од 0,4 m, показују велику варијабилност. Анализом података потврђено је да редовна дневна промена концентрације радона у земном ваздуху зависи од дневних промена атмосферског притиска.

Постоје и сезонске варијације, повезане са ефектима падавина или променама преовлађујућих ветрова. Типичне годишње концентрације радона у земном ваздуху (са летњим минимумима и зимским максимумима) ометају благе зиме и обилне летње падавине (Müllerova и др, 2014). Прозори и врата зграда током зимских месеци су затворени на дужи временски период због кише, снега или леда, што резултира мањом вентилацијом у просторији, и већом акумулацијом радона у затвореном простору. Током летњих месеци људи отварају врата и прозоре, чиме се повећава вентилација куће (Karpińska и др, 2004). Брзина вентилације и концентрација радона имају обрнуту везу; брзина вентилације је кључна за смањење концентрације радона у затвореном простору (Winkler-Heil и др, 2007). Концентрација радона у затвореном простору зими је већа у поређењу са другим годишњим добима. Током зиме, већа температурна разлика између спољашњег и унутрашњег простора појачава ефекат димњака. Супротно томе, током лета, виша температура на отвореном него у затвореном, може изазвати супротан ефекат, што индукује натпритисак у основи зграде. Овај ефекат ће спречити инфилтрацију ваздуха споља и са земље (Jo и др, 2007).

#### 1.4.6 Енергетска ефикасност и радон

Реконструкција постојећих зграда, кућа или станова, у циљу постизања бољих енергетских перформанси је широко распрострањена, због све веће потрошње и цене енергије. С друге стране, напори за уштеду енергије резултирају повећаном непропусношћу старијих зграда, праћену акумулацијом различитих загађујућих супстанци, укључујући радон, што дугорочно може имати штетне ефекте по здравље људи.

Системи грејања, вентилације и климатизације су одговорни за значајан део потрошње енергије у модерним зградама (Perez-Lombardi др, 2008; Chua и др, 2013). Промене у вентилацији и филтрацији такође могу довести до варијација у концентрацији

загађивача ваздуха, што утиче на изложеност овим загађивачима у затвореном простору (Persily и Emmerich, 2012).

Повећана свест о политици уштеде енергије, као и живот/рад у реновираним или енергетски ефикаснијим зградама ради уштеде топлоте требало би да побољша квалитет више параметара у боравишном простору. Овакве околности могу знатно утицати на размену топлоте зрачењем, посебно зими. Смањење размене ваздуха заузврат изазива у затвореном простору повећање загађивача ваздуха релевантних за здравље. Сходно томе, наизглед комфортно топлотно окружење може представљати важан здравствени проблем.

Притисак ваздуха унутар куће опада са висином због конвекције. Топли ваздух се диже и цури из отвора у горњем делу куће; овај ваздух се замењује ваздухом споља, да би се одржао константан притисак у затвореном простору. Ваздух који се увлачи у објекат на овај начин обухвата земни гас богат радоном испод објекта, који улази у унутрашњост зграде кроз пукотине, отворе око цеви и отворе у темељима. Мере енергетске ефикасности и савремене грађевинске технике омогућавају да се радон акумулира унутар зграда јер је омотач зграде херметичнији од темеља. Домови који су накнадно подвргнути мерама уштеде енергије вероватно ће имати веће концентрације радона од домова без таквих мера. Забележене су двоструко веће концентрације радона у реновираним (енергетски ефикасним) кућама у поређењу са нискоенергетским (пасивним) у Немачкој (Meuer, 2019), док су други аутори открили повећање нивоа радона за 20% након енергетске обнове зграда у Швајцарској (Yang и др, 2019). На основу резултата 11 студија спроведених у Европи и САД, закључено је да се повећање концентрације радона након примењених мера за уштеду енергије јавља чешће од смањења и да резултати варирају од неколико процената до више од 100% (Fisk и др, 2020).

Уз претпоставку константног потенцијала радона у тлу око зграде, параметри који утичу на концентрацију радона у затвореном простору су смањење притиска у згради и брзина размене ваздуха. Ефекат димњака („stack effect“) настаје због разлике у густини унутрашњег/спољног ваздуха, а која је последица разлике у температури и влажности. Интензитет овог ефекта зависи од висине зграде, ваздушне пропустљивости фасадне облоге, јачине/смера ветра и врсте вентилације (Collignan и Powaga, 2019).

У интересантној студији спроведеној у новоизграђеним вишеспратницама које задовољавају мере енергетске ефикасности, концентрација радона премашује просечан ниво (Vasilyev и др, 2015). Као разлог, аутори наводе ниску стопу вентилације.

#### 1.4.7 Проблем NORM-а и TENORM-а

Готово свака геолошка подлога садржи одређену количину радионуклида као и сви материјали и сировине који се јављају у природи. Термин NORM (Naturally Occurring Radioactive Material) означава зрачење које потиче од природних радионуклида, које укључује космичко зрачење и зрачење које потиче од елемената из земљине коре. Хидротермални процеси доводе до обогаћивања примарних стена минералима који садрже радионуклиде услед промена у геолошко-геохемијским системима (руде, стене, подземне воде). На тај начин се природним путем повећава садржај радионуклида у тлу. Нивои зрачења представљени NORM-ом се генерално називају компонентом „природног позадинског зрачења“.

NORM материјали који се јављају у природи садрже повећане концентрације дугоживећих радиоактивних елемената као што су  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  и неке од њихових потомака,  $^{226}\text{Ra}$  и  $^{222}\text{Rn}$ . Одређене индустрије обрађују значајне количине NORM-а, који као отпадни материјал завршавају у природним токовима, на пример приликом рударења урана или у керамичкој индустрији која користи материјале попут циркона. Осим ископавања руде урана и друге индустрије које се доводе у везу са горивним циклусом сврставају се у NORM: нафтна и гасна индустрија (производња), метална индустрија, хемијска индустрија (фосфатна ђубрива), грађевинарство и рециклажа.

Сиров циркон је један од NORM материјала. Преко 95% тржишта цирконијума јавља се у облику цирконијумовог силиката. Овај минерал се јавља природно, ископава се у рудницима и захтева мало обраде. Користи се углавном у ливницама, при производњи ватросталних материјала и у керамичкој индустрији. Током рударства и млевења циркона, произведена прашина може садржати више радионуклида,  $^{210}\text{Pb}$  и  $^{210}\text{Po}$  (ови нису испарљиви), а њихово сакупљање доводи до контаминације цеви и филтера у постројењима за прераду. Отпад произведен током производње циркона/цирконила може садржати значајну количину  $^{226}\text{Ra}$ , што представља опасност од излагања гама зрачењу.

Појам технолошки модификована природна радиоактивност или TENORM (Technologically-Enhanced Naturally Occurring Radioactive Material) уведен је половином 70-их година 20. века и означава зрачење настало као последица технолошких активности које доводе до повећања концентрације природних радионуклида. Узрок томе су људске (антропогене) активности: рад у рудницима, експлоатација и прерада руде и минерала; производња и употреба фосфатних руда у производњи вештачких ђубрива; сагоревање угља; одлагање шљаке и пепела и емисија гасова у атмосферу из термоелектрана; експлоатација и сагоревање нафте и гаса; рециклажа метала; дрвна и грађевинска индустрија; индустрија боја, лакова и абразива; пречишћавање воде; копање тунела; посете пећинама; лет авионом на дужим релацијама и сл. Овде треба укључити и вештачке радионуклиде, фисионе продукте као производ човекове делатности.

TENORM настаје приликом свих великих земљаних радова, изградње великих хидроенергетских и хидромелиорационих објеката и сл. Одлагалишта отпада на која се депонују остаци од прераде руде такође представљају потенцијалне локалитете са нарушеном природном радиоактивношћу.

Експлоатација и сагоревање угља у термоелектранама представљају, у нашим условима, потенцијално најзначајнији процес за стварање TENORM-а. У поменути процесима природна радиоактивност присутна у угљу се концентрише у чврстим остацима сагоревања, шљаци и пепелу. Концентрације природних радионуклида у њима могу бити и неколико пута веће него у околном земљишту, а сав отпад из производње се одлаже на одлагалишта. Тако присутни радионуклиди због великог времена полураспада постају извор продужене изложености зрачењу уз пропратне еколошке проблеме.

## **1.5 Преглед истраживања радона у свету и у нашој земљи**

Нивои радона у затвореном простору у земљама света умногоме варирају како у различитим подручјима једне земље тако и између различитих земаља. Просечне концентрације активности радона у затвореном простору у неким земљама дате су у Табели

1.5 (UNSCEAR, 2006). Добијене геометријске средње концентрације радона су мање од  $10 \text{ Bq m}^{-3}$  на Блиском истоку до више од  $100 \text{ Bq m}^{-3}$  у неколико европских земаља.

Истраживање радона у затвореном простору у нашој земљи спроведено је кроз реализацију Националне кампање мерења радона (Eremić-Savković и др, 2020); просечне концентрације радона по окрузима у Републици Србији дате су Табели 1.6. Студија је показала да је у 3% случајева концентрација радона била изнад  $400 \text{ Bq m}^{-3}$ , а средња годишња концентрација износила је  $105 \text{ Bq m}^{-3}$ .

**Табела 1.5** Просечне концентрације радона у затвореним просторијама у свету (UNSCEAR, 2006)

| Држава     | Концентрација $^{222}\text{Rn}$<br>( $\text{Bq m}^{-3}$ ) | Држава     | Концентрација $^{222}\text{Rn}$<br>( $\text{Bq m}^{-3}$ ) |
|------------|-----------------------------------------------------------|------------|-----------------------------------------------------------|
| Грчка      | 55                                                        | Шпанија    | 90,4                                                      |
| Црна Гора  | 184                                                       | Словенија  | 87                                                        |
| Италија    | 70                                                        | Исланд     | 10                                                        |
| Ирска      | 89                                                        | Немачка    | 50                                                        |
| Чешка      | 118                                                       | Пољска     | 49                                                        |
| Румунија   | 25                                                        | Литванија  | 55                                                        |
| Швајцарска | 75                                                        | САД        | 46                                                        |
| Аргентина  | 35                                                        | Индонезија | 35,1                                                      |
| Кореја     | 53,4                                                      | Кувајт     | 14                                                        |
| Филипини   | 23                                                        | Мађарска   | 107                                                       |
| Белгија    | 48                                                        | Финска     | 120                                                       |
| Данска     | 59                                                        | Шведска    | 108                                                       |
| Тајван     | 10                                                        | Кина       | 43,8                                                      |
| Хрватска   | 35                                                        | Албанија   | 120                                                       |

**Табела 1.6** Концентрација радона у затвореном простору распоређене по окрузима у републици Србији (аритметичка средина са стандардном девијацијом), (Eremić-Savković и др, 2020)

| Округ           | Концентрација радона<br>( $\text{Bq m}^{-3}$ ) | Округ         | Концентрација радона<br>( $\text{Bq m}^{-3}$ ) |
|-----------------|------------------------------------------------|---------------|------------------------------------------------|
| Шумадија        | 70 (74)                                        | Зајечар       | 107 (105)                                      |
| Подунавље       | 155 (206)                                      | Северна Банат | 104 (89)                                       |
| Браничево       | 144 (198)                                      | Моравица      | 103 (149)                                      |
| Срем            | 136 (148)                                      | Јужна Бачка   | 87 (92)                                        |
| Западна Бачка   | 135 (119)                                      | Јабланица     | 86 (77)                                        |
| Мачва           | 129 (110)                                      | Расина        | 84 (85)                                        |
| Нишава          | 125 (110)                                      | Београд       | 79 (115)                                       |
| Пчиња           | 124 (120)                                      | Рашка         | 78 (89)                                        |
| Златибор        | 119 (159)                                      | Колубара      | 77 (99)                                        |
| Северни Банат   | 119 (64)                                       | Пирот         | 70 (73)                                        |
| Централни Банат | 159 (96)                                       | Поморавље     | 114 (134)                                      |

Годишња просечна концентрација радона измерена у одабраним стамбеним објектима 8 сеоских општина југоисточног и централног дела Косова и Метохије износила је  $163 \text{ Bq m}^{-3}$  (Gulan и др, 2013). У руралним областима региона Призрена, северног и централног дела Косова и Метохије, средња аритметичка концентрација радона у затвореном простору износила је  $429 \text{ Bq m}^{-3}$  (Milić и др, 2010).

## 1.6 Ефективна доза од радона и потомака

У већини случајева, концентрација потомака у удахнутом ваздуху је мања од концентрације матичног нуклида због таложења честица на површине и ефеката вентилације. Ова разлика у концентрацији између гаса и његових чврстих потомака је квантификована „фактором равнотеже” са типичним вредностима за радон и потомке од приближно 0,4 (UNSCEAR, 2006).

Процене ризика добијене на основу података о изложености у домаћинствима довољно су поуздане да се заштита може заснивати на мерењу и контроли концентрација радона, без потребе за израчунавањем доза. Међутим, процене доза су потребне у околностима професионалне изложености у којима се примењује систем заштите, нарочито у ситуацијама у којима су референтни нивои изложености прекорачени. Тада је за оптимизацију заштите потребно поштовати ограничења доза.

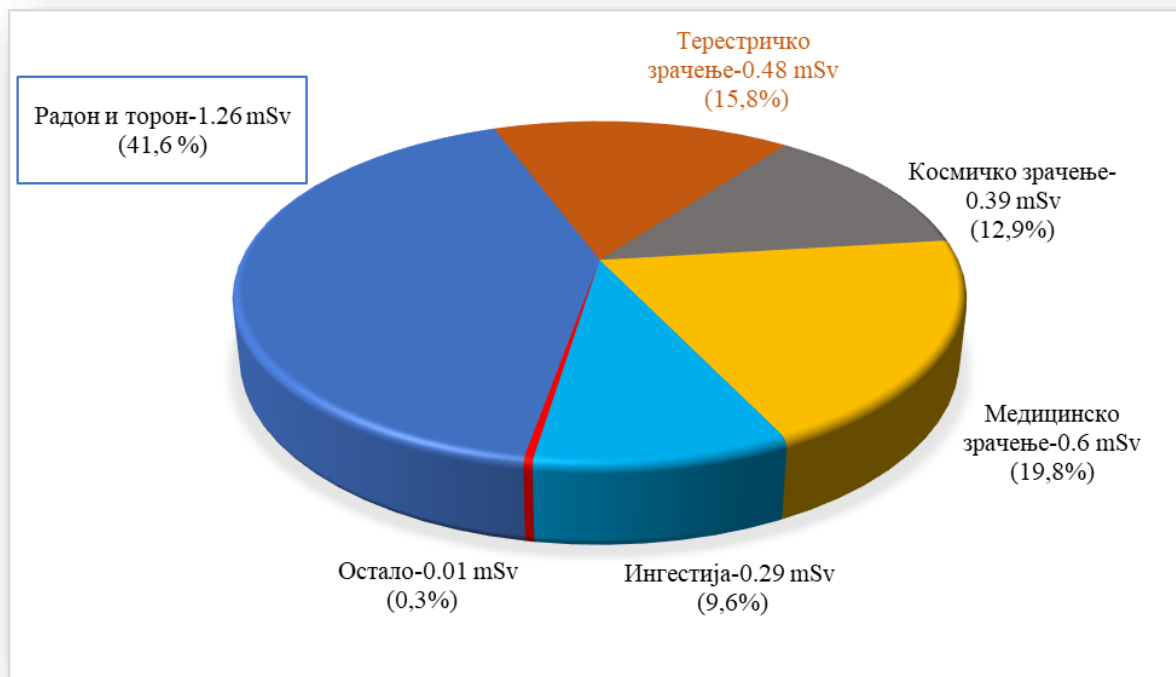
Ефективна доза која произилази из изложености радону и његовим потомцима израчуната је коришћењем или дозиметријских модела или из такозваног „епидемиолошког приступа“, који се такође назива „конвенцијом за конверзију дозе“ (ICRP, 1993). Тренутно, Међународна комисија за радиолошку заштиту (International Commission on Radiological Protection-ICRP) користи конвенцију за конверзију дозе у којој се укупна штета повезана са величином ефективне дозе од рака и наследних ефеката, упоређује са штетом од рака плућа узрокованом нивоом изложености радону (ICRP, 1993). Процене ризика од рака плућа услед изложености радону засноване су на епидемиолошким студијама рудара у подземним рудницима урана, док су процене укупне штете од рака по јединици дозе углавном засноване на подацима о смртности из студија праћења преживелих из атомских бомбардовања у Хирошими и Нагасакију.

Светска просечна годишња доза зрачења услед изложености природним изворима зрачења, укључујући и радон, износи  $2,4 \text{ mSv}$  (UNSCEAR, 2000). Од тога, радон, торон и њихови потомци доприносе са више од 50% дози. Највећу дозу радијације општа популација прими од радона и његових потомака, и то путем инхалације, што има директно дејство на респираторни систем. У просеку светско становништво прима из природних и вештачких извора зрачења дозу од приближно  $3 \text{ mSv}$  (Слика 1.8). Према томе, било би очекивано да у било којој великој популацији око 65% прима годишњу дозу између 1 и  $3 \text{ mSv}$ , око 25% становништва прима годишњу дозу мању од  $1 \text{ mSv}$ , а око 10% прима годишњу дозу већу од  $3 \text{ mSv}$ .

Здравствени ризик услед дуготрајне, високе изложености радону процењује се кроз израчунату дозу за инхалацију. Годишња ефективна доза за одрасле услед удисања радона процењује се коришћењем следеће једначине (ICRP, 2018):

$$E = C_{Rn} \cdot DC \cdot T \quad (1.10)$$

где је:  $E$  годишња просечна ефективна доза (mSv) за одраслу особу;  $C_{Rn}$  аритметичка средина активносне концентрације радона у затвореном простору ( $Bq\ m^{-3}$ );  $DC$  коефицијент дозе за инхалацију  $^{222}Rn$  за просечну одраслу особу  $6,7 \cdot 10^{-6}\ mSv\ h^{-1}\ (Bq\ m^{-3})^{-1}$ , препоручен у публикацији 137 (ICRP, 2017), што одговара фактору равнотеже од 0,4 између радона и његових потомака за већину ситуација у затвореном простору;  $T$  време излагања током једне године: обично се узима 7000 h као време предвиђено за боравак у стамбеном простору, или просечно време проведено током спавања од 9 h, тј. 3825 h (Bertoni и др, 2022), или у радном простору 2000 h, подразумевајући радно време од 8 h.



**Слика 1.8** Процењени допринос глобалној изложености од различитих извора зрачења (UNSCEAR, 2008)

Годишња ефективна доза од 14 mSv процењена је за изложеност радону одрасле особе у кућним условима при горњој вредности нивоа радона ( $300\ Bq\ m^{-3}$ ), ICRP, публикација 126 (ICRP, 2014). Постоји потреба да се преиспитају вредности дозних коефицијената како би били прикладни и применљиви за прилагођавање у неслагањима код процене дозе. У Табели 1.7 дат је преглед различитих дозних коефицијената за израчунавање ефективне дозе које су препоручене публикацијама (DCF не подразумева фактор равнотеже од 0,4 између радона и потомака).

На основу прорачунате годишње ефективне дозе ( $E$ ) може се проценити ризик од настанка канцера током живота (excess lifetime cancer risk-ELCR) на основу следеће релације:

$$ELCR = E \cdot DL \cdot RF \quad (1.11)$$

где је:  $E$  годишња ефективна доза (mSv) за одраслу особу;  $DL$  је просечно трајање живота (процењено на 70 година);  $RF$  фактор ризика за стохастичке ефекте (фатални ризик од рака  $5,5 \cdot 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$ ) (ICRP, 2007).

**Табела 1.7** Различите вредности дозних коефицијента за израчунавање ефективне дозе ( $E$ ) од излагања радону

| DCF<br>$\text{nSv h}^{-1}(\text{Bq m}^{-3})^{-1}$ | DC<br>$\text{nSv h}^{-1}(\text{Bq m}^{-3})^{-1}$ | Референце                   |
|---------------------------------------------------|--------------------------------------------------|-----------------------------|
| 9 (распон 5-25)                                   | 3.6                                              | (UNSCEAR, 2000; 2006; 2010) |
| 12                                                | 4.8                                              | (ICRP, 2010)                |
| 16.75                                             | 6.7                                              | (ICRP, 2018)                |

## 1.7 Здравствени ризик од радона

Изложеност радону у ваздуху затвореног простора тема је здравствених прописа у многим земљама. Радон се сматра радиотоксичним и канцерогеним гасом који може утицати на квалитет ваздуха у затвореном простору. С обзиром да људи 80% времена проводе у затвореном простору (домови, радни простор), удисање ваздуха који садржи радон и продукте његовог распада, представља ризик по здравље.

Први извештај о појави канцера због радона описали су 1943. године Rajewsky и др, који су приметили појаву аденома плућа код мишева који су удисали радон. Године 1988. због утицаја на људско здравље, радон је класификован од стране Међународне агенције за истраживање рака (IARC, 1988) као хумани канцероген са генотоксичним деловањем. Светска здравствена организација означила је радон као други најчешћи узрочник рака плућа после пушења (WHO, 2009).

Постоје јаки квантитативни докази о вези између излагања радону и индикацији рака плућа из студија рудара у подземним рудницима и рудницима урана који су били изложени веома високим дозама радона, да су умирали од рака плућа много раније него општа популација. (UNSCEAR, 2008, 2019; ICRP, 2010; Laurier и др, 2020). Ове студије су дале зависност примљене дозе од појаве рака плућа. Епидемиолошке студије међу рударима у подземним рудницима и обједињене студије у стамбеним просторима пружиле су снажне доказе о ризицима од рака плућа након излагања радону и његовим потомцима (UNSCEAR, 2006; ICRP, 2010).

Светска здравствена организација је утврдила да је већина радоном изазваних карцинома плућа узрокована ниским и умереним концентрацијама радона, а не високим концентрацијама радона, јер је генерално мање људи изложено високим концентрацијама радона у затвореном простору (WHO, 2009).

Гасовити потомци у низовима урана и торијума: радон, торон и актинон се распадају у низ чврстих потомака који укључују радионуклиде који емитују алфа честице. Управо ови потомци испоручују већину (>95%) зрачења коју прима епител дисајних путева (ICRP, 2017). Опасност по здравље не долази директно од радона и торона, већ од њихових краткоживећих потомака који доспевају у човеков организам инхалацијом. Како је радон племенити гас са временом полураспада које је дуже од времена удисаја и издисаја, већина

удахнутог радона се поново издахне и не стигне да се задржи у плућима и ту распадне. Насупрот томе, краткоживећи потомци  $^{222}\text{Rn}$  ( $^{218}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Pb}$ ,  $^{214}\text{Bi}$ ,  $^{214}\text{Po}$ ) који теже да буду део кондензоване фазе, везују се за површине, типично за аеросоле, тако бивају удахнути, затим се таложе на епителним површинама у плућима и у кратком временском интервалу распадају. За разлику од радона, његови потомци нису гасови и лако се везују за прашину и друге честице које се транспортују ваздухом, и могу се удахнути. Пошто је време полураспада  $^{214}\text{Pb}$  мање од 27 минута, његов низ распада може бити завршен и пре него их нормални процеси респирације у плућима уклоне. Као резултат озрачења осетљивих површина бронхија, емитују се краткодметне алфа честице из распада изотопа  $^{214}\text{Po}$  и  $^{218}\text{Pb}$ ; трећи алфа изотоп, дугоживећи  $^{210}\text{Pb}$ , са полураспадом од 22,3 године релативно мало доприноси здравственим ефектима од радона. Производи распада радона се таложе на епителу респираторног тракта, што генерише оштећење ћелија ткива и потенцијално доводи до рака плућа.

Штета настаје када изотопи полонијума емитују алфа честице високе енергије. Већина алфа честица не може да продре у мртви спољашњи слој коже, али у плућима, оне могу продрети у осетљивије плућно ткиво. Алфа честице се крећу споро и таложе своју енергију на мањим растојањима. Када се сударе са незаштићеним плућним ћелијама, могу да прекину двоструки ДНК, реметећи његов генетски код. Ћелије су ефикасне у поправљању прекида у једном ланцу, али оштећења од прекида оба ланца могу бити трајна и могу се пренети на ћерке ћелије. Ефекти се можда неће видети годинама, или чак деценијама, али на крају оштећење доводи до тога да ћелије изгубе контролу над ћелијском деобом и растом што доводи до појаве рака.

Верује се да је у Европи 2% свих смртних случајева од рака у вези са излагањем радону (Darby и др, 2005). Излагање радону у Сједињеним Америчким Државама је годишње проузроковало приближно 21.800 смртних случајева изазваних рака плућа (BEIR, 1999). Неке студије случаја контроле радона у резиденцијалним условима у Северној Америци показале су директну повезаност између продужене изложености радону и рака плућа (Field и др, 2006). Недавна студија је установила да више од 150.000 мушкараца и жена у Сједињеним Америчким Државама умире од рака плућа сваке године, подстичући свест о тестирању радона, ублажавању и на смањењу смртних случајева од рака плућа (Neri и др, 2018). Неке студије радона у води за пиће повезују га са повећаним ризиком од развоја других карцинома органа, првенствено рака желуца (Bräuner и др, 2010).

Високи нивои радона, који се углавном појављују у затвореном простору, могу изазвати штетне здравствене ефекте након дуготрајног излагања. Раније епидемиолошке студије су потврдиле везу између резиденцијалног радона и ризика од рака плућа, истичући да повећање концентрације радона у затвореном простору за  $100 \text{ Bq m}^{-3}$  изазива повећање ризика од рака плућа за 16% (Darby и др, 2005; Krewski и др, 2005; Krewski и др, 2006). С друге стране, неки аутори су објавили да се рак плућа повезан са радоном може спречити у 35-40% случајева ако се ниво радона у стамбеним зградама смањи испод  $100 \text{ Bq m}^{-3}$  (Axelsson и др, 2015). У Ирској, код људи који су живели у области у којој је у 10-20% случајева радон у домовима изнад  $200 \text{ Bq m}^{-3}$  процењене су 2,9-3,1 пута веће шансе за дијагностику рака плућа, у поређењу са онима који су живели у областима где је у мање од 1% кућа измерена концентрација радона изнад  $200 \text{ Bq m}^{-3}$  (Dempsey и др, 2018). У Француској, стопа смртности од рака плућа изазвана излагањем радону, се процењује на око 5-12%. У другим земљама, као што су Канада, Немачка и Швајцарска, проценат смртних случајева од рака плућа који се могу приписати изложености радону процењује се на око

7,8%; 5% и 8,3%, респективно (WHO 2009). У Италији, је процењено око 10% смртних случајева од рака плућа који се могу приписати изложености радону (Bohicchio и др, 2013). Веза између изложености радону и хроничне опструктивне болести плућа потврђује се повећањем стопе морталитета; коефицијент опасности на  $100 \text{ Bq m}^{-3}$ , 1,13; 95% CI:1,05-1,21 (Turner и др, 2012).

## 1.8 Мере за ублажавање високих концентрација радона

У циљу смањења концентрације радона у зградама, могу се предузети неке од следећих техника и општих поступака:

- уклањање извора зрачења (замена елемената и материјала);
- затварање путања земног гаса у зграду, извођење препрека између извора радона и просторије - заптивање свих отвора и пукотина у преградама, облагање фолијама или вишеслојно премазивање површина преграде;
- појачање вентилације: вентилација потпорне конструкције; вентилација испод доње плоче подрума са системом перфорираних цеви повезаних са димњаком; вентилација и подешавање ваздушног притиска унутар зграде да би се смањила или преусмерила сила која потпомаже улазак земног гаса;
- пречишћавање ваздуха електростатичким и електронским пречишћивачима којима се концентрација радона може снизити вишеструко;

Пре одлуке о примени ремедијације неопходно је идентификовати врсту куће, изабрати одговарајуће мере, и детаљно проучити практична конструкцијска решења. При избору одговарајућег решења за смањење радона, различите конструкције кућа се могу груписати у четири типа (Слика 1.9):

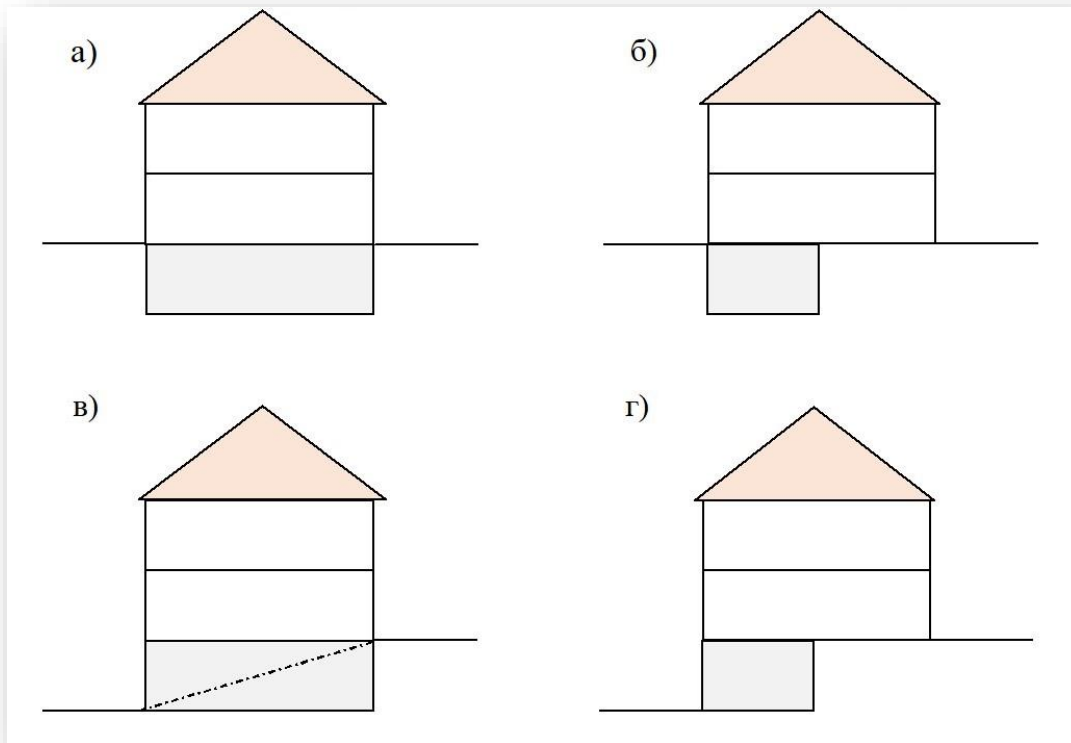
- тип 1: куће са пуним, делимичним или полуподрумима;
- тип 2: куће са пуним или делимичним подрумима (сутереном);
- тип 3: куће са полуподрумима и
- тип 4: куће степенасте конструкције.

Подруми (оставе) су области стамбених јединица које се ретко користе за становање а служе углавном за дугорочно складиштење и одлагање ствари и намирница. Обично су недорађени, имају лошу завршницу и веома слабу проветреност. Зидови подрума служе као потпорни зидови који су потпуно укопани у земљу. Уколико се овакви простори користе за становање, обично су комплетно довршени и обезбеђени системом грејања (Слика 1.9а). Потпуни или делимични подруми или оставе могу се простирати испод целе основе објекта или само једним мањим делом (Слика 1.9б). Полуподруми или сутерени имају најмање један или више зидова који нису укопани и не играју улогу потпорног зида (Слика 1.9в). Куће степенасте конструкције смештене су на косини чије су ниже просторије једним делом укопане у нагнуто тло формирајући тако делимичан полу-подрум (Слика 1.9г).

При пројектовању нових зграда концентрација радона се може смањити:

- постављањем додатне арматуре у плочу и зидове ради спречавања настанка пукотина;
- посебном обрадом спојева између плоча и зидова као и места уласка цеви у зграду;
- избегавањем употребе шупљих бетонских блокова, због израженог ефекта димњака;

- облагањем делова објекта укопаних у земљу чепастим фолијама, битуменским мембранама и водоотпорним премазима (цементни хидроизолациони премази).



**Слика 1.9** Различити типови подрума а) подрум потпуно смештен испод површине земље; б) делимичан подрум потпуно смештен испод површине земље; в) полу-подрум; г) степенаста конструкција

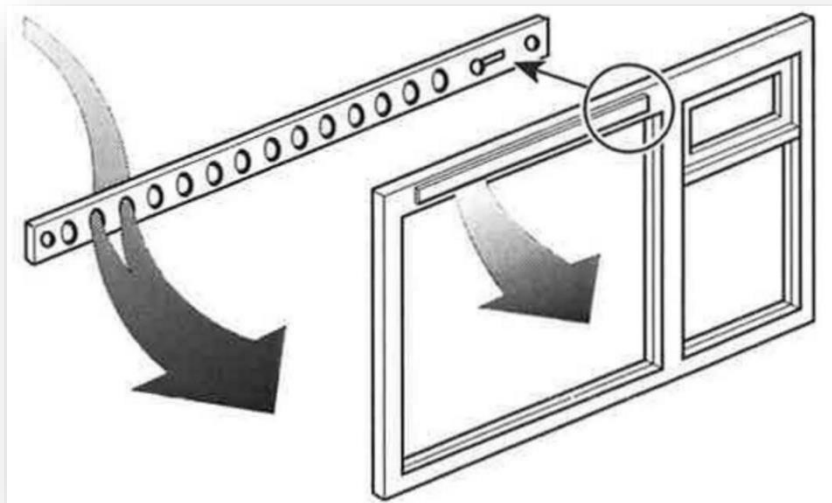
### 1.8.1 Природна и форсирана вентилација

Вентилација, било механичка (форсирана) или природна (отварањем прозора), је једноставна мера и показала се као доминантан антропогени фактор у контроли нивоа радона у затвореном простору (Abdo и др, 2021; Ashok и др, 2012; Misdaq и др, 2002), а чак је и ефикаснија од коришћења грађевинског материјала са ниским садржајем урана и торијума (Ashok и др, 2012).

Уколико је режим дотока радона активан, а вентилација неуравнотежена, може се очекивати повећање концентрације радона у затвореном простору са брзином вентилације (Nazarof и др, 1985). Међутим, у зимском периоду више свежег ваздуха захтева појачано грејање, што утиче на веће економске трошкове услед сталног протока незагрејаног ваздуха (Katona и др, 2005). У већини случајева подруми кућа нису довољно проветрени. Већина њих нема довољан број отвора, а и ако их има, они су махом блокирани и нефункционални. То је главни разлог за смањење квалитета ваздуха у подрумима.

За нивое радона од  $400-500 \text{ Bq m}^{-3}$ , повећана природна вентилација може бити решење које треба размотрити. Препоручене радње уз повећање природне вентилације, тамо

где је концентрација радона на референтном нивоу, укључују уградњу проточних вентилатора на оквиру прозора (Слика 1.10), затварање димњака и избегавање отворене ватре. Ове мере ће вероватно имати само скроман утицај на снижавање нивоа радона у затвореном простору.



**Слика 1.10** Проточни вентилатор за прозор

Механичка филтрација кућног ваздуха има додатне здравствене предности у смањењу прашине која садржи производе распада радона. Иако ваздух у домаћинству треба да се освежава споља, отварање врата и прозора (пасивна вентилација) не би требало да буде трајна стратегија ублажавања, јер је ефикасна само ако концентрација радона није значајно висока. Ово би требало да буде једноставна пракса све до момента док се не омогући инсталирање вентилационих система. Кретање ваздуха од 1,5-2 измене на сат би било идеално за разблаживање гаса радона у собној атмосфери (Kladder, 2011; Larsson, 2014).

Форсирана вентилација која обезбеђује адекватну обнову ваздуха била би ефикасна у зградама са великом разликом између унутрашњег и спољашњег притиска и за веома велике зграде које се налазе испод нивоа земље, где нема директног приступа између преграда и споља (Nunes и др, 2024). Ако је ниво радона изнад  $400\text{--}500 \text{ Bq m}^{-3}$  и под подрума доброг квалитета, односно нема видљивих напуклина, систем форсиране вентилације је вероватно најпогоднија опција.

### 1.8.1 Заптивање

Заптивањем зидова и подова који су у контакту са земљом се може спречити да радон продре кроз пукотине и празнине у њима. Неопходно је пронаћи све пукотине и затворити их уколико се жели постићи потпуна ефикасност примењене мере. Зидови се могу заптивати коришћењем заптивача на бази песка/цементног малтера. Међутим, зидови у подруму су обично лоше изграђени или лоше завршени, што омогућава много

потенцијалних путева уласка радона. На пример, често се дешава да су спојеви малтера лоше попуњени или су се временом распали. У тим случајевима биће потребни озбиљнији радови на заптивању, као што су премазивање, малтерисање или глетовање зидова. Ово би такође могло побољшати заштиту подрума од влаге.

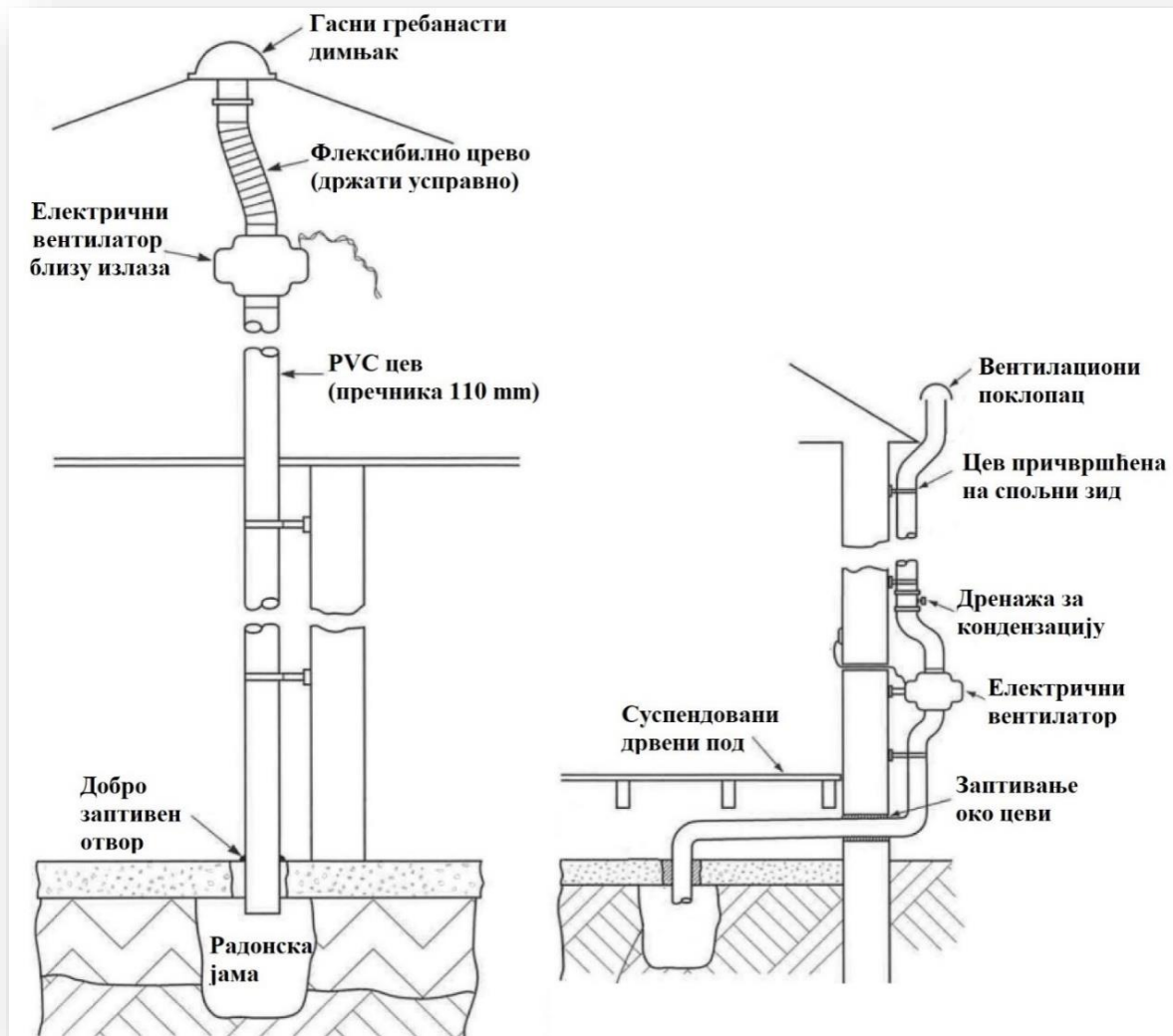
Где се подрум налази испод дела куће, често је случај да су суседни приземни подови израђени од дрвених конструкција. Велике празнине или рупе у viseћим дрвеним подовима могу бити запечаћене. Међутим, потпуно покривање дрвеног пода непропусном фолијом као што је полиетиленска плоча се не препоручује, јер потпуно заптивање дрвеног пода може довести до труљења дрвета. Проблем је још и у томе што је често простор испод пода повезан са подрумом преко отвора који су остављени између греда које леже на врху подрумског зида. У таквим случајевима може бити корисно заптити те отворе коришћењем цигле или блокова. Међутим, важно је не затварати отворе који имају за циљ да обезбеде вентилацију подрума, или уређаја за сагоревање као што је котлао, осим ако није обезбеђен алтернативни извор вентилације (Scivyer и Jaggs, 1998).

### 1.8.2 Мера снижавања притиска (депресуризација)

Разлика између спољашње и унутрашње температуре, брзине ветра, правца ветра и неуравнотежене механичке вентилације изазива депресуризацију која утиче на концентрацију радона у затвореном простору (Keskikuru и др, 1999). Проток ваздуха који садржи радон такође зависи од смањења притиска и вентилације (Arvela и Winqvist, 1989).

Повећање концентрације радона постаје значајно када разлика у притиску прелази 5 Pa (Kokotti и др, 1995; Kokotti и др, 1996). Међутим, повећање притиска од преко 10 Pa заједно са вишим брзинама размене ваздуха доводи до смањења концентрације радона на радним местима (Korhonen и др, 2000a). Смањење нивоа радона, радонових потомака и честица постиже се системом врата са вентилатором које побољшава разблаживање, повећаном инфилтрацијом ваздуха услед смањења притиска од преко 10 Pa па и до 28 Pa (Korhonen и др, 2000b).

Тамо где су бетонски приземни подови може се извући ваздух обогаћен радоном испод пода (смањивање притиска у тлу) коришћењем радонске јаме. Ово је генерално најефикаснији метод и у многим случајевима ће смањити ниво радона на мање од једне десетине првобитног нивоа и представља једино решење за концентрацију радона изнад  $1200 \text{ Bq m}^{-3}$ . Једноставна мини јама се може направити пробијањем рупе у бетонском поду пречника приближно 130 mm. Она се потом повеже системом PVC цеви пречника 110 mm, и на месту излаза се добро заптива. Одводна цев се може спровести уз спољашњи зид куће, или кроз отворе унутар куће. На цевовод се потом прикључи вентилатор који ће одводити ваздух изван објекта. Овакав систем се може прилагодити већини кућа са различитим нивоима у зависности од типа конструкције (Слика 1.11) (Scivyer и Jaggs, 1998). Неки аутори су дали предност активним системима притиска и смањења притиска у земљи у односу на стандардне технике вентилације (Cosma и др, 2013). Корективне мере ублажавања нису увек ефикасне у смањењу нивоа радона испод вредности од  $300 \text{ Bq m}^{-3}$ , али су неопходне јаче корективне мере када концентрација активности радона прелази  $1000 \text{ Bq m}^{-3}$ .



**Слика 1.11** Активни систем потпритиска са унутрашњом (лево) и спољашњом (десно) постављеном одводном цеви

У постојећим кућама флуks радона зависи од конструкције и вештачки измењеног грађевинског тла насталог засипањем. За изградњу нових кућа опет важе ови параметри који се не могу унапред прецизно предвидети (Kemski и др, 2008). Многе студије су показале да су превентивне мере приликом изградње исплативе и ефикасне у заштити од радона. Мере ублажавања у постојећим објектима генерално су мање исплативе, јер су трошкови уградње система за депресуризацију под плочом након завршетка градње много већи и мора се испитати цела основа објекта да би се идентификовали они делови са повишеном концентрацијом радона, како би се накнадно приступило мерама (Gaskin и др, 2019; Pollard и Fenton 2014, Svensson и др, 2018).

### 1.8.3 Заштитне баријере

Како би се задовољила све већа потреба за решењима у циљу ублажавања нивоа радона, а истовремено због све нижег прага које законодавство Европске уније има за циљ, скорија истраживања о новим материјалима за радонске баријере могла би бити реализована као једна од ремедијационих мера. Ефикасан начин да се избегне инфилтрација радона у зграду и да се контролише концентрација радона у унутрашњем ваздуху је комбиновање три критеријума пројектовања (Rasmussen, 2016):

- 1) радонска баријера,
  - a) као непропусна конструкција према земљи или
  - b) као радонска баријера постављена у земљу испод зграде;
- 2) снижавање ваздушног притиска на капиларној баријери у доњој зони плоче окренутој према земљи, и
- 3) ефективно разблаживање унутрашњег ваздуха спољним ваздухом.

На овај начин се концентрација радона у унутрашњем ваздуху зграде може контролисати и одржавати на прихватљивом нивоу.

Најпогоднија радонска баријера зависи од грађевинске статике поједине зграде. Захтеви за постављање радонске баријере могу се дефинисати у зависности од нивоа радона у земљи и потребе за његовим смањењем. У неким случајевима може се користити дифузионо непропусна и херметичка радонска баријера, а у другим случајевима се преферира мање херметичка, али дифузионо отворена баријера. Избор баријере зависи од нивоа влаге у темељима зграде. Важно је одабрати баријеру која је довољно херметичка да може представљати потребну радонску баријеру и истовремено допринети грађевинској статистици зграде (Rasmussen, 2016).

Детаљна анализа података 650 хидроизолационих материјала широко распрострањених у комерцијалној продаји, показала је да грађевинска тржишта широм света нуде стотине хидроизолационих материјала различитих хемијских састава са вредностима отпорности на радон реда  $10^1$ - $10^5$   $\text{Ms m}^{-1}$ . Ови материјали могу истовремено да обезбеде довољну заштиту од влаге у земљишту, од подземних вода и од радона. Нема потребе за развојем нових хидроизолационих материјала посебно дизајнираних против радона, јер више од 95% постојећих хидроизолационих производа задовољава најмањи строги захтев за минималну отпорност на радон од  $7 \text{ Ms m}^{-1}$ , што је прописано новоуведеном методом за пројектовање изолација отпорних на радон (Jiránek и Kačmaříková, 2019). Показано је да мембрана од битумена дебљине 3,8 mm при дифузионом коефицијенту радона од  $1,7 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  показује минималну отпорност на радон од  $300 \text{ Ms m}^{-1}$ , док се иста отпорност постиже полиетиленском фолијом високе густине (HDPE-High Density Polyethylene) дебљине 1,3 mm при коефицијенту дифузије радона од  $4,7 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  (Jiránek, 2017). Разне пластичне фолије су такође проучаване у лабораторији ради тестирања њихове способности да ометају гас радон. Утврђено је да већина фолија спречава продор радона у значајној мери (79–94%). Полиетиленска фолија високе густине и дебљине 235  $\mu\text{m}$  смањује концентрацију радона за 94% и стога представља ефикасну баријеру за еманацију гаса радона (Singh и др, 2005).

Коришћење баријерних мембрана, чак и у екстремним ситуацијама са веома високим концентрацијама радона у затвореном простору, може значајно смањити концентрацију радона. Добијени резултати у студији коју су спровели (Nunes и Curado, 2023) показали су да је баријерна мембрана смањила концентрацију радона у затвореном простору за 90%.

Међутим, ниво изложености радону је остао виши од препорученог нивоа који би омогућио безбедно становање и редовно коришћење простора.

### 1.8.1 Анти радонски премази

Анти-радонски премази су углавном састављени од елементарних материјала, материјала који формирају филм, пунила, разних адитива и одговарајућих количина воде. Да би се побољшала перформанса анти-радонских премаза и испунили захтеви за смањење радона у грађевинском инжењерингу подрума и подземних етажа, као елементарни материјал за борбу против радона одабрани су ултрафини  $\text{SiO}_2$ . Као материјал за формирање филма, који је важан састојак премаза, бира се посебно модификована полимерна емулзија која има низак садржај органских материја и добру механичку стабилност. Као пигмент користи се титан-диоксид, а као пунило тешки калцијум-карбонат. Остали адитиви укључују хидроксипропил метилцелулозу (као згушњивач, диспергатор и стабилизатор за побољшање перформанси премаза), средство за уклањање пене (за елиминацију пене латекса), антисептик, бактерицид и адитив за брзо сушење (пепео-калцијум-прах) (Liangliang и др, 2022). Производња премаза обично се састоји од четири корака: дисперзија пунила пигмента, млевање, наношење и филтрациона инкапсулација (Singh и др, 2005). Међутим, производња анти-радонског премаза се разликује од производње обичних премаза јер захтева висок удео полимерних емулзија. Функционални елемент материјал за борбу против радона, титан-диоксид у праху, пажљиво је мleven са тешким калцијумом и другим пигментима пре него се примени као боја за зид, чиме се постиже сушење које одговара захтевима за примену у подземном влажном окружењу.

Синтетичка смола и полимер са силиконом су обезбедили смањење радона у затвореном простору од приближно 80%, док је HDPE мембрана обезбедила између 52% и 62% смањења. Производи од битумена, мембране на бази полиурее и полиуретанских полимера су обезбедили релативно смањење концентрације радона између 18 и 41% (Daraktchieva, 2021). Ово понашање није сасвим појашњено, али зависи од хемијског састава производа, и у вези је са њиховом структуром и порозношћу. Истовремена употреба мембрана и форсиране вентилације утиче на смањење радона услед повећања натпритиска у просторији како се проток ваздуха повећава. За производе са највећим капацитетом да изолују просторију овај ефекат је мање значајан, јер се радон који ексхалира из зидова просторије првенствено избацује напоље. На основу тога могуће је постићи приближно исти резултат без укључивања вентилације, уз евидентну уштеду енергије и избегавање буке (Portaro и др, 2023).

Једна студија је утврдила да облагања површине узорка радонски активне стене блатом повећава ексхалацију радона, док гипсани премаз од цемента и креча смањује ексхалацију радона за око 15% (Singh и др, 2005). Правилним избором боја и директним наношењем на еманирајуће медије може постићи смањење ексхалације радона од 25%.

### 1.8.2 Замена прозора, подова и постављање фасаде

Са увођењем прозора високих перформанси и других архитектонских и грађевинских решења, ваздушна пропусност омотача зграде нагло се смањује. Поред

ефективног смањења ваздушне пропустљивости омотача зграде, стварају се услови за смањење брзине вентилације и повећање бројних загађивача ваздуха који се стварају у затвореном простору. Повећана акумулација радона као резултат смањења брзине вентилације у савременим зградама пријављена је у различитим истраживањима у многим земљама, и захтева детаљно разматрање (Milner и др, 2014).

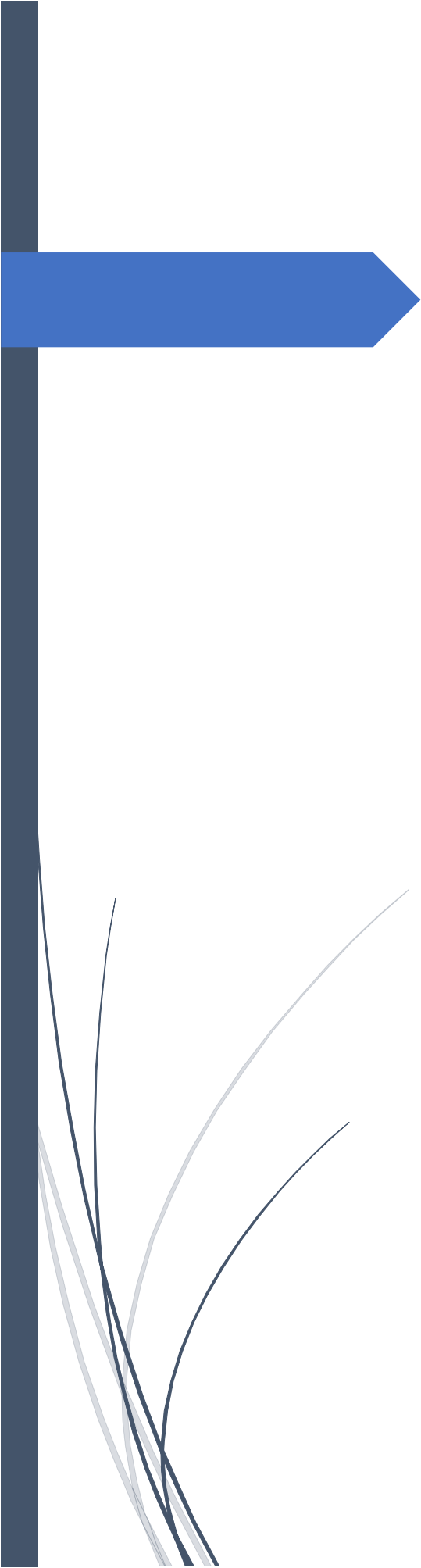
Студија на 40 000 станова у Енглеској показала је да су у домовима са дуплим стаклом концентрације радона 66% веће од оних без њих (Hunter и др, 2009). Потпуно двоструко застакљивање прозора повећава концентрацију радона у затвореном простору за 55% (Gunby и др, 1993). Двоструко застакљивање, изолација зидова и поткровља повећавају ниво радона у затвореном простору за 67%, 47% и 32%, редом (Symonds и др, 2019).

Старији станови имају више пукотина и отвора у темељима, неки од њих су изграђени са подрумима који омогућавају да више радона уђе у дом. Међутим, иако старије зграде увлаче више радона у животне просторе у приземљу него новије зграде, нивои радона у собама на спрату су много нижи. Могући разлог може бити да мање херметички затворена врата и прозори омогућавају да ваздух богат радоном у собама на спрату буде замењен са више свежег ваздуха споља (Daraktchieva, 2021).

Да би се задовољила политика смањења потрошње енергије у згради, постојећи (углавном дрвени) прозори се обично замењују прозорима од поливинилхлорида (PVC) како би се спречило цурење ваздуха. Заштита зидова унутрашњом или спољашњом топлотном изолацијом такође прати реновирање старих зграда, иако је разблаживање спољним ваздухом ефикасније код мање непропусних зграда (Korhonen и др, 2000b). Сходно томе, термичка реконструкција прозора, кровова, зидова и подова обично је повезана са повећаним нивоом радона.

Студија из 2014. године забележила је просечно повећање нивоа радона од 63% у унутрашњости вртића после извршене замене прозора (Fojtikova и Navratila Rovenska, 2014). Варијације загађивача у затвореном простору углавном су под утицајем варијација метеоролошких параметара, утицаја обнављања ваздуха и нивоа смањења притиска унутар објекта (Collingnan и др, 2020). Фактори као што су тип пода, конструкција куће такође утичу на путеве и изворе који могу довести радон у затворен простор. Утврђено је да нивои радона, торона и потомака у затвореним просторима варирају у зависности од врсте пода, крова а такође зависе и од старости зграде (Firoozabadi и др, 2016; Barros-Diosa и др, 2007; Sathish и др, 2009) .

Облагање фасада има за циљ повећање топлотне отпорности омотача зграде; међутим, они такође смањују брзину вентилације омогућавајући акумулацију радона и других загађивача који се производе из унутрашњости. Резултирајуће смањене брзине протока ваздуха због изолације може довести до одржавања негативног градијента притиска између унутрашњег и спољашњег простора који увлачи више ваздуха кроз под. Силазно струјање може имати мањи ефекат, пошто спречава радон да напусти домове, у неким случајевима може деловати и као препрека за улазак радона. На пример, ако реконструкција укључује постављање лесонита преко дрвених подова и примену заптивања на лајснама, то може имати повољан утицај на смањење нивоа радона, док друге врсте заштите од силазног струјања могу бити штетне (Symonds и др, 2019).



## **2 ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ДЕО**

## 2.1 *Полазне основе, предмет и циљ истраживања*

Истраживање у овој дисертацији се темељи на Директиви Европског савета из 2013. године (European Council Directive 2013/59/Euratom), којом се успостављају основни сигурносни стандарди за заштиту здравља становништва и радника услед излагања јонизујућем зрачењу (European Council, 2014). С обзиром да је резултатима истраживања ранијих студија утврђено да постоје повишене вредности концентрације радона у неким стамбеним објектима у региону Косовске Митровице, ово истраживање има за циљ да укључи већи број објеката, идентификује објекте са повишеним концентрацијама радона, да анализира могуће узроке високих концентрација повезане са геологијом, метеоролошким параметрима, применом мера енергетске ефикасности и предложи мере ремедијације за изабрану тест кућу.

Хронична изложеност становништва високим концентрацијама радона у стамбеним условима, као што су рударска подручја, повезана је са повећаним ризиком од појаве рака плућа. Нека новија истраживања наводе да продужено излагање ниским концентрацијама радона, такође повећава ризик од карцинома плућа, а излагање високим концентрацијама у комбинацији са пушењем повећава ризик значајно више, него ови фактори појединачно (WHO, 2009).

Референтни нивои за постојеће ситуације изложености радону одређују се у смислу концентрације активности радона у ваздуху из Члана 74. за становништво и Члана 54. за раднике (European Council, 2014). Према овим члановима, референтни ниво годишње просечне концентрације активности радона у ваздуху не сме бити већи од  $300 \text{ Bq m}^{-3}$ , осим у случају специфичних националних околности. Уколико држава чланица пропише референтни ниво виши од предложеног, дужна је да о томе обавести Европску комисију (European Council, 2014).

Директивом се предлаже да свака држава чланица приступи изради националног акционог плана, за решавање дугорочних ризика од излагања радону, у стамбеним зградама, зградама с јавним приступом и на радним местима од било којег извора уласка радона, било из тла, грађевинског материјала или воде (Члан 103. Директиве Европског савета). Државе чланице су дужне да промовишу акције за идентификацију региона и објеката, врста радних места и зграда с јавним приступом где су мерења неопходна ради процене ризика, подстичу техничка и друга решења као мере за смањење концентрације радона у објектима. Државе чланице треба да обезбеде доступност локаних и националних информација о спроведеним мерама. У испитиваним подручјима би се од правних субјеката захтевало опсежније праћење и мерење концентрације у свим приземним, подрумским просторијама, вршиле би се одређене обуке, примењивале превентивне мере и др.

Људи у просеку 80% времена проводе у затвореном простору, укључујући радна места, вртиће, школе и јавне зграде, и уопште затворен простор у коме су изложени радону. Стога проблем идентификације радона у затвореном простору представља мотивацију у смислу радиолошке заштите и управљања здрављем појединца као и читаве заједнице. Идентификовање што већег броја објеката, извора и фактора који доводе до високе концентрације радона у затвореном су од суштинског значаја у будућим политикама, кроз акционе планове који се фокусирају на ограничавање изложености људи радону у затвореном простору.

Светска здравствена организација је предложила да нивои радона у стамбеним објектима буду ограничени до  $100 \text{ Bq m}^{-3}$ , као национални референтни ниво, који је оправдан из перспективе јавног здравља, али се овај ниво не може применити у многим земљама (WHO, 2009). У Републици Србији акциони нивои за хронично излагање радону у становима одговарају просечној годишњој концентрацији од  $200 \text{ Bq m}^{-3}$  у ваздуху у новоизграђеним стамбеним објектима и  $400 \text{ Bq m}^{-3}$  у ваздуху у постојећим стамбеним објектима и објектима старе градње (Službeni Glasnik, 2018). Међутим ови нивои морају бити усклађени са основним европским безбедносним стандардима (European Basic Safety Standards EU-BSS).

На основу свега наведеног, предмет овог истраживања је:

- Мерење концентрације радона у објектима у околини рударског комплекса „Трепча“, где се очекује да су природни радионуклиди присутни у повишеним концентрацијама;
- Идентификација објеката са високим вредностима концентрације радона које се доводе у везу са повећаним ризиком од појаве рака плућа;
- Утврђивање нивоа радона у затвореном простору након примене мера енергетске ефикасности;
- Утврђивање садржаја радионуклида у земљишту и стенама, који су главни извори радона;
- Примена различитих техника мерења у откривању извора радона у затвореним просторијама.

Према предмету рада, постављени циљеви су:

- Проценити ефективну дозу и ризик за становништво услед излагања високим концентрацијама радона;
- Анализирати утицаје геогених фактора (геотектонске структуре, зоне раседа, садржаја радионуклида у земљишту), метеоролошких параметара и грађевинских материјала (садржаја радионуклида у камену коришћеном за изградњу) на нивое радона у објектима;
- Проценити геогени потенцијал истраживаног региона;
- Идентификовати факторе који утичу на високе концентрације радона у енергетски реновираним радним објектима;
- Развити мере радијационе заштите: израдити протокол за смањење вредности концентрације радона на референтни ниво у складу са препорукама, применити одговарајуће мере санације и ремедијације у просторијама, реновирањем постојећих објеката са високим концентрацијама радона.

Радон се може накупити у ваздуху било које куће или зграде (без обзира да ли је нова или старија, добро заптивена или постоји цурење ваздуха) ексхалацијом из земљишта испод објекта или ексхалацијом из грађевинског материјала. Резултирајућа концентрација радона у затвореном простору у зградама је функција природних и антропогених фактора ( типови конструкције: стање и старост зграде, коришћени грађевински материјали, присуство подрума или не, и животне навике становника: степен вентилације, врста грејања и климатизације итд.) и стога је временски променљива и јединствена за сваку конкретну кућу или зграду. С тим у вези је пожељно спровести и студије процене утицаја процеса реновирања стамбених објеката на концентрацију радона у школским зградама и извршити процене изложености радону након примене мера енергетске ефикасности у доступним објектима (термална изолација, замена прозора, подова, итд.).

## 2.2 *Подручје истраживања и геологија*

### 2.2.1 Географске карактеристике места истраживања

Косовска Митровица са ужом околином обухвата територију од око 154 km<sup>2</sup>. Смештена је на најсевернијем пределу Косовског басена, у подножју вулканске купе Звечана, на месту где Ибар ствара познату кривину пре него што формира други део своје клисуре.

Косовскомитровачки басен представља северну природну границу Косовске котлине, јер одатле почиње пружање планина Копаоничког система, Рогозне и Мокре Горе. Тако је топографски положај града делимично у косовскомитровачком басену, на алувијалном пољу река Ибара, Ситнице и Љуште, као и на косама које га окружују. Као микрорегионални део косовског басена, косовскомитовачко поље је на северу затворено доминантним вулканским брдима Звечана (799 m), Малог Звечана (750 m), Кукавичком косом Партизанско брдо (550 m), Соколицом (918 m) и планином Мајдан (1268 m). На истоку се граничи брдом Лисица (665 m), на југоистоку Црнушом, а на западу брдом Змича (822 m) и Грмова (782 m). На јужној страни од косовског басена одваја га туфоидна коса Баира (520 m). Поменуте коте су доминантне тачке уже околине Косовске Митровице.

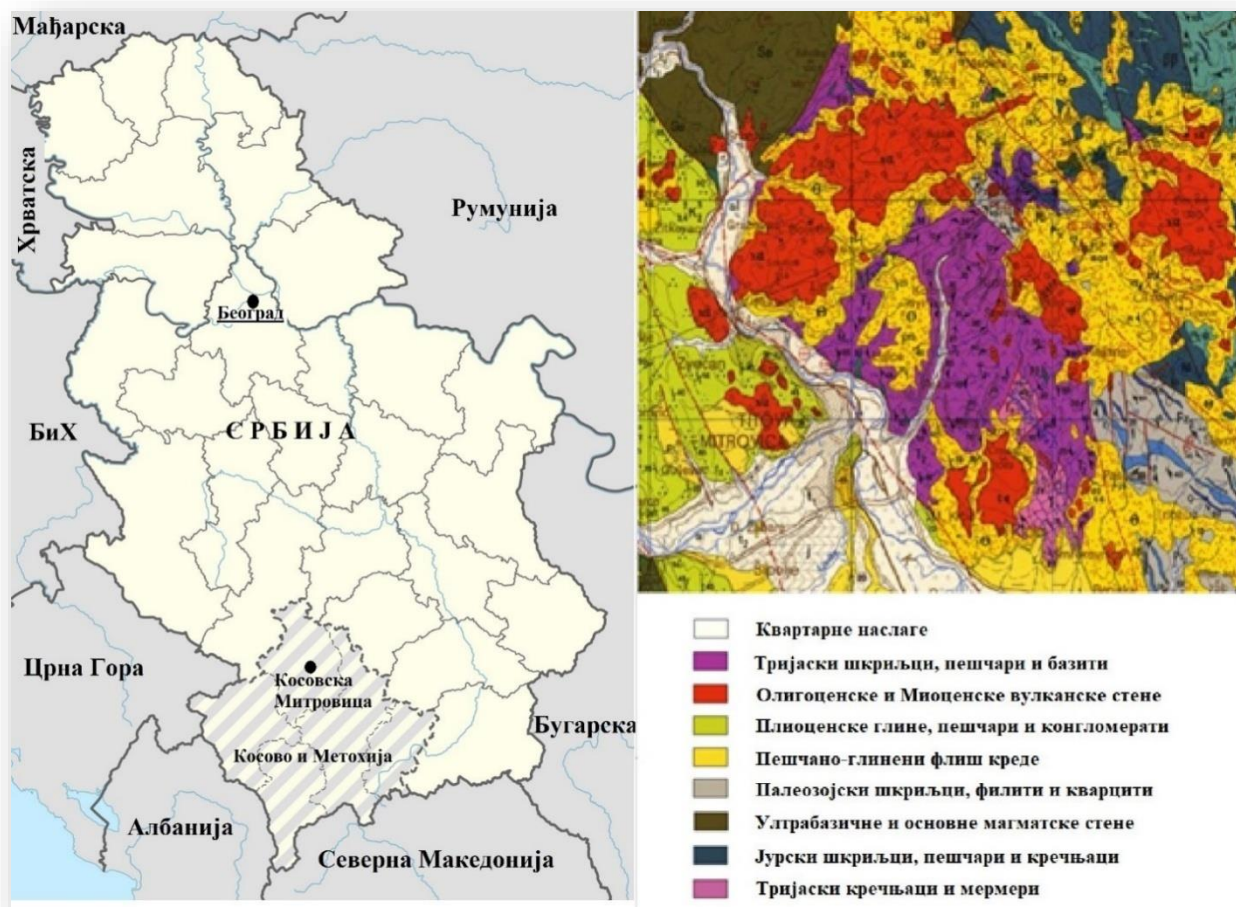
Рељеф околине Косовске Митровице састоји се од неколико целина. Категорији брдског и планинског рељефа припада скоро 4/5 површине, те је зато ово више планинско него равничарско подручје (Вагац и др, 2010).

### 2.2.2 Геолошке карактеристике истраживаног простора

У геолошком и морфолошком погледу територија околине Косовске Митровице припада динарском систему, али прожетим системом старих копаоничких стена (Слика 2.1). Велика тектонска померања и интензивни терцијални вулканизам узроковали су преображај структуре. Најстарији облици набора су настали после креде, док се претпоставља да први облици набора припадају херцинској орогенези, заједно са формирањем иницијалног магматизма старог палеозоица. Током херцинске орогенезе настаје метаморфоза првих стена које, претварајући се у шкриљце, формирају огромне интрузије ултрабазичних слојева, већином перидотних и габро базичних стена. Каснија тектонска померања као и спољни фактори, створили су метаморфне стене серпентина зелених или црних боја, које у последњој фази растварања прелазе у белу боју. Серпентини су обично носиоци азбестног минерала који се формирају од хидротералних интрузија у поменуте стене. Сем азбеста, у серпентинама се местимично стварају и хромити од магме, издвојене путем течних средстава. Тако, у близини села Рујиште леже дебели слојеви азбеста, а близу Јагњенице налазе се хромне насlage (Novović и Vitić, 1956).

Међутим, највећи део тла околине Косовске Митровице припада старијем периоду креде, чији се највећи део састоји од флиша, из времена када је вршена трансгресија ондашњег мора које је покривало највећи део овог краја. Током овог раздобља наслагани су дебели слојеви шљунка, глине, лапорца, кречњака, који имају различите положаје и налазе се изнад серпентина.

Еруптивне стене праћене великом вулканском активношћу створене су током олигоценске орогенезе. У том периоду избијале су густе масе трахитно-андезитних ерупција заједно са вулканским туфом. Интрузије поменутих ерупција постоје на неколико места; на купи Звечан, пробиле су кредне и серпентинске слојеве. Такође се појављују у близини села: Горње Кориље, Валач, Грабовац, Видомирић, Соколица, Мали Кичић, Засело, Лисице и др (Dimitrijević, 1997). Квартарни седименти у околини Косовске Митровице налазе се у алувијалним и дилувијалним хоризонтима, у слојевима муља, песка и шљунка. Иначе алувијални слојеви чине речне терасе Ибра, Ситнице, Љуште и њихових притока.



**Слика 2.1** Геолошка карта истраживаног подручја (Geološki atlas Srbije, 2002)

Да би се схватила комплетна генеза морфологије околине Косовске Митровице, треба истаћи фазу формирања Косовског језера након терцијарних ерупција и спуштања тла у овом кају. Након стварања косовског басена, настаје фаза стварања језера. Плиоценско језеро покривало је велики део околине Косовске Митровице до висине од 800 m. Лимничке фазе могу се запазити и данас, нарочито оне код Звечана, Соколице, Црнуше и Чичавице. Косовско језеро је у овом крају продирало дубоко, стварајући бочне заливе. Највиши ниво је био у долини Бањске реке, где су се одржале и његове терасе. Претпоставља се да је данашњом Ибарском долином, у својој највишој фази (терасе од 750-800 m), поменуто

језеро било спојено са Панонским језером, али ипак шире везе имало је за Егејским језером и то преко Качаничке клисури. Пре него да створи своју клисуру, Ибар се северно од Косовске Митровице уливао у Косовско језеро, које је истекло у периоду горњег дилuviјума. Претпоставља се да је највећа количина воде текла качаничком клисуром у Вардар, односно у Егејско море, док је извесна количина, пробијањем Звечанске и Соколичке клисуре и стварањем кривине на дну језера, истекла у Мораву а затим у Црно Море, стварајући тиме природну пиратерију. Тло вододелнице између два мора налазило се 90 km северније, близу села Дрен, у средњем току данашњег Ибра (Cvijić, 1911).

Интензивна магматска и тектонска активност у прошлости изазвала је различита вертикална кретања, формирајући мрежу сеизмогених раседа. Дубоки Ситнички расед простире се у правцу северозапад-југоисток пратећи речну долину; ово је један од праваца простирања младих (неотектонских) раседа (Geološki Atlas Srbije, 2002; Dimitrijević, 1997). Према Европској мапи сеизмичког хазарда, која приказује подрхтавање тла (у смислу јединичног гравитационог убрзања, g) овај регион је класификован као подручје умерене активности (Giardini и др, 2013).

### 2.2.3 Клима

Климатски услови Косовке Митровице и околине су резултат различитих утицаја. Гледано у целини, као део Косова, околина града има континенталну климу са неприметним прелазима у годишња доба, осим прелазних дана од пролећа у лето. С друге стране, морфолошка и теренска хетерогеност врши непосредан утицај на многе климатске елементе, чиме се мењају њихове опште карактеристике. Познато је да се на територији Косова врше фронтални додири континенталних и средоземних струја. Прве изазивају снижење температуре, а друге доносе топлоту. Ибарска клисура с једне стране (Горњи Ибар) омогућава продор западних и северозападних морских струја, које обично доносе падавине, док кроз његову доњу клисуру врше продор северне континенталне струје. Са планина, које окружују Косовску Митровицу, током целе године спуштају се хладне, односно свежије струје у правцу басена (града). С друге стране, кроз Качаничку клисуру према Косову, а тиме и према рејону Косовске Митровице, врши се продор средоземних струјања које се овде манифестују вишим температурама или дужом сушом у летњем добу (Вараћ и др, 2010).

Постоји велики распон температурних вредности и неуједначених дистрибуција падавина (Gavrilov и др, 2018). Температура директно утиче на интензитет испаравања, влажност ваздуха, облачност и падавине. Температура зими је око 0°C, лети око 20°C (средња годишња температура ваздуха је 10,8°C). Интензитет инсолације на подручју Косовске Митровице је 1681 сат током године. Просечна годишња вредност влажности ваздуха 77%. Количина падавина варира од 600 ml за места ниже надморске висине до 1100 ml за планинска места; током године има 50-60 ветровитих дана са северозападним преовлађујућим правцем (Вараћ и др, 2010).

#### 2.2.4 Рударски комбинат „Трепча“

За привредни развитак Косовске Митровице и ширег региона у прошлости највећи значај имало је отварање рудника олова и цинка у Старом Тргу, због чега је ово била једна од највећих индустријских и рударских области у Европи. Овај рударски регион био је познат још у средњем веку и периоду османлијске власти. Одмах по завршетку Првог светског рата, 1919. интересовање за улагање и експлоатацију показује Енглеска.

Лежиште „Трепча“ са широм околином припада вардарској зони са правцем пружања север-северозапад и југ-југоисток (Dimitrijević, 1997). Лежиште припада типу хидротермално-метасоматског лежишта. Хидротермални минерали су сулфиди, карбонати и оксиди. Од сулфида најзначајнији су: галенит, сфалерит, пиротит, пирит, арсенопирит, плумозит, аргентит, итд. Њихови следбеници су: кварц, калцит, доломит, родохрозит итд. У економском смислу најзначајнији минерали су: галенит, који је поред олова, главни носилац сребра и бизмута, затим сфалерит (минерал цинка са 0,2% кадмијума) (Monthel и др, 2002).

Део комплекса „Трепча“ чине највећи и најзначајнији рудник Стари Трг, флотација у Првом тунелу; металургија олова и енергетике (у Звечану) (Слика 2.2), комбинат металургије цинка; комплекс хемијске индустрије и индустријска прерада (у јужном делу Косовске Митровице). Рудник у Старом Тргу и флотација у Звечану почели су са радом 1930. године; изграђена је термоелектрана за потребе рудника и флотације. Топљење и рафинерија олова у Звечану почела је 1939. године; оловни концентрати добијени флотацијом садржали су око 80% олова. До 1984. године у флотацији Звечан прерађено је око 24.000.000 t руде, са просечним садржајем Pb+Zn од 11,9% (Trajković и др, 2022). Током Другог светског рата, рудник Стари Трг производио је 40% олова коришћеног у немачкој војној индустрији.

После Другог светског рата започиње интензиван привредни развој, посебно у области рударства, металургије и енергетике. Индустријско-рударски комплекс „Трепча“ је тада обухватао 22 рудника, 12 флотационих, 2 металуршке индустрије, хемијску индустрију и индустријску прераду. У периоду пуне производње „Трепча“ је запошљавала до 22.000 радника, а дневна производња у рудницима износила је око 10.000 t ископане руде (Nedeljković и др, 2007). Око 1985. године флотација у Звечану је демонтирана, чиме је ослобођен простор за ширење металургије олова.

Постројења у Звечану су непрекидно радила од 1939. до 1999. године. Комплекс „Трепча“ је у том периоду произвео 3.284.568 t сировог олова, 4.110 t сребра и 3.296 t бизмута и других комерцијалних производа (Nikolić, 1999). Металургија олова „Трепча“ (топионица и рафинерија олова) августа 2000. године је окупирана, када су припадници UNMIK-а (United Nations Interim Administration Mission in Kosovo) и KFOR-а (Kosovo Force) забранили рад комплекса, под изговором да се не поштују еколошки стандарди. UNMIK је преузео управљање. Уочено је загађење ваздуха услед металургије олова, иако се пречишћени металуршки гасови испуштају у атмосферу кроз димњак висине 305 m. Пржионица и шахтне пећи не раде и даље. У последњих 20 година рафинисано је само око 20.000 t олова, у рафинерији у Звечану извршена рециклажа батерија у мањој количини (вађење олова из истрошених батерија). Постоји дилема око будућег рада металургије олова у Звечану. Металургија цинка је такође затворена 2000. године. Хемијска индустрија сада производи малу количину алуминијум-сулфата. Већина осталих објеката „Трепча“ комплекса је или неактивна или ради са веома малим капацитетима.



**Слика 2.2** Металургија олова и енергетике комплекса „Трепча“, Звечан

„Трепча“ истовремено представља највећу потенцијалну снагу за привредни опоравак овог региона али и један од великих еколошких изазова. Бивше фабрике комбината оставиле су за собом велике количине отровног отпада који прети да угрози здравље становништва. Током 60 година рада (1939-1999), „Трепча“ је произвела велике количине флотационе јаловине, металуршке шљаке, полупроизвода муља, пепела и др. Отпадни материјал је транспортован и депонован у близини обале реке Ибар и Ситнице. Најкритичнија жаришта се налазе у индустријској и урбаној зони Косовске Митровице и Звечана. Јаловине су полиметалне, у минералном саставу доминирају тешки метали, јер су екстраховане из руде. Флотационе јаловине су сличне по својим физичко хемијским карактеристикама, док су депоније металургије олова, металургије цинка и хемијске индустрије различите по хемијском саставу.

Постоји четири врсте депонованих јаловишта, отпадних материјала и полупроизвода из различитих технолошких процеса:

- флотациона јаловишта настала при обогаћивању оловно-цинканих руда у Звечану и Првом Тунелу. Једна таква се налази у Житковцу, близу реке Ибар, око 1,5 km удаљено од Звечана. Поред топионице и рафинерије у Звечану налази се још једно јаловиште, Горње Поље, на десној обали Ибра, између Косовске Митровице и Звечана. Поред ових постоји и активна депонија удаљена 2 km североисточно од Косовске Митровице, Жарков Поток;
- депоније металургије олова, настале складиштењем материјала. Северни део депоније Горње Поље на којем се одлагао отпад из топионице олова у Звечану, попримио је облик купе која заузима велику површину;

- депоније металургије цинка, које су настале складиштењем материјала од прераде концентрата цинка и производње минералних ђубрива. Остаци од лужења и пиратска шљака одложена је у Шупковцу поред десне обале Ситнице у јужном делу Косовске Митровице;
- депоније енергетских постројења, настале унутар индустријског круга, током прераде сувог и сировог лигнита, који се користио као гориво у електрани и гасним генераторима. Његов отпадни материјал, шљака и пепео, складиштени су у Рудару (Gulan и др, 2024).

Главни штетни утицаји које индустријски отпад изазива су: загађење површинских и подземних вода металима који се луже са флотацијских јаловишта; загађење ваздуха прашином која се диже са јаловишта током јаких ветрова у сушном периоду; загађење пољопривредног земљишта, дворишта кућа, улица, јавних површина, таложењем ове прашине. У пољопривредном земљишту и прехранбеним усевама долази до акумулације тешких метала, као озбиљних загађивача. Тако постоје значајне опасности по животну средину и здравље људи због преноса у ланцу исхране, земљиште-биљка-човек. Унос неких метала, као што су цинк (Zn) и бакар (Cu), значајан је са здравственог аспекта у малим количинама. Међутим, изложеност тешким металима у врло малим дозама током дужег временског периода може довести до хроничног тровања.

Као резултат промена у геолошко-геохемијским системима (руде, стене, подземне воде) које су праћене хидротермалним процесима, примарне стене се обогаћују минералима који садрже радионуклиде, тако долази до природног повећања садржаја радионуклида у земљишту. Технолошке активности изазване људским фактором (експлоатација и прерада руда и минерала, минирања, копање тунела, рад у рудницима, производња и употреба фосфатних руда у производњи ђубрива, одлагање шљаке и пепела, емисија гасова у атмосферу из термоелектрана), могу променити и значајно повећати ниво природне радиоактивности, довести до веће изложености становништва природној радијацији и извршити велики утицај на квалитет животне средине.

### ***2.3 Технике мерења примењене у дисертацији***

У бројној групи инструменталних метода којима се детектује радон, разликују се активне и пасивне методе, у зависности од тога да ли се у току узорковања користи извор напајања електричном енергијом или не. Уколико уређаји користе извор напајања струјом, говори се о активним мерним техникама, док су пасивне мерне технике оне где се не користе активне електричне компоненте. У зависности од потребе и циља мерења бира се најподеснија метода, нпр. да ли је потребно обавити дугорочна или краткорочна мерења, у којем обиму, да ли се жели добити само вредност концентрације или се прате варијације концентрације радона за процену средње вредности да ли потребно пратити друге карактеристике мерних система, итд. У случају стандардних проблема за мерење концентрације радона у затвореном простору, мерење у кућама се мора заснивати на стандардизованим (нпр. националним) протоколима како би се обезбедила прецизна мерења.

Већина мерних метода за радон и његове потомке заснива се на детекцији  $\alpha$ -честица, као и мерењу  $\gamma$ -зрачења, док се мерење  $\beta$ -зрачења мало користи. Методе се разликују још и

по начину и трајању узорковања, па се може говорити о тренутном и дугорочном узорковању. Тренутне методе дају брзу информацију концентрације на одређеној локацији у јако кратком временском периоду. Код дугорочних мерних техника добија се средња вредност концентрације радона у једном дужем временском интервалу, и ове технике су погодније за процену радијационог здравственог ризика.

### 2.3.1 Радон детектор Airthings Corentium Home

За мерење концентрације радона коришћен је детектор Airthings Corentium Home (Слика 2.3). Метода мерења је пасивна, заснована на дифузији радона у комори, док је сам метод детекције алфаспектрометријски (<https://www.airthings.com/home>). Детектор је прикладан за мерења у краћим временским интервалима, од једног дана, недељу дана или месец, чак и дуже у трајању од годину дана, а даје веома прецизне податке о концентрацији радона у боравишном простору са мерним опсегом од 0-9999 Bq m<sup>-3</sup>. Corentium Home ради у температурном опсегу од 4°C до +40°C и релативној влажности ваздуха испод 85%.



Слика 2.3 Детектор радона, Airthings Corentium Home

Радон детектор Airthings Corentium Home се може сматрати дигиталном верзијом детектора алфа трагова. Детекција радона базирана је на принципу дифузије гаса радона у детекциону комору. При распаду атома радона емитују се алфа честице које се детектују помоћу силицијумске фото-диоде. Уз помоћ појачивачког степена ниске снаге, сигнална струја се конвертује у јачи напонски сигнал. Максимум амплитуде напонског сигнала се детектује и читава помоћу аналогно-дигиталног конвертора (Analog digital convertor-ADC). Амплитуда је пропорционална енергији алфа честице која удара у фото-диоду. Микроконтролор региструје време и енергију сваке детектоване честице. Овај податак се користи за израчунавање дневне, седмичне и годишње концентрације. Све ово се реализује у колу које укупно троши неколико микровата снаге, што овом детектору даје могућност да ради током готово три године користећи један комплет алкалних батерија.

Израчунавање концентрације радона је комплексно јер постоје вишеструки извори грешака који се морају узети у обзир. При распаду радона, настају  $^{218}\text{Po}$  и  $^{214}\text{Po}$ , који и сами емитују алфа честице, оне могу бити погрешно детектоване као честице које емитује сам радон, али детектор користи посебне алгоритме који могу разликовати различите изворе алфа честица. Главни улазни податак за ове алгоритме је енергија алфа честице у комбинацији са познавањем спектра енергије изотопа радона и полонијума.

Детектор има веома добру резолуцију мерења енергије која је потребна за ове алгоритме. Он није направљен да даје тренутне резултате концентрације радона већ пре свега просечне вредности у току времена. Разлог за то лежи у чињеници да су тренутне вредности од мање важности јер концентрација радона може доста да варира у кратком временском интервалу, и због тога што се здравствени ризици повезују више са средњим вредностима изложености радону током дужег временског периода. Тако детектор показује вредности: средња дневна вредност за један дан (short-term ST), приказује се након 6-24 h; седмична вредност усредњена за предходних 7 дана; и дугорочна средња вредност, која се добија за период од када је детектор почео да ради до искључивања или ресетовања (long-term LT). Ако се мерење изводи дуже од једне године, дугорочно мерење даје средњу вредност само у току последње године.

Детектор радона врши неколико нивоа калибрације, прва по завршетку првих 3 минута од пласирања батерија, а након рада од неколико дана детектор ће се адаптирати на услове и тачност мерења се повећава током времена. Зато је потребно да се прво мерење прочита 24 h након укључивања, пре тога се вредност сматра као невалидна.

Мерне несигурности (Табеле 2.1 и 2.2) које су у вези са расипањем резултата мерења показују укупну несигурност за различите концентрације радона и за различите средње вредности (седмичне и дугорочне), али не приказују вредности за концентрације радона испод  $100 \text{ Bq m}^{-3}$ , јер не постоји акциони ниво нижи од ове вредности.

**Табела 2.1** Период мерења у којем се добија вредност грешке

| Концентрација радона ( $\text{Bq m}^{-3}$ ) | 20%<br>несигурност | 10%<br>несигурност |
|---------------------------------------------|--------------------|--------------------|
| 100                                         | 4 дана             | 3 недеље           |
| 200                                         | 2 дана             | 10 дана            |
| 300                                         | 2 дана             | 7 дана             |
| 500                                         | 1 дан              | 4 дана             |
| 1000                                        | 1 дан              | 2 дана             |
| 2000                                        | 1 дан              | 1 дан              |

Уобичајено је да се добију резултати мерења концентрације радона са несигурношћу од 20%. Када је несигурност назначена, за већину монитора мерења имају Гаусову дистрибуцију (расподелу). Гаусова расподела са стандардном девијацијом од 20% значи да у око 68% случајева (за 100 уређаја) резултат селектованог уређаја ће бити у оквиру интервала од  $\pm 20\%$  од средње вредности.

Тачност је тестирана упоређивањем са вредностима измерених концентрација уз помоћ скупих и професионалних референтних монитора која је вршена у реномираним лабораторијама у Јапану и Чешкој Републици. Добијено је да је тачност уређаја око 5%, што значи да су резултати упоређивања у оквиру  $\pm 5\%$  од резултата референтних монитора.

Тачност је повезана са системским грешкама, насталим нпр. услед погрешне калибрације или неких других ефеката.

**Табела 2.2** Мерна несигурност (%) за седмичну средњу вредност при различитим концентрацијама

| Концентрација радона ( $\text{Bq m}^{-3}$ ) | Мерна несигурност (%) |
|---------------------------------------------|-----------------------|
| 100                                         | 16                    |
| 200                                         | 12                    |
| 300                                         | 10                    |
| 500                                         | 8                     |
| 1000                                        | 7                     |
| 2000                                        | 6                     |

### 2.3.2 Угљени канистери

Мерење радона угљеним канистерима по стандардној ЕРА методи представља једини пасивни метод по којем су три лабораторије у Србији акредитоване, а чије је међулабораторијско поређење показало добро слагање добијених резултата (Forкарић и др, 2015).

Пасивни угљени канистер (ређе угљени филтер) је мала посуда пречика 10 cm која садржи 70 g зрнастог активног угља, погодног за ефикасну адсорпцију радона  $^{222}\text{Rn}$  из ваздуха (Слика 2.4). Тако адсорбован радон даље се распада на краткоживеће потомке  $^{218}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Pb}$ ,  $^{214}\text{Bi}$ ,  $^{214}\text{Po}$  и  $^{210}\text{Pb}$ . Релативно велики интензитет гама линија радонових потомака  $^{214}\text{Pb}$  и  $^{214}\text{Bi}$  ( $^{214}\text{Pb}$ -295 и 352 keV;  $^{214}\text{Bi}$ -609 keV), омогућава одређивање концентрације радона гамаспектрометријски преко наведених прелаза, јер се већ након три часа успоставља равнотежа између радона и потомака у активном угљу. Гамаспектрометријско мерење затворених угљених канистера након експозиције врши се помоћу HPGe детектора високе резолуције и NaI (Tl) сцинтилационог спектрометра за време од 3000 s.

За мерења су коришћени сви расположиви спектрометри у којима је могуће поставити канистер у контактну геометрију са поклопцем детектора: три HPGe детектора високе резолуције и један NaI (Tl) сцинтилациони спектрометар са ниским нивоом заштите и познатом ефикасношћу гама детекције:

- нискофонски германијум детектор, фирме Canberra САД модел GC-2520, релативне ефикасности од 21,6% у гвозденој заштити;
- германијум детектор релативне ефикасности 100%, модел GX10021, у оригиналном оловном штиту дебљине 15 cm фирме Canberra Packard;
- преносиви HPGe детектор, произведен од стране Canberra САД, модел GC3518, релативне ефикасности 35,8% у оловном штиту домаће производње;
- систем спектрометра релативне ефикасности око 100% који садржи два NaI (Tl) детектора: један 9"×9" и један 3"×3", повезаних у заједнички систем у облику јаме веће од оне код HPGe детекторског система. Изузетно висока ефикасност овог NaI детекторског система, упркос његовој ниској резолуцији, има велику предност у

мерењима узорака из животне средине на веома брз начин, постижући минималну детектибилну активност (Minimal Detectable Activity-MDA) упоредиву, или чак и нижу од оне код германијумских система.



**Слика 2.4** Угљени канистери на једном од мерних места (Gulan и др, 2023)

Калибрације ефикасности спектрометријских система вршене су коришћењем ЕРА референтног извора радијума у истој геометрији канистера. Сертификован извор радијума  $^{226}\text{Ra}$  коришћен је у канистеру истог облика као и ЕРА угљени канистери који мере ниво радона (ЕРА 520/5-87-005:1987) да би се утврдило колико добро угљени канистери функционишу у детекцији радона (Grey и Windham; 1987). И поред тога што се канистер са угљем може користити за прикупљање радона током једног дана па и до једне недеље, препоручено и оптимално време излагања на основу калибрационих крива утицаја влажности је 48 сати, колико су били излагани угљени канистери и у овом истраживању. Минимална детектибилна активност (Minimal Detectable Activity-MDA), код мерења радона коришћењем угљених канистера је функција одброја фона спектрометарског система и времена бројања. Делењем нето брзине бројања ( $\text{odbroj (ks)}^{-1}$ ) са познатом стандардном активношћу ( $\text{Bq}$ ), одређује се ефикасност  $E$  сваког детектора током мерења у јединицама ( $\text{odbroj (ks Bq)}^{-1}$ ).

Активна концентрација радона одређује се помоћу формуле:

$$RN = \frac{I - I_F}{T_s E CF DF} \quad (2.1)$$

где је:  $RN$  концентрација радона ( $\text{Bq m}^{-3}$ );  $I$  интензитет гама линија, 295, 352 и 609 keV ( $\text{odbroj s}^{-1}$ );  $I_F$  спектрални интензитет фона ( $\text{odbroj (ks)}^{-1}$ );  $T_s$  време експозиције (ks);  $E$  ефикасност детекције ( $\text{odbroj ks}^{-1} \text{Bq}^{-1}$ ),  $CF$  калибрациони фактор ( $\text{m}^3 \text{ks}^{-1}$ ) или ( $\text{l min}^{-1}$ ), који представља корекцију за водени принос (познат из калибрационих крива влажности за

различито време излагања и водени принос);  $DF$  корекција на распад радона, процењена од средине излагања до тренутка мерења.

Да би се постигла статистичка тачност од 5% при концентрацији од  $100 \text{ Bq m}^{-3}$ , време мерења је процењено на 1 сат. Под претпоставком стварних услова излагања и познате ефикасности, MDA је мања од  $2 \text{ Bq m}^{-3}$ .

За мерење флукса екshalације радона коришћена је адсорпциона метода, предложена од стране Међународне агенције за атомску енергију (IAEA-International Atomic Energy Agency) технички извештај серије број 474 (IAEA, 2013), која подразумева постављање угљених канистера отвором надоле према површини подлоге која се испитује (Слика 2.4).

Густина флукса процењује се помоћу формуле :

$$f = \frac{N t_c \lambda^2 e^{(\lambda t_d)}}{\varepsilon A [1 - e^{(-\lambda t_e)}][1 - e^{(-\lambda t_c)}]} \quad (2.2)$$

где је  $f$  густина флукса;  $N$  брзина бројања након одузимања фона, добијена током периода бројања ( $\text{odbroj s}^{-1}$ ) или ( $\text{s}^{-1}$ );  $t_c$  је време бројања (s);  $\lambda$  константа радиоактивног распада радона  $^{222}\text{Rn}$  ( $\text{s}^{-1}$ );  $t_d$  период кашњења од краја експозиције до почетка бројања (s);  $\varepsilon$  ефикасност бројања система у односу на активност адсорбованог радона;  $A$  површина канистера ( $\text{m}^2$ );  $t_e$  период излагања активног угља у канистеру (s).

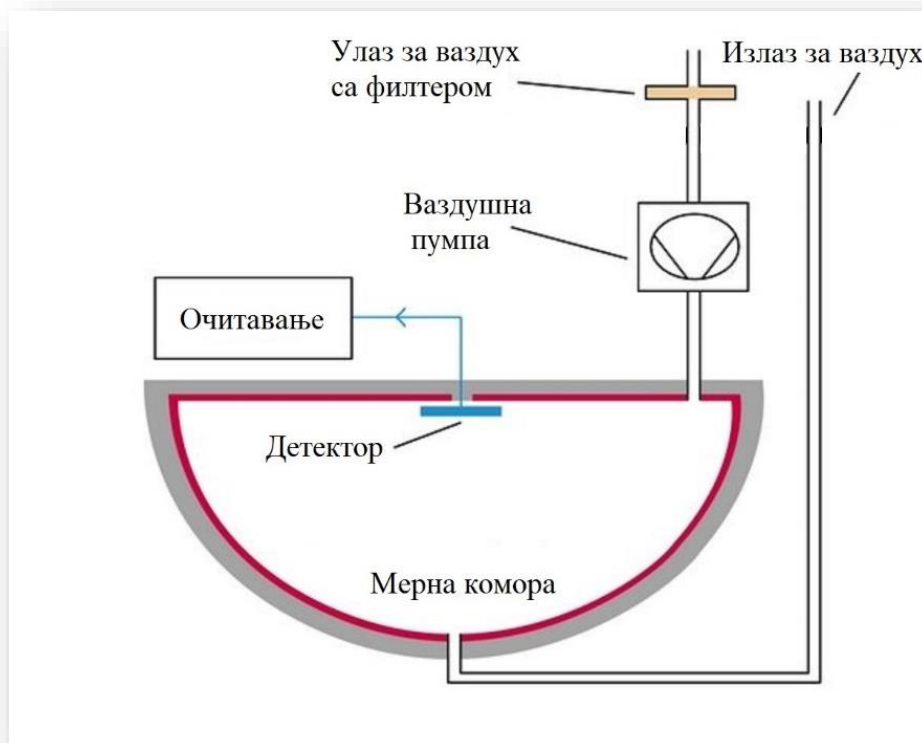
Поједини аутори сматрају да је највећа предност ове методе у кампањама у којима је потребно извршити велики број мерења како би се идентификовале локације са повишеном концентрацијом радона, након чега је потребно извршити додатна мерења коришћењем других метода (De Luca и Mancini, 1991).

### 2.3.3 RAD7 уређај

Активни уређај RAD7 (<http://www.durrIDGE.com/documentation/RAD7Manual.pdf>), коришћен је за континуирано мерење радона у ваздуху затвореног простора, у земљишту и подземним водама. На неким изабраним локацијама мерена је концентрација радона у водама из подземних природних извора, на основу карактеристичне геологије, а који се налазе испод испитиваних објеката.

Овај тип детектора је континуални радон детектор грађен од полупроводничких материјала. Активна комора има хемисферичну запремину од  $0,75 \text{ l}$ , чија је унутрашња страна обложена материјалом који је добар проводник (Слика 2.5). У центру коморе налази се силицијумски  $\alpha$ -детектор који привлачи позитивне потомке радона, захваљујући високом напону (око  $2 \text{ kV}$ ). Јако електрично поље унутар коморе доводи до директног претварања енергије упадног алфа зрачења у електрични сигнал. Пошто је радон хемијски инертан и електрично неутралан у комори, оно што електрично поље у комори убрзава и усмерава ка детектору је позитиван јон  $^{218}\text{Po}$ . Наталожени  $^{218}\text{Po}$  емитује  $\alpha$ -честице које са вероватноћом од 50% улазе у активну средину и производе електрични сигнал чији интензитет одговара енергији. Управо је ова алфаспектрометријска метода погодна за раздвајање радонових и торонових потомака, због различитих енергија емитованих алфа честица, као и за одвајање „старог“ од „новог“ радона, као и сигнала од буке. Аутоматска пумпа обезбеђује континуирано снабдевање свежим ваздухом, који у почетку пролази кроз одвлаживач, брзине протока од  $1$

$\text{dm}^3 \text{ min}^{-1}$ . Провођење сувог ваздуха зависи од капацитета рада аутоматске пумпе. На самом улазу у детектор налази се филтер који омогућава улазак само гасовима радону и торону, док њихове потомке уклања.

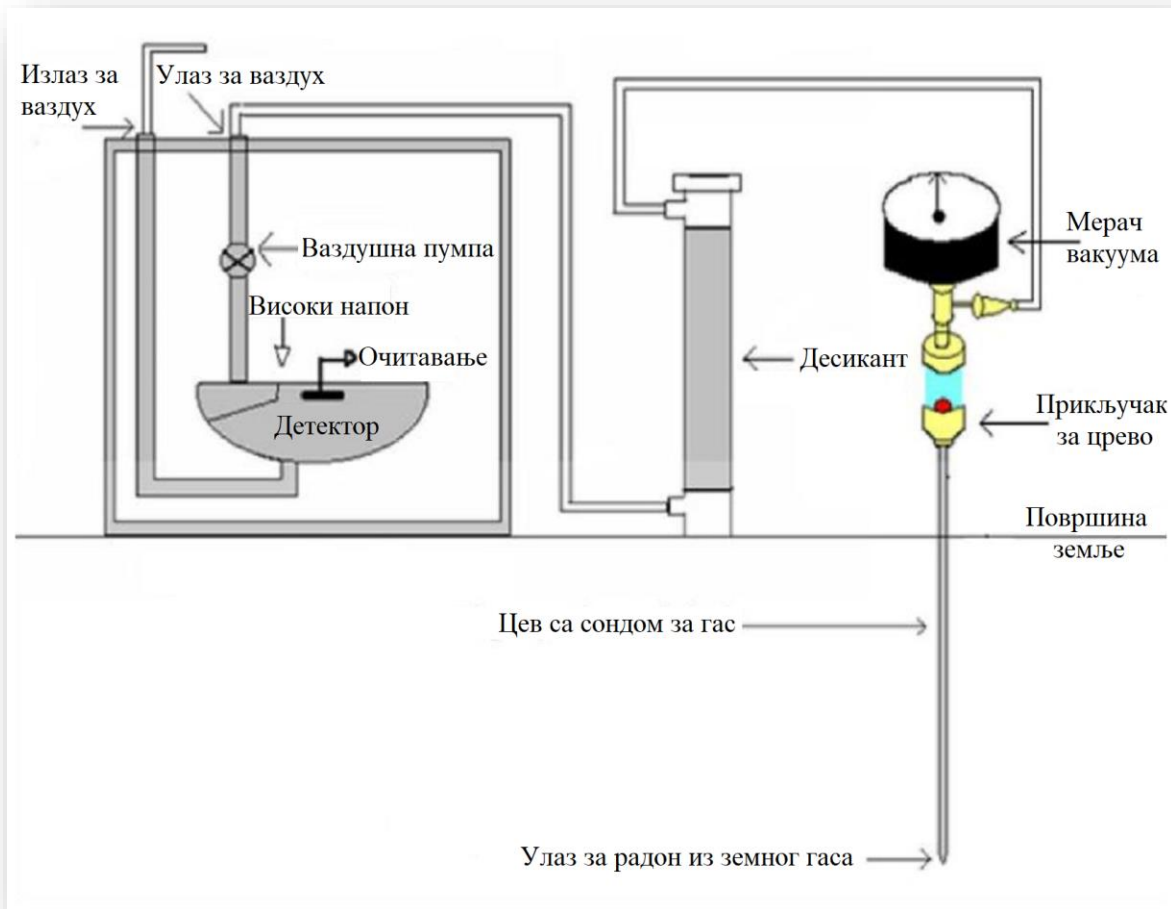


**Слика 2.5** Унутрашња запремина уређаја RAD7 (DurrIDGE, 2014)

Посебан додаток се користи за мерење концентрације радона у површинским слојевима земљишта који је у облику цеви од нерђајућег челика дужине 40 cm са прорезима на врху који служе да радон дифундује из земљишта (Слика 2.6). Ваздух се пумпом усава из земљишта, који прво пролази кроз цев за сушење, а потом улази у мерну комору. Проток ваздуха је око  $0,7 \text{ l min}^{-1}$ , а из земље се извлачи  $3,5 \text{ l}$  земног гаса на дубини од 80 cm (<http://www.durrIDGE.com/documentation/RAD7Manual.pdf>). Могућност бројања само распада  $^{218}\text{Po}$  у „sniff“ („њушкање“) режиму значи да на мерења не утичу друге честице (Тан и др, 2013).

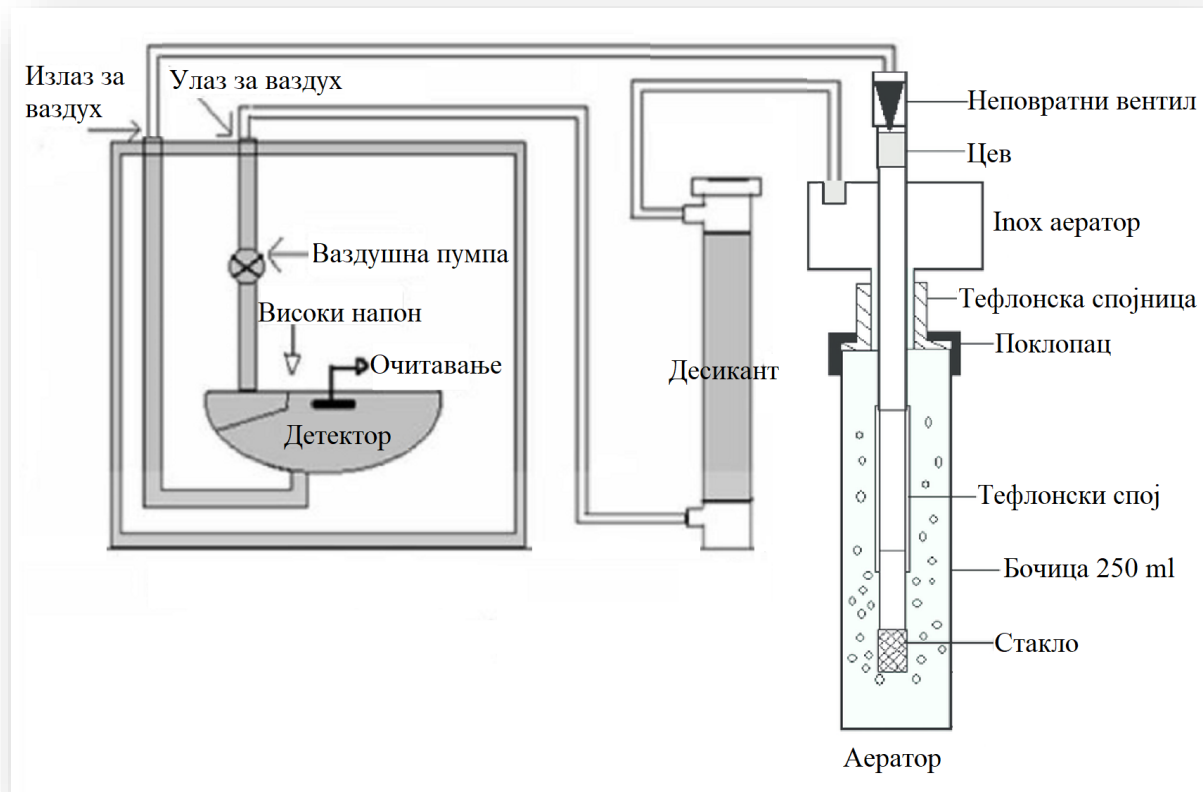
За мерење концентрације радона у води, користи се такође посебан RAD H<sub>2</sub>O додаток уз протокол Wat250 (Слика 2.7). Узорци воде се прикупљају у флашице запремине 250 ml, а уређај у њима аутоматски прорачунава концентрацију радона. Гас радон се екстрахује из овако прикупљених узорка воде затвореним системом упумпавања ваздуха а радон се непрекидно ослобађа све док се не успостави стање равнотеже које наступа након 5 минута, а после тога нема више радона који би се могао екстраховати из узорка. Ефикасност издвајања радона зависи од температуре и износи око 99% и 94% за узорке запремине 40 ml и 250 ml, редом. Протокол мерења садржи 4 циклуса бројања у „sniff“ режиму у року од 5 минута, и уређај врши усредњавање за сва четири циклуса. Код овог система узорковања неопходно је константно пратити и проверавати релативну важност унутар коморе мерног

инструмента, која треба да буде испод 10%. Мерења морају бити извршена одмах након пуњења, у супротном ће концентрација радона опадати са временом услед распада радона и потребно је извршити корекцију резултата мерења на распад.



**Слика 2.6** RAD7 уређај са додатком за мерење радона у земном гасу

Мерења концентрације радона спроведена су у акредитованој Лабораторији за испитивање радиоактивности узорка и дозе јонизујућег и нејонизујућег зрачења на Департману за физику, Природно-математичког факултета Универзитета у Новом Саду. Последња калибрација уређаја RAD7 обављена је у радонској комори у акредитованој лабораторији Завода за метрологију Црне Горе 2020. године, а Лабораторија је такође успешно учествовала на RIM Интернационалном упоредном мерењу радона у земном гасу на радонским референтним станицама Цетин и Бук у Прагу (Чешка Република), септембра 2018. године.



Слика 2.7 RAD7 уређај са додатком за воду (H<sub>2</sub>O мерни комплет)

## 2.3.4 Мерење јачине амбијенталног дозног еквивалента

### 2.3.4.1 Radex RD1503<sup>+</sup>

Мерење амбијенталног дозног еквивалента у раду обављено је помоћу Гајгер-Милеровог бројача Radex RD1503<sup>+</sup> (<https://www.quarta-rad.ru/en/catalog/dozimetr-radiometr-radon/dozimetr-radex-rd1503/>). Принцип рада овог детектора је веома једноставан и брз. Заснива се на 4 усредњена мерења јачине амбијенталног дозног еквивалента гама зрачења у ваздуху у интервалима од 40 s. Овај тип детектора јонизујућег зрачења може мерити вредности зрачења у затвореном, на отвореном простору као и у материјалима и води уз адекватну херметичку заштиту. Може да детектује рендгенско зрачење и гама зрачење, енергија од 100 keV до 1.25 MeV; и бета честице, енергија 350 keV до 1.5 MeV. Калибрисан је коришћењем изотопа <sup>137</sup>Cs.

Radex модел RD1503<sup>+</sup> ради у температурном опсегу од -20°C до +50°C и у интервалу амбијенталног дозног еквивалента од 0 до 9,99  $\mu\text{Sv h}^{-1}$ . Уређај има 2 врсте аларма, звучни и вибрациони, који се оглашавају када је ниво позадинског зрачења већи од 0,3  $\mu\text{Sv h}^{-1}$ , или већи од оног који је узет за праг. Мерна несигурност за X или  $\gamma$ -зраке је  $\pm 15\%$ . Детектовање бета честица врши се у зависности од облика извора, мерна несигурност за ове честице је  $> 20\%$  флуенса изнад 350 keV.

### 2.3.4.2 Radiation Alert Inspector

Током истраживања, за мерење екстерне гама дозе, у употреби је био још један ГМ бројач, Radiation Alert Inspector. То је инструмент оптимизован за откривање ниског нивоа радијације. Мери  $\alpha$ ,  $\beta$ , и  $\gamma$  зрачење. Његове апликације укључују: откривање и мерење површинске контаминације; праћење могуће изложености зрачењу током рада са радионуклидима; скрининг животне средине; детекцију племенитих гасова и радионуклида ниске енергије; упозорава звучним сигналом ако зрачење пређе подешени праг.

Овај детектор користи Гајгер-Милерову цев за детекцију радијације, која генерише импулс при сваком проласку зрачења које изазове јонизацију. Сваки импулс се електронски детектује и региструје као број а приказује бројање у изабраном моду: импулс (одброј) по минути (CPM), милирендген по сату ( $\text{mR h}^{-1}$ ), или у SI јединицама импулс (одброј) по секунди (CPS) и микросиверт по часу ( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ ).

Опсег мерења амбијенталног дозног еквивалента уређаја је  $0,01\text{--}1100 \mu\text{Sv h}^{-1}$ . Приказане вредности су одређене као средња вредност 5 узастопних мерења у контактної геометрији са зидовима и подом. Комбинована мерна несигурност је  $\pm 20\%$  (Inspector Alert, 1996).

### 2.3.5 Гамаспектрометријска метода одређивања садржаја радионуклида

Радиолошка карактеризација узорака, извршена је методом гамаспектрометрије, мерењем концентрације активности  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{238}\text{U}$  и  $^{235}\text{U}$ . Припрема узорака и гамаспектрометријско мерење урађено је на Природно-матемтичком факултету, Универзитета у Новом Саду, Департман за физику.

Припрема узорака подразумева уситњавање и сушење у трајању од 8 h на температури од  $105^\circ\text{C}$ , како би се садржај влаге смањио испод 1%. Узорци су потом смештани у цилиндрични контејнер (пречника 6,7 cm и висине 6,6 cm) и запечаћени тефлонском траком да би се спречила дифузија радона из контејнера. Узорци су остављени 30 дана да би се успоставила радиоактивна равнотежа између  $^{226}\text{Ra}$  и његових потомака.

Коришћењем стандардне IAEA TRS 295 методе (IAEA, 1989) извршена је анализа узорака. Садржај радионуклида у стенама и земљишту мерен је коришћењем HPGe ORTEC GMX гама спектрометра са релативном ефикасношћу од 32% и резолуцијом од 1,9 keV за гама пик од  $^{60}\text{Co}$  на 1332 keV (детектор користи заштиту од олова дебљине 12 mm). Детектовани сигнали повезани су са вишеканалним анализатором (MCA) са два аналогно-дигитална претварача са 8192 канала преко CANBERRA предпојачавача и појачавача. Овај анализатор је директно повезан са рачунаром где се мере и чувају добијени спектри (Todorović и др, 2014). Калибрација детектора је извршена стандардним референтним материјалом цилиндричне геометрије, хомогено распоређеним у запремини силиконске смоле запремине  $V=250 \text{ cm}^3$ . Анализа гама спектра обављена је коришћењем Canberra Genie 2000 софтвера (Kuzmanović и др, 2020a). Програм ANGLE коришћен је за корекцију ефекта самоапсорпције, који настаје услед матрица различитих густина (Moens и др, 1981). Овако прецизна калибрација је неопходна како би се обезбедила мала мерна несигурност ( $<10\%$ ) при одређивању активности радиоизотопа у ниско-енергијском опсегу (испод 100 keV), где су и гама линије  $^{234}\text{Th}$ , директног потомка  $^{238}\text{U}$ .

Типично време бројања било је око 20 h, како би се постигла што боља статистика одброја, посебно код узорака са ниским вредностима концентрације активности. Интегрисана брзина бројања у енергетском опсегу између 30 keV и 3000 keV била је око 2 одброја по секунди (Todorović и др, 2011).

Концентрације активности радионуклида одређене су на основу релације (Medhat, 2009):

$$A = \frac{S}{\epsilon(E) \cdot \Gamma(E) \cdot M} \quad (2.3)$$

где је:  $A$  концентрација активности датог радионуклида изражена у  $\text{Bq kg}^{-1}$ ,  $S$  укупна брзина одброја за дати радионуклид са одузетим одбројем позадинског зрачења,  $\epsilon(E)$  ефикасност детекције на датој енергији,  $\Gamma(E)$  квантни принос гама фотона на датој енергији,  $M$  маса сувог узорка коришћена за гама спектрометријско мерење.

Концентрација активности  $^{226}\text{Ra}$  у свим узорцима одређена је на основу гама линија његових потомака, као усредњена вредност:  $^{214}\text{Pb}$  на 295,2 keV и 351,9;  $^{214}\text{Bi}$  на 609,3 keV и 1764,0 keV. Концентрација активности  $^{232}\text{Th}$ , одређена је из гама линија његових потомака:  $^{212}\text{Pb}$  на 238,6 keV;  $^{208}\text{Tl}$  на 583,2 keV и  $^{228}\text{Ac}$  на 911,2 и 969,1 keV. Концентрација активности  $^{40}\text{K}$  одређена је из његове линија на 1460,8 keV (Кнежевић и др, 2020; Kuzmanović и др, 2020a). Минимална детектибилна активност износила је  $1,3 \text{ Bq kg}^{-1}$ ,  $0,30 \text{ Bq kg}^{-1}$ ,  $8,1 \text{ Bq kg}^{-1}$ , за  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и  $^{40}\text{K}$ , респективно.

## 2.4 Методологија истраживања

Истраживање у оквиру дисертације трајало је са одређеним прекидима од 2019. до 2024. године. Прва студија је спроведена како би се испитали нивои радона у објектима у рударској области близу Косовске Митровице. Мерење концентрације активности радона прво је започето у 26 стамбених објеката у насељима Рударе и Грабовац и до сада не постоје сличне студије овог типа спроведене на овом подручју и у овом обиму (Слика 2.8).

Прва фаза истраживања спроведена је у јулу 2019. године и обухватала је само мерење радона у затвореном. Коришћени су угљени канистери који су били изложени 48 h у 12 селектованих објеката. Поједини аутори сматрају да је ова метода најпогоднија када је потребно извршити већи број мерења ради идентификације објеката са повишеним концентрацијама радона, након чега се могу вршити додатна мерења коришћењем и других метода (De Luca и Mancini, 1991).

Мерења су поновљена у новембру постављањем 20 нових канистера. Поред пасивних мерења упоредо су вршена и активна мерења концентрације радона у ваздуху затворених просторија, земљишту и води, на локацијама где је то било могуће и неопходно, помоћу активног монитора радона RAD7 (произвођача DurrIDGE) са полусферном активном комором запремине 0,75 l. Током мерења земног гаса, са истих локација узимани су узорци земље да би се анализирао радиоактивност и гранулометријски састав земљишта, и на основу тога проценио геогени потенцијал. Анализа гранулометријског састава земљишта извршена је на Факултету техничких наука Универзитета у Новом Саду, методом ласерске дифракције на уређају Malver Mastersizer 2000, за анализу величине честица у опсегу од 0,02 до 2000. За класификацију величине зрна коришћене су следеће фракције: крупнозрни

песак (500-2000  $\mu\text{m}$ ), средњи песак (250-500  $\mu\text{m}$ ), фини песак (62,5-250  $\mu\text{m}$ ), ситл (3,9-62,5  $\mu\text{m}$ ) и глина (<3,9  $\mu\text{m}$ ).



**Слика 2.8** Насеља Грабовац (лево) и Рударе (десно)

Трећа фаза мерења спроведена је у децембру 2019. године и укључивала је само 20 пасивних мерења помоћу угљених канистера. У складу са резултатима из прве серије мерења су поновљена на неким старим, а биле су укључене и нове локације. С тим у вези испоштована је препорука да када је потребно донети неке важне одлуке како поступити са мерењем концентрације радона на неком подручју за које се сумња да има повишене вредности радона у објектима, онда број испитиваних објеката не би требало да буде мањи од пет (Friedmann и др, 2017).

Након тога, у истраживаној области спроведена су тест мерења у једној породичној кући да би се испитали утицаји метеоролошких параметара на концентрацију радона у затвореном, а касније спровеле и одређене мере ремедијације. Метеоролошки параметри су мерени помоћу квалитетне метеоролошке станице са 5 у 1 сензором и бежичним предајником (WTH600–E-en–GB\_v1.0, <https://www.manualslib.com/manual/2159777/Extech-Instruments-Wth600-E.html>). Сензор укључује самопразнећи кишни колектор за мерење падавина, анемометар за мерење брзине ветра, лопатице за показивање смера ветра, сензор температуре и сензор релативне влажности, споља и унутра. Симултано су праћени метеоролошки параметри и концентрација радона у дневној и спаваћој соби. Радон је мерен помоћу детектора Airthings Corentium Home (<https://www.airthings.com/home>) у периоду од фебруара до августа 2021. године. Једногодишње мерење је спроведено у истој кући и у другој спаваћој соби, у периоду од јула 2023. до јула 2024. године, и мерења су поновљена у трајању од 2 месеца (од марта до маја 2024. године), како би се испитало да ли су мере ремедијације имале ефикасан утицај на смањење концентрације радона. Иначе, важно је напоменути да се мерења концентрације радона у трајању од годину дана изузетно ретко срећу и у литератури и у пракси, а она која су спроведена у краћим временским периодима треба коришћењем сезонских корекционих фактора прерачунати у средње годишње концентрације (Čeliković и др, 2015).

Дисертацијом је обухваћено и мерење концентрације радона у радном простору ПМФ-а Универзитета у Приштини смештог у Косовској Митровици, ради процене утицаја примењених мера енергетске ефикасности на нивое радона у просторијама. У првом делу студије радон детектор Airthings Corentium Home био је изложен у 10 селектованих

радних просторија у трајању од 1 месеца за време грејне сезоне 2018/2019. У другом делу студије мерење је извршено у свим радним просторијама факултета у пролеће 2021, коришћењем пасивне радонске технике (канистери са активним угљем).

На крају мерење је спроведено и у дечијим обдаништима у Косовској Митровици и Звечану. Тако је студијом обухваћена и најрањивија и најосетљивија популација, јер су деца изложена већем здравственом ризику од зрачења него одрасли. Мерења су вршена угљеним канистерима у лето 2023, а затим поновљена у зиму 2024. године.

Угљени канистери су углавном постављени на полицама, у висини од најмање 1 m, далеко од прозора и врата, у једној или двема просторијама истог објекта, како би се добили прелиминарни резултати о концентрацији радона у затвореном. На исти начин су били изложени и детектори Airthings Corentium Home. Да би се испитао потенцијални извор радона у неким просторијама канистери су постављани на самом поду или близу зидова.

Упоредо са истраживањима радона, на десет локација у околини насеља Грабовац, Рударе, Србовац и манастира Соколица узети су узорци стена и земљишта за гамаспектрометријску и гранулометријску анализу.

#### 2.4.1 Карактеристике испитиваних објеката

##### 2.4.1.1 Породичне куће у рудној области, насеља Рударе и Грабовац

У испитиваној рударској области насумично је одабрано 26 породичних кућа, које су углавном биле приземне са или без подрума. Биране су типичне сеоске куће старије градње, али било је и оних новијих, године изградње су од 1900. до 2017.

У Табели 2.3 приказане су карактеристике свих породичних кућа, као и просторије у којима су постављани угљени канистери. Већина кућа припада старом планинском типу градње, без бетонских плоча или оних које су имале, али у изузетно лошем стању са пукотинама и шупљинама дуж зидова. Куће су зидане углавном од камена који је клесан од стена са оближњих брда. У зимским месецима у кућама се користи дрво за огрев или се догревање врши електричним грејалицама. Вентилација у свим објектима је природна, без форсиране вентилације. Просторије у којима је извршено мерење радона угљеним канистерима су углавном дневне и/или спаваће собе.

**Табела 2.3** Карактеристике објеката у насељима Грабовац и Рударе (А- спаваћа соба; Б- дневна соба; В- подрум/остава; Г- радна соба)

| Локација | Година градње | Спратност       | Просторија | Темељ                     | Бетонска плоча | Подна облога | Зидови            | Прозори          | Термо-изолација |
|----------|---------------|-----------------|------------|---------------------------|----------------|--------------|-------------------|------------------|-----------------|
| 1.       | 1970          | сутерен         | А 1        | камен                     | —              | лесонит      | камен-малтер-боја | дрво-двоструки   | —               |
|          |               | сутерен         | А 2        | камен                     | —              | ламинат      | камен-малтер-боја | дрво-двоструки   | —               |
|          |               | сутерен         | Б          | камен                     | —              | ламинат      | камен-малтер-боја | дрво-двоструки   | —               |
| 2.       | 1973          | високоприземље  | А          | бетонска подлога-земљиште | —              | дрвене плоче | цигла-малтер-боја | дрво-двоструки   | —               |
|          |               | приземље        | В          | бетонска подлога-земљиште | —              | бетон        | цигла-малтер-боја | дрво-двоструки   | —               |
| 3.       | 1965          | високоприземље  | А          | камен                     | —              | дрвене плоче | цигла-малтер-боја | дрво-дупли       | +               |
|          |               | подрум          | В          | камен                     | —              | земљиште     | камен-малтер-боја | дрво             | —               |
| 4.       | 1999          | приземље        | В          | бетон                     | +              | бетон        | камен-малтер      | PVC              | —               |
| 5.       | 2017          | приземље        | В          | армирани бетон            | +              | бетон        | термо-блокови     | PVC дупли        | —               |
| 6.       | 1980          | приземље        | В          | камен                     | +              | бетон        | камен-малтер-боја | дрво             | —               |
| 7.       | 1980          | приземље        | Б          | камен                     | +              | паркет       | цигла-малтер-боја | дрво-дупли       | —               |
| 8.       | 1990          | високо приземље | А          | камен                     | —              | дрвене плоче | цигла-малтер-боја | дрво-дупли       | —               |
|          | 1960          | високо приземље | Б          | камен                     | —              | дрвене плоче | цигла-малтер-боја | дрво-дупли       | —               |
| 9.       | 1940          | приземље        | А          | камен                     | —              | ламинат      | цигла-малтер-боја | дрво-дупли       | +               |
|          |               | приземље        | Б          | камен                     | —              | ламинат      | цигла-малтер-боја | дрво-дупли       | +               |
| 10.      | 1970          | високо приземље | А          | камен                     | —              | ламинат      | цигла-малтер-боја | дрво-дупли       | +               |
|          |               | приземље        | Б          | камен                     | —              | бродски под  | цигла-малтер-боја | дрво-дупли       | +               |
| 11.      | 1920          | приземље        | А          | камен                     | —              | дрвене плоче | цигла-малтер-боја | PVC-дупло стакло | +               |
|          |               | приземље        | Б          | камен                     | —              | дрвене плоче | цигла-малтер-боја | PVC-дупло стакло | +               |
| 12.      | 1990          | приземље        | А          | камен                     | +              | шпер плоча   | цигла-малтер-боја | дрво-дупли       | —               |
|          |               | приземље        | Б          | камен                     | +              | шпер плоча   | цигла-малтер-боја | дрво-дупли       | —               |
| 13.      | 1964          | високоприземље  | Б          | танка бетонска плоча      | —              | ламинат      | цигла-малтер-боја | дрво-двоструки   | —               |

|     |      |            |     |                |   |                   |                   |                        |   |
|-----|------|------------|-----|----------------|---|-------------------|-------------------|------------------------|---|
|     |      | приземље   | В   | камен          | + | бетон             | камен             | дрво-двоструки         | — |
| 14. | 1930 | приземље   | А   | дрво/изолација | — | дрвене плоче      | цигла-малтер-боја | дрво                   | — |
| 15. | 1980 | приземље   | Б   | бетон          | — | ламинат           | цигла-малтер-боја | дрво                   | — |
| 16. | 1950 | приземље   | Б   | камен          | — | дрвене плоче      | камен-малтер-боја | дрво-дупли             | — |
| 17. | 1960 | приземље   | В   | камен          | — | земљиште          | цигла-малтер      | дрво                   | — |
| 18. | 1970 | подрум     | В   | бетон          | — | камене<br>плочице | камен-малтер      | дрво-дупло<br>стакло   | — |
| 19. | 1950 | приземље   | А 1 | камен          | — | дрвене плоче      | камен-малтер-боја | дрво-дупли             | — |
|     |      | приземље   | А 2 | камен          | — | дрвене плоче      | камен-малтер-боја | дрво-дупли             | — |
| 20. | 1980 | приземље   | А   | бетон          | + | дрвене плоче      | цигла-малтер-боја | дрво-дупло<br>стакло   | — |
|     |      | приземље   | Б   | бетон          | + | дрвене плоче      | цигла-малтер-боја | дрво-дупло<br>стакло   | — |
| 21. | 1965 | приземље   | А   | камен          | — | ламинат           | цигла-малтер-боја | дрво-дупли             | — |
|     |      | приземље   | Б   | камен          | + | ламинат           | цигла-малтер-боја | дрво-дупли             | — |
| 22. | 1980 | први спрат | А 1 | бетон          | — | паркет            | камен             | дрво-дупло<br>стакло   | — |
|     |      | приземље   | А 2 | бетон          | — | паркет            | цигла-малтер-боја | дрвени-дупло<br>стакло | — |
| 23. | 1967 | сутерен    | Г 1 | крупни песак   | — | паркет            | цигла-малтер-боја | PVC                    | + |
|     |      | сутерен    | Г 2 | крупни песак   | — | паркет            | цигла-малтер-боја | PVC                    | + |
| 24. | 1998 | приземље   | А   | бетон          | + | бетон             | глинени блокови   | PVC                    | + |
| 25. | 1982 | приземље   | Б   | бетон          | + | бродски под       | камен-малтер-боја | дрвени-дупли           | — |
| 26. | 1900 | приземље   | В   | камен          | — | бетон             | камен             | PVC                    | — |

#### 2.4.1.2 Породична тест кућа у испитиваној рударској области

Породична кућа, изабрана за годишње праћење радона налази се у северном делу Косова и Метохије, у близини Косовске Митровице (42.9343°N и 20.8389°E) (Слика 2.9). Изграђена је 1970-их година, типична је једноспратна кућа са подрумом. Кућа је само природно вентилисана што подразумева периодично, краткотрајно или целодневно проветравање кроз отварање прозора. Приземље, које се користи за становање, зидано је од клесаног камена дебљине око 50 cm, предњи, источни део, укопан је у земљу у просеку око 1 m. Камен је природан и допреман је са оближњег соколичког брда. Кућа нема бетонску плочу у основи, док између приземља и првог спрата постоји. Зидови у свим проучаваним просторијама су малтерисани и прекривени са више слојева боје за зидове. Пре процеса реновирања прозори субили дупли дрвени висине 50 cm, са растојањем између од 30 cm, а након тога замењени су PVC двокрилним прозорима са једним стаклом. У дневном боравку налази се ламинат а у спаваћим собама лесонит плоче, које датирају од времена изградње куће, а међу њима постоје пукотине од 0,5 cm. Улаз у кућу је источно орјентисан и налази се 20 m од брежуљка са дрвећем који држи магистрални пут. Спољни зидови на дневном боравку орјентисани су у правцу север-исток, зидови једне спаваће собе окренути су према истоку и југу, а друге спаваће собе ка југу и западу, и налазе се на заветринској страни. На бочним странама куће налазе се две породичне куће на удаљености од по 15 m.



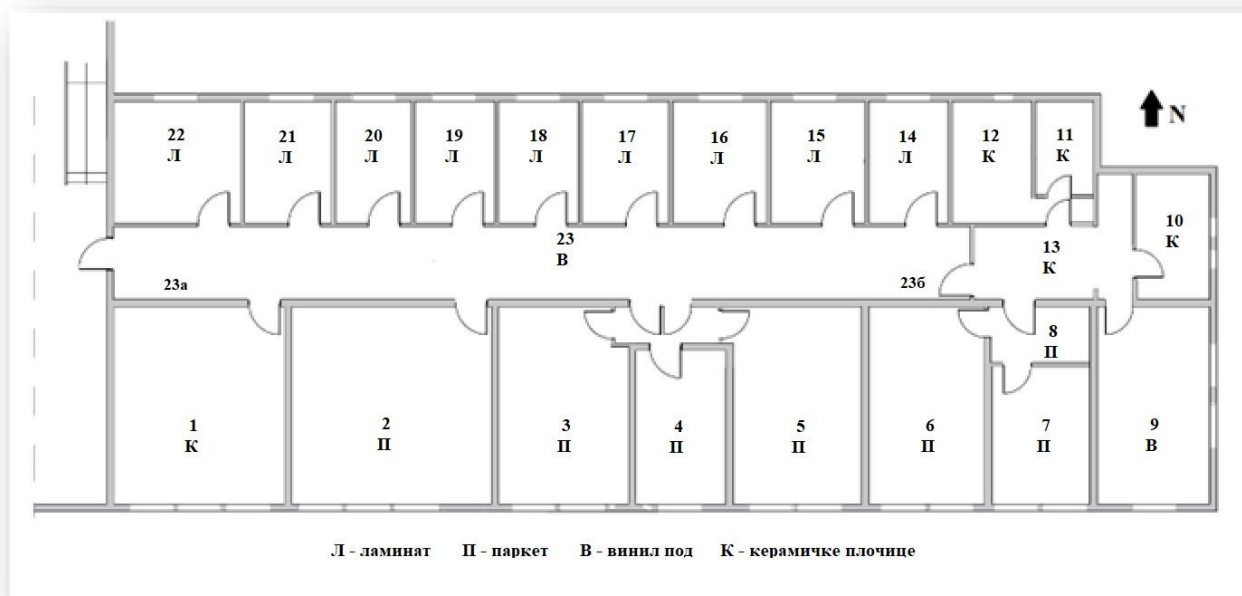
Слика 2.9 Породична тест кућа

### 2.4.1.3 Карактеристике зграде факултета и радних просторија

Проучавана зграда је школа, смештена у Косовској Митровици ( $42.89233^{\circ}\text{N}$ ,  $20.86867^{\circ}\text{E}$ ) (Слика 2.10). Поседује полуукопан подрум и 3 спрата. Зграда је изграђена 1970-их, од бетона, црвене цигле и прекривена је бојом. Фаза реновирања извршена је 2018. године.



Слика 2.10 Проучавана зграда пре реновирања (лево) и после (десно)



Слика 2.11 Шема основе сутерена са радним просторијама

Предмет истраживања су просторије у сутерену површине око  $400 \text{ m}^2$ , које се користе као радни простор. Преградни зидови су урађени накнадно од ригипс табли и постоје између радних просторија 3 и 4, 4 и 5, 6 и 7, 7 и 8; то је заправо и страна у којој се у свим

просторијама налази ламинат као подна облога (Слика 2.11). Северна страна зграде је око 1,8 m испод површине тла, док се јужна страна налази око 1,3 m изнад земље. Процес реконструкције зграде започет је 2 месеца пре прве студије у којој је вршено мерење концентрације радона у радним просторијама. Извршена је термоизолација спољашњих зидова употребом стиропора, а сви дотадашњи дрвени прозори, замењени су PVC прозорима са дуплим стаклом. Реновирањем је обухваћена и парцијална замена подова, стари дрвени подови замењени су ламинатом, керамичким плочицама и винилом; радне просторије 2-8 су биле искључене из овог процеса.

Проучавана зграда има лошу бетонску плочу и изграђена је на песковитом тлу. Пре реновирања све радне просторије су имале паркет или винил под. Након реновирања у просторијама постоје четири врста пода: паркет (нереновиран), ламинат (винил плочице са фолијом преко), винил под и керамичке плочице, као што је приказано у Табели 2.4. Запремина проучаваних просторија креће се од 20 m<sup>3</sup> (остава 11) до 140 m<sup>3</sup> (лабораторија 2, ходник 23а, 23б).

**Табела 2.4** Карактеристике радних просторија

| Број | Намена радне просторије | Врста пода        | Водоснабдевање | Шахт |
|------|-------------------------|-------------------|----------------|------|
| 1.   | Лабораторија            | керамичке плочице | да             | не   |
| 2.   | Лабораторија            | паркет            | да             | да   |
| 3.   | Учионица                | паркет            | не             | не   |
| 4.   | Лабораторија            | паркет            | не             | да   |
| 5.   | Учионица                | паркет            | не             | не   |
| 6.   | Кабинет                 | паркет            | не             | да   |
| 7.   | Кабинет                 | паркет            | не             | не   |
| 8.   | Кабинет                 | паркет            | не             | не   |
| 9.   | Лабораторија            | винил под         | да             | не   |
| 10.  | Учионица                | керамичке плочице | не             | не   |
| 11.  | Остава                  | керамичке плочице | не             | не   |
| 12.  | Тоалет                  | керамичке плочице | да             | не   |
| 13.  | Фоаје                   | керамичке плочице | не             | не   |
| 14.  | Канцеларија             | ламинат           | не             | не   |
| 15.  | Канцеларија             | ламинат           | не             | не   |
| 16.  | Канцеларија             | ламинат           | не             | не   |
| 17.  | Канцеларија             | ламинат           | не             | не   |
| 18.  | Канцеларија             | ламинат           | не             | не   |
| 19.  | Канцеларија             | ламинат           | не             | не   |
| 20.  | Лабораторија            | ламинат           | не             | не   |
| 21.  | Бифе                    | ламинат           | да             | не   |
| 22.  | Канцеларија             | ламинат           | да             | не   |
| 23а. | Ходник                  | винил под         | не             | не   |
| 23б. | Ходник                  | винил под         | не             | не   |

У свим просторијама постоји централно градско грејање које се дистрибуира преко мреже цеви протоком флуида, током грејне сезоне која отприлике траје од октобра до априла, али се велики број просторија догрева електричним грејним уређајима. Током грејне сезоне прозори се отварају ретко, само у раним јутарњим часовима и то на кратко. У згради

постоји само природна вентилација, и ваздух се обнавља једино отварањем прозора. У појединим просторијама постоји водовод и мали покривни отвор у поду (шахт).

#### 2.4.1.4 Дечија обданишта

Дечија обданишта смештена су у северном делу Косова и Метохије, у испитиваној рударској области, једно смештено у Косовској Митровици (42.8946°N и 20.86403°E), а друго у Звечану (42.91089°N и 20.83696°E), (Слика 2.12).



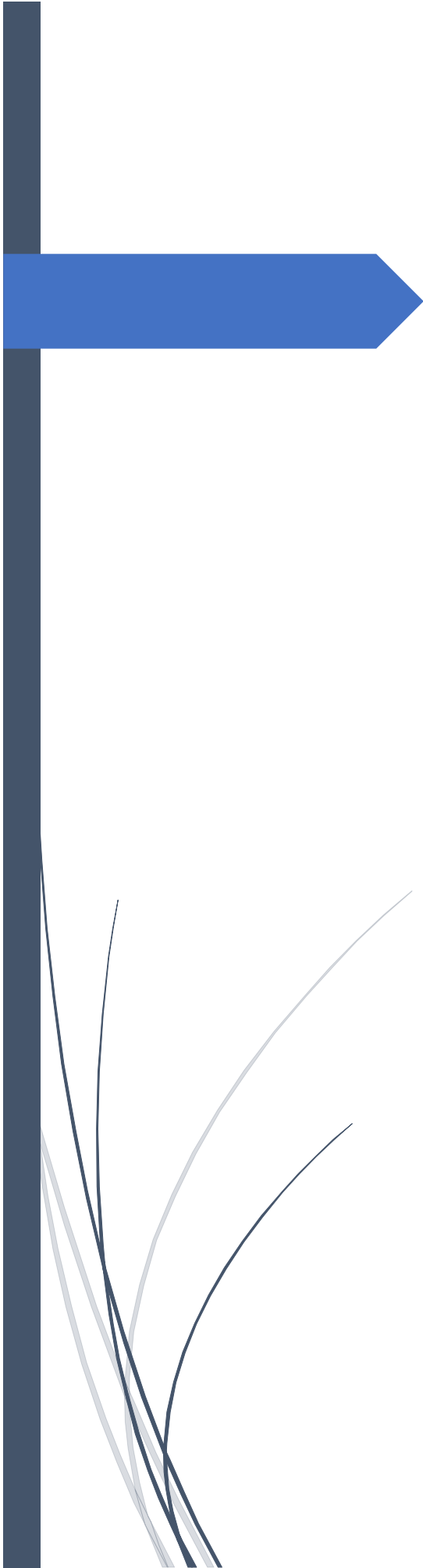
**Слика 2.12** Обданиште у Косовској Митровици (изнад) и Звечану (испод)

Зидови вртића у Косовској Митровици зидани су од глинене цигле, стари део обданишта, породична кућа која је претворена у вртић, грађена 1970-их година, док је већи део дограђен и зидан грађевинским блоковима 2003. и 2010, са постављеном спољашњом изолацијом. Вртић у Звечану састоји се од два одвојена објекта; већи објекат је грађен од бетонских блокова прекривен бетонским зидним плочицама, а мањи од сипорекс блокова, прекривен фасадом. Плафон и плоча изграђени су од слабог бетона. Унутрашњи зидови обложени су бојом а прозори у оба вртића су PVC са дуплим стаклом. Користи се природна вентилација свакодневно. Карактеристике испитиваних соба и објеката дате су у Табели 2.5.

**Табела 2.5** Карактеристике вртића у Косовској Митровици (КМ) и Звечану (ЗВ)

| Ознака просторије | Димензија собе<br>Д×Ш×В(м) | Спратност | Врста пода        | Година градње |
|-------------------|----------------------------|-----------|-------------------|---------------|
| КМ1               | 6,5×5,6×2,7                | П         | ламинат           | 1970          |
| КМ2               | 6,2×9,0×2,7                | П         | паркет            | 1970          |
| КМ3               | 6,6×10,0×2,7               | П         | ламинат           | 2003          |
| КМ4               | 6,9×4,3×2,7                | П         | паркет            | 2010          |
| КМ5               | 4,3×3,3×2,7                | ВП        | паркет            | 2010          |
| КМ6               | 5,8×5,9×2,7                | ВП        | паркет            | 2010          |
| КМ7               | 8,4×6,0×2,7                | ПС        | паркет            | 2010          |
| КМ8               | 8,4×6,0×2,7                | ПС        | паркет            | 2010          |
| КМ9               | 8,4×6,0×2,7                | ПС        | паркет            | 2010          |
| КМ10              | 5,9×8,4×2,7                | ПС        | паркет            | 2010          |
| КМ11              | 16,2×3,5×2,7               | ПС        | керамичке плочице | 2010          |
| КМ12              | 14,7×13,9×2,7              | П         | керамичке плочице | 2010          |
| КМ13              | 3,1×2,1×2,7                | ВП        | керамичке плочице | 2010          |
| ЗВ1               | 8,8×8,6×2,7                | П         | ламинат           | 2010          |
| ЗВ2               | 8,8×8,5×2,7                | П         | ламинат           | 2000          |
| ЗВ3               | 8,7×5,8×2,7                | П         | ламинат           | 2000          |
| ЗВ4               | 8,6×8,6×2,7                | П         | ламинат           | 2000          |
| ЗВ5               | 8,6×8,8×2,7                | П         | ламинат           | 2000          |
| ЗВ6               | 8,7×8,6×2,7                | П         | ламинат           | 2000          |
| ЗВ7               | 6,8×8,7×2,7                | П         | ламинат           | 2000          |
| ЗВ8               | 9,1×4,0×2,7                | П         | ламинат           | 2000          |
| ЗВ9               | 8,0×3,5×2,7                | П         | ламинат           | 2000          |
| ЗВ10              | 18,8×5,8×2,7               | П         | керамичке плочице | 2000          |
| ЗВ11              | 7,4×5,1×3,1                | П         | ламинат           | 2017          |
| ЗВ12              | 7,5×5,0×3,1                | П         | ламинат           | 2017          |

\*П-приземље; ВП-високо приземље; ПС-први спрат



### **3 РЕЗУЛТАТИ МЕРЕЊА И ДИСКУСИЈА**

### 3.1 Идентификација високих концентрација радона у објектима

#### 3.1.1 Резултати пасивне радонске технике

Мерење концентрације радона пасивном радонском техником, угљеним канистерима спроведено је у стамбеним објектима рударског подручја „Трепча“ у близини Косовске Митровице у три одвојене серије, у јулу, новембу и децембару 2019 (Табела 3.1). Примећено је да резултати мерења концентрације радона у свим трима серијама превазилазе вредност од  $300 \text{ Bq m}^{-3}$ , и то: 8/20 (40%), 10/13 (77%) и 13/20 (65%), редом. Концентрације радона у најмање 15 од 26 стамбених објеката (што је око 58%) превазилазиле су горе поменути референтни ниво. Резултати ове студије обављени су у раду (Gulan и др, 2022).

У три куће које су у блиском окружењу, детектују се веома високе концентрације радона, које варирају током времена. Највиша концентрација радона ( $22500 \pm 220 \text{ Bq m}^{-3}$ ), измерена је у новембру у подруму породичне куће 13 (Табела 3.1). Концентрација радона у дневној соби изнад подрума у истој серији мерења износила је  $4010 \pm 10 \text{ Bq m}^{-3}$ , док је у децембру била  $10816 \pm 11 \text{ Bq m}^{-3}$  (Табела 3.1). Ову изузетно високу вредност забележио је и други тип детектора, дигитални радон детектор (Airthings Corentium Home), који је постављен истовремено са угљеним канистерима, да би се извршила брза упоредна анализа концентрације радона. Монитор је достигао горњу, максималну границу детекције од  $9999 \text{ Bq m}^{-3}$ , и након 5 сати рада се искључио.

У дневној соби суседне куће 14, (на удаљености 5 m од претходне), концентрација радона, измерена у новембру и децембру је била такође веома висока. У кућама 13 и 14 забележено је значајно повећање концентрације радона од лета до касне јесени, што се највероватније може довести у везу са минирањима у подземним тунелима рудника „Стари Трг“, који је ваздушном линијом близу испитиваних кућа. Насупрот томе, током истих периода мерења (у новембру и децембру) у кући 16 (која је удаљена 50 m од кућа 13 и 14), концентрација радона је нагло пала, а у јулу је износила  $16273 \pm 162 \text{ Bq m}^{-3}$ . Ове флукуације (13, 14 и 16), јасно одражавају динамику која се доводи у везу са геологијом рударског подручја, пукотинама и раседима као и геологији карста и глацијалне морене. Важно је напоменути, на локацији 23 (пре овог истраживања) концентрација радона измерена угљеним канистерима, износила је  $726 \pm 17 \text{ Bq m}^{-3}$  (фебруар 2019), што се приметно разликује од резултата приказаних у Табели 3.1.

Иако су извршена само краткорочна мерења концентрације радона, она су била од изузетне важности за брзо откривање и идентификацију високих концентрација радона у објектима ове рударске области. Поновљена мерења у објектима 1, 3, 13 и 14, показала су више вредности радона у зимском него у летњем периоду, док је у објектима 16 и 26 уочена супротна зависност (Табела 3.1). Својства земљишта и специфичне карактеристике сваког објекта понаособ могу значајно утицати на сезонске промене у концентрацији радона (Pressyanov и др, 2019; Safaro и др, 2014), али оне нису узете у обзир у овом контексту; такође, примена униформног сезонског фактора корекције (за средњу годишњу концентрацију радона) није била могућа због дизајна студије.

У објектима који су имали темељ од локалног камена, идентификовано је 24 од 32 мерења (75%) са концентрацијом радона изнад референтног нивоа, на основу резултата из Табеле 3.1. Како је закључено у ранијим студијама, ова област спада у регионе са повећаним

ризиком од радона који је у највећој мери изазван локалном геологијом (Gulan и др, 2017). С обзиром да су повишене концентрације радона (који прелази  $300 \text{ Bq m}^{-3}$ ), идентификоване у 15 од 26 стамбених објеката, претпоставка је да је ово подручје склоно радону (Radon Prone Area-RPA). Међутим, ову индикацију треба потврдити укључивањем нових објеката и дугорочним мерењима, с обзиром да активносна концентрација радона показује значајну варијабилност током времена.

**Табела 3.1** Три серије мерења концентрације радона угљеним канистерима

| Бр. | Година градње | Спратност       | Просторија | Концентрација радона ± мерна несигурност ( $\text{Bq m}^{-3}$ ) |                                                                           |                          |
|-----|---------------|-----------------|------------|-----------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|--------------------------|
|     |               |                 |            | Јул                                                             | Новембар                                                                  | Децембар                 |
| 1.  | 1970.         | сутерен         | A1         | 565±15                                                          | под: 1217±24<br>сто: 832±15                                               | -                        |
|     |               | сутерен         | A2         | 560±14                                                          | 1078±20                                                                   | -                        |
|     |               | сутерен         | Б          | 475±13                                                          | 756±17                                                                    | -                        |
| 2.  | 1973.         | високо приземље | А          | 57±5                                                            | -                                                                         | -                        |
|     |               | приземље        | В          | 85±6                                                            | -                                                                         | -                        |
| 3.  | 1965.         | високо приземље | А          | 517±14                                                          | под: 831±17<br>сто: 949±19                                                | -                        |
|     |               | подрум          | В          | 264±10                                                          | -                                                                         | -                        |
| 4.  | 1999.         | приземље        | В          | 114±6                                                           | -                                                                         | -                        |
| 5.  | 2017.         | приземље        | В          | 65±5                                                            | -                                                                         | -                        |
| 6.  | 1980.         | приземље        | В          | 258±10                                                          | -                                                                         | -                        |
| 7.  | 1980.         | приземље        | Б          | -                                                               | -                                                                         | 930±18                   |
| 8.  | 1990.         | високо приземље | А          | -                                                               | -                                                                         | 542±13                   |
|     | 1960.         | високо приземље | Б          | -                                                               | -                                                                         | 424±12                   |
| 9.  | 1940.         | приземље        | А          | -                                                               | -                                                                         | 781±17                   |
|     |               | приземље        | Б          | -                                                               | -                                                                         | 873±13                   |
| 10. | 1970.         | високо приземље | А          | -                                                               | -                                                                         | 444±12                   |
|     |               | приземље        | Б          | -                                                               | -                                                                         | 2644±36                  |
| 11. | 1920.         | приземље        | А          | -                                                               | -                                                                         | 765±14                   |
|     |               | приземље        | Б          | -                                                               | -                                                                         | 725±16                   |
| 12. | 1990.         | приземље        | А          | -                                                               | -                                                                         | 197±8                    |
|     |               | приземље        | Б          | -                                                               | -                                                                         | 151±7                    |
| 13. | 1964.         | високо приземље | Б          | 140±8                                                           | 4010±10                                                                   | 10816±11                 |
|     |               | приземље        | В          | 1109±21                                                         | 22500±220                                                                 | -                        |
| 14. | 1930.         | приземље        | А          | 195±9                                                           | 7315±80                                                                   | 16401±162                |
| 15. | 1980.         | приземље        | Б          | 554±14                                                          | -                                                                         | -                        |
| 16. | 1950.         | приземље        | Б          | под близу зида:<br>16273±162                                    | под близу зида:<br>1649±28<br>сто: 962±17<br>ормар близу зида:<br>1319±24 | под близу зида:<br>144±7 |
| 17. | 1960.         | приземље        | В          | 144±7                                                           | -                                                                         | -                        |
| 18. | 1970.         | подрум          | В          | 209±9                                                           | -                                                                         | -                        |
| 19. | 1950.         | приземље        | A1         | -                                                               | 474±13                                                                    | -                        |
|     |               | приземље        | A2         | -                                                               | 447±13                                                                    | -                        |
| 20. | 1980          | приземље        | А          | -                                                               | -                                                                         | 316±11                   |

|     |       |            |    |        |                                          |       |
|-----|-------|------------|----|--------|------------------------------------------|-------|
|     |       | приземље   | Б  | -      | -                                        | 364±9 |
| 21. | 1965. | приземље   | А  | -      | -                                        | 232±6 |
|     |       | приземље   | Б  | -      | -                                        | 153±7 |
| 22. | 1980. | први спрат | А1 | -      | -                                        | 121±7 |
|     |       | приземље   | А2 | -      | -                                        | 36±4  |
| 23. | 1967. | сутерен    | Г1 | -      | под: 353±12<br>сто: 225±9                | -     |
|     |       | сутерен    | Г2 | -      | под: 186±8<br>ормар близу зида:<br>101±5 | -     |
| 24. | 1998. | приземље   | А  | 122±7  | -                                        | -     |
| 25. | 1982. | приземље   | Б  | 178±8  | -                                        | -     |
| 26. | 1900. | приземље   | В  | 663±15 | под: 297±11<br>сто: 287±10               | -     |

\*А-спаваћа соба; Б-дневни боравак; В-подрум, остава; Г-радна соба

### 3.1.2 Резултати активне радонске технике

На четири одабране локације у периоду од 11-13 новембра 2019. године извршено је мерење концентрације радона у ваздуху, земљишту и води, активном мерном техником са уређајем RAD7 (Табела 3.2). На мерним местима 1 и 26 није било значајних варијација у концентрацији радона у затвореном простору, тј. нису уочене нагле промене јер је извршено само једно мерење. Међутим значајне флукуације у концентрацији радона у затвореном простору примећене су у наредна два дана на локацијама 16 и 23. Резултати са мерног места 16 значајно су варирали: од  $2157 \pm 126 \text{ Bq m}^{-3}$  током поподнева, затим су се у поноћ повећали на вредност од  $2843 \pm 217 \text{ Bq m}^{-3}$ , а након тога ујутру снижили на  $1449 \pm 104 \text{ Bq m}^{-3}$ , у току једног дана (Табела 3.2). Упоредна мерења пасивном радонском техником, угљеним канистерима у истом периоду показала су веома занимљиве резултате:  $962 \pm 17 \text{ Bq m}^{-3}$  (канистер био изложен на столу у централном делу просторије, 1 m изнад пода);  $1319 \pm 24 \text{ Bq m}^{-3}$  (канистер на ормару близу зида 1,2 m изнад пода); и  $1649 \pm 28 \text{ Bq m}^{-3}$  (канистер на поду близу зида) (Табела 3.1). Сличне аномалије у концентрацији радона јавиле су се у року од 1 сата континуираних мерења и на локацији 23, од  $200 \pm 94 \text{ Bq m}^{-3}$  до  $2146 \pm 262 \text{ Bq m}^{-3}$ , да би се вредности концентрације радона следећег дана смањиле на ниво минималне детекције  $21 \text{ Bq m}^{-3}$  (Табела 3.2). За разлику од првог дана (11. новембар), када се ваздух унутар просторије сакупљао на поду у континуираном режиму мерења, другог дана (13. новембар) усисни отвор уређаја RAD7 био је постављен на столу 1 m изнад пода, што генерално не би требало да утиче на мерење због хомогене дистрибуције радона у просторији. Овако велико одступање могло би се објаснити дотоком свежег ваздуха кроз пукотине у подној облози близу зидова. Такође се може довести у везу са појавом земљотреса у северозападној Албанији, 13 дана касније, магнитуде  $M=6,4$  (26. новембар,  $41.315^\circ\text{N}$ ,  $19.479^\circ\text{E}$ ,  $H=7 \text{ km}$ ). Земљотрес се осетио и у испитиваном подручју које се од епицентра налази североисточно, ваздушном линијом удаљено око 200 km. Геодинамички процеси у Земљиној кори и на површини могу проузроковати нагли излазак радона из земљишта. У околини Косовске Митровице постоји зона дубоког раседа и сеизмотектонска зона што омогућава транспорт радона кроз пукотине због градијента притиска услед предсеизмичког напрезања. Високе вредности концентрација радона након којих долази до наглог пада предходе појави

земљотреса непосредно пред потрес, што радон означава као прекурсор земљотреса (Gregorič и др, 2012; Hwa Oh и Kim, 2015; Kim и др, 2018).

**Табела 3.2** Резултати мерења RAD7 уређајем на одређеним локацијама у ваздуху, земљишту у близини објекта и подземним водама из бунара у новембру 2019. године

| Бр. | Просторија | Датум мерења            | Протокол мерења                                                                                                                   | Концентрација радона                  |                                  |                                  |
|-----|------------|-------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
|     |            |                         |                                                                                                                                   | Ваздух (Bq m <sup>-3</sup> )          | Земни гас (kBq m <sup>-3</sup> ) | Вода (Bq l <sup>-1</sup> )       |
| 1.  | A1         | 12.11.2019              | Континулно активно мерење у нормалном режиму „grab“ (хватање) протокол за земни гас и „sniff“ мод, WAT-250 за воду у „sniff“ моду | распон 807-926<br>просечна 874±61     | 28,1±2,5                         | 46±3                             |
| 16. | Б          | 11.11.2019 и 12.11.2019 | Континулно активно мерење у нормалном режиму „grab“ (хватање) протокол за земни гас и „sniff“ мод, WAT-250 за воду у „sniff“ моду | распон 1449-2843<br>просечна 2159±478 | 7,2±1,2                          | 20,4±2,9                         |
| 23. | Г1         | 11.11.2019              | Континулно активно мерење у нормалном режиму усисна цев RAD7 на поду близу зида                                                   | распон 200-2146<br>просечна 1228±896  | -                                | -                                |
|     |            | 13.11.2019              | Континулно активно мерење у нормалном режиму усисна цев RAD7 на столу, центар просторије                                          | распон 21-112<br>просечна 71±39       | -                                | -                                |
| 26. | В          | 12.11.2019              | Континулно активно мерење у нормалном режиму „grab“ (хватање) протокол за земни гас и „sniff“ мод, WAT-250 за воду у „sniff“ моду | распон 181-362<br>просечна 270±68     | 80,8±4,7                         | славина1: 34±5<br>славина2: 23±3 |

\*А- спаваћа соба; Б- дневни боравак; В-подрум, остава; Г- радна соба

### 3.1.3 Процена геогеног потенцијала

У циљу процене геогеног потенцијала радона за објекте 1, 16 и 26 примењена је методологија која се заснива на радонском индексу према тежинском проценту fine фракције у земљишту (честице мање од 65 µm) и концентрацији радона у земном гасу (Barnet и др, 2008) (Табела 3.3). Земљишта са тежинским процентом fine фракције испод 15% класификују се као високопропусна, у распону од 15-65% као средње пропусна, а у случају fine фракције изнад 65% као слабо пропусна.

Добијене расподеле величине честица за испитана три узорка земљишта померена су ка већој фракцији, што указује на већу пропустљивост земљишта за гас радон и већи радонски потенцијал. Максимална вредност концентрације радона у земљишту, измерена је у воћњаку на локацији 26 (Табела 3.2), док је највиша вредност концентрације радона у узорку воде са чесме, измерена на локацији 1. Међутим на локацијама 1 и 16 у земљишту је детектована ниска до умерена концентрација радона у земљишту (28,1±2,5 kBq m<sup>-3</sup> и 7,2±1,2 kBq m<sup>-3</sup>, респективно), што имплицира на умерен и низак радонски индекс (Табела 3.4).

Концентрације радона у подземним водама које варирају од 20,4 до 46 Bq l<sup>-1</sup>, су типичне за стенске водоносне слојеве у седиментним геолошким супстратима.

**Табела 3.3** Процена радонског индекса (ризика) (Barnet и др, 2008)

| Класификација индекса               | радонског | Концентрација земног гаса радона C (kBq m <sup>-3</sup> ) |         |         |
|-------------------------------------|-----------|-----------------------------------------------------------|---------|---------|
| Низак                               |           | C<30                                                      | C<20    | C<10    |
| Средњи                              |           | 30≤C<100                                                  | 20≤C<70 | 10≤C<30 |
| Висок                               |           | C≥100                                                     | C≥70    | C≥30    |
| Пропустљивост на основу гранулације |           | ниска                                                     | средња  | висока  |

**Табела 3.4** Максималне концентрације радона у затвореном простору и концентрације радона у земљишту са процентом fine фракције и проценем геогеног радонског потенцијала (Geogenic Radon Potencial-GRP)

| Објекат | Максимална концентрација радона у затвореном (Bq m <sup>-3</sup> ) | Концентрација радона у земљишту (kBq m <sup>-3</sup> ) | Фина фракција (%) | GRP    |
|---------|--------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|-------------------|--------|
| 1       | 1217±24                                                            | 28,1±2,5                                               | 28,78             | средњи |
| 16      | 16273±162                                                          | 7,2±1,2                                                | 32,37             | низак  |
| 26      | 663±15                                                             | 80,8±4,7                                               | 26,68             | висок  |

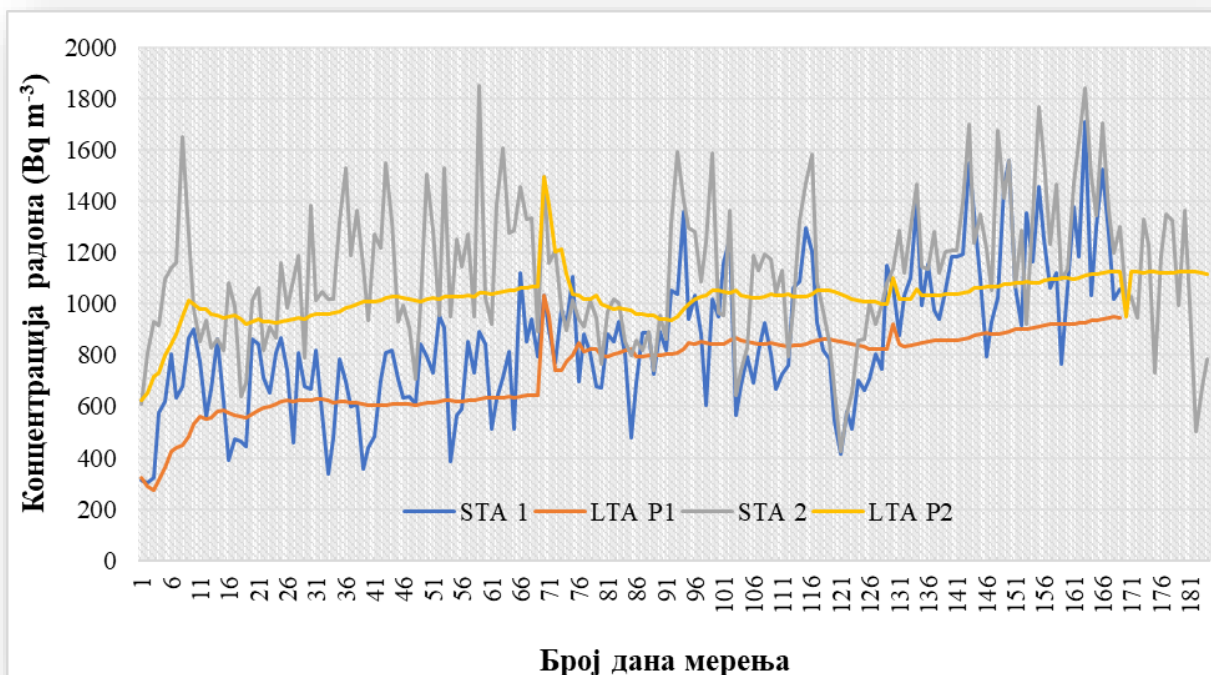
### 3.2 Мерење концентрације радона у тест кући испитиваног рударског подручја

Изразито високе концентрације радона забележене су у више наврата у једној породичној кући испитиване рударске области. Стога се приступило детаљнијој анализи утицаја различитих фактора који су могли довести до таквих резултата. Испитан је утицај метеоролошких параметара на концентрацију радона у затвореном и геолошке карактеристике. Затим је концентрација радона праћена у временском периоду од годину дана, након чега су примењене неке од мера радијационе заштите и извршена контролна мерења како би се утврдило да ли је дошло до промена у погледу смањења концентрације радона. Резултати овог истраживања су објављени у раду (Spasić и Gulan, 2022).

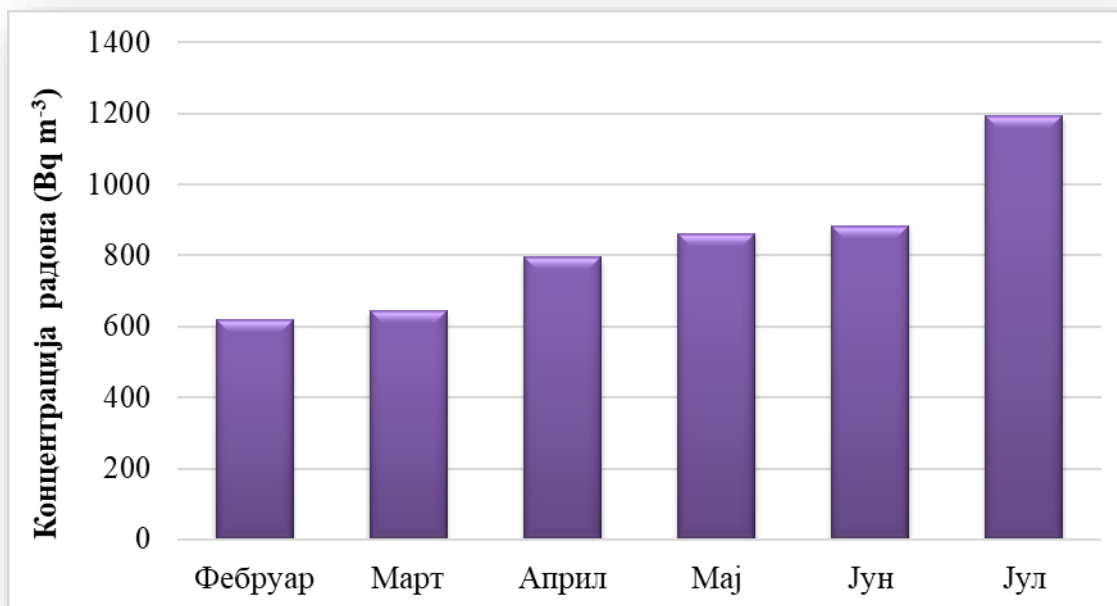
Мерење концентрације радона спроведено је у два просторијама (Слика 3.1). Дневне концентрације радона варирале су од 303-1708 Bq m<sup>-3</sup> у дневном боравку (P1) и од 427-1852 Bq m<sup>-3</sup> у дечијој соби (P2), док су вредности за дугорочне просечне концентрације редом биле 949 Bq m<sup>-3</sup> и 1116 Bq m<sup>-3</sup>. Током периода мерења није било дана са концентрацијом радона испод референтног нивоа препорученог од стране EURATOM (European Council, 2014).

Просечне концентрације радона по месецима мерења израчунате су као измерене дневне вредности усредњене за сваки месец за дневну и дечију собу и приказане на Сликама 3.2 и 3.3, редом. Приметан је раст просечних месечних концентрација радона од фебруара до јула 2022. године у дневној соби (боравку), док су у дечијој соби просечне концентрације у мају, јуну и августу ниже у односу на остале месечне вредности радона. Међутим, у

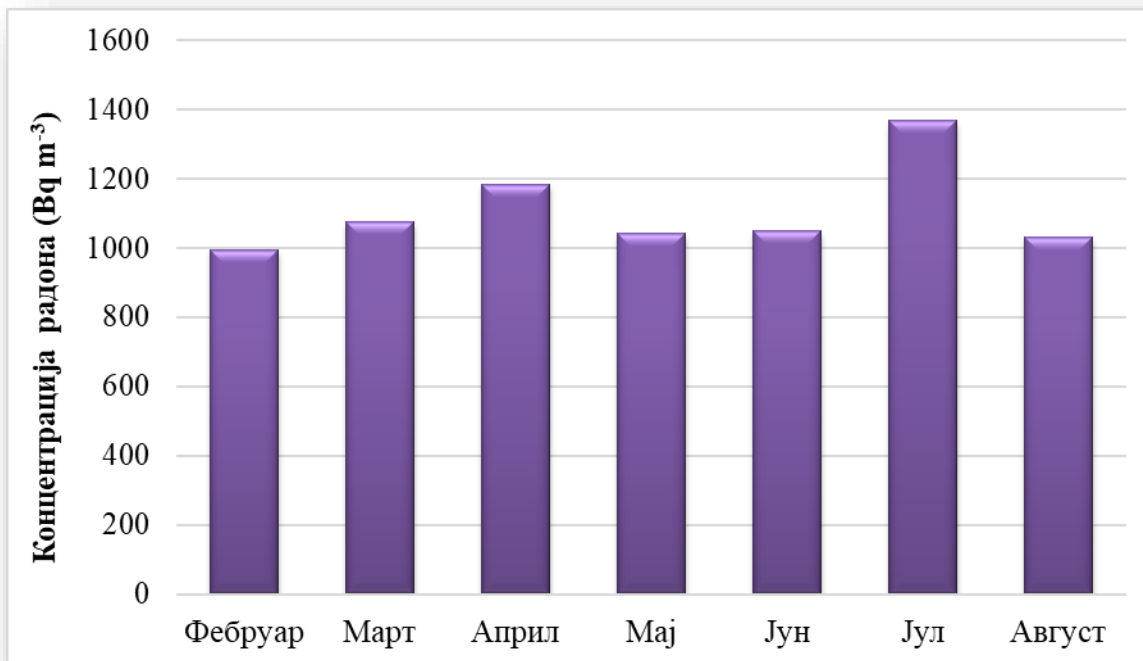
дечијој соби просечна месечна концентрација радона није била нижа од  $1000 \text{ Bq m}^{-3}$ , и практично је, уз изузетак спорог пораста, уједначена током целог периода мерења.



**Слика 3.1** Краткорочна просечна концентрација (STA) и дугорочна просечна концентрација радона  $^{222}\text{Rn}$  (LTA) за дневну собу (1) и дечију собу (2)



**Слика 3.2** Просечне месечне концентрације радона  $^{222}\text{Rn}$  (дневни боравак)



Слика 3.3 Просечне месечне концентрације радона  $^{222}\text{Rn}$  (дечија соба)

### 3.2.1 Утицај метеоролошких параметара на концентрацију радона у тест кући

Радон у затвореном и метеоролошки параметри (спољашња-унутрашња температура, влажност, притисак, унутрашња тачка росе, правац и брзина ветра и топлотни индекс) симултано су праћени у периоду од зиме до лета (13. фебруар 2021-15. август 2021). Концентрације радона у затвореном мерене су Airthings Corentium Home детекторима, док су метеоролошки параметри праћени помоћу метеоролошке станице (WTH600–E-en–GB\_v1.0, <https://www.manualslib.com/manual/2159777/Extech-Instruments-Wth600-E.html>).

Иако је тренд флукуације радона у обе просторије уједначен, уочене дневне варијације постоје у прва два месеца мерења. Узрок томе може бити различит начин грејања зими, (грејање у дневном боравку је на чврсто гориво, а у соби на струју. У периоду пролеће/лето концентрације радона су прилично уједначене са уоченим бржим растом у дневном боравку. Разлози за разлике у концентрацијама радона могу бити у инфилтрацији кроз различите структуре пода, као и у вентилацији просторија према уобичајеним навикама укућана. Дневни боравак поседује ламинат, док су у спаваћој соби лесонит плоче из периода градње куће са значајним међупростором на спојевима. Поједини аутори су дошли до закључка да већи размак доприноси већој концентрацији радона у затвореном из ободних спојева, и да може допринети повећању радона од 31% до 62% за размак у спојевима од 1 до 20 mm, респективно (Munoz и др, 2017).

Корелације са метеоролошким параметрима анализиране су помоћу Пирсоновог коефицијента корелације ( $r$ ), који даје информацију у ком степену ови параметри утичу на

концентрацију радона (Табела 3.5). За корелациону анализу коришћене су дневне просечне концентрације за обе просторије (STA 1 и STA 2).

Концентрације радона у затвореном биле су у негативној корелацији са спољним притиском ( $r=-0,26$ ) и брзином ветра ( $r=-0,41$ ), али у позитивној корелацији са унутрашњом/спољашњом температуром ( $r=0,45$  и  $r=0,45$ , респективно); влажношћу у затвореном простору ( $r=0,56$ ) и унутрашњом тачком росе ( $r=0,53$ ). Разлика у влажности је такође у позитивној корелацији, док нису нађене јасне корелације са осталим метеоролошким параметрима (спољашња влажност и падавине).

**Табела 3.5** Минимале и максималне дневне вредности метеоролошких параметара и Пирсонови коефицијенти корелације

| Метеоролошки параметри     | Минимум | Максимум | Пирсонов коефицијент корелације |
|----------------------------|---------|----------|---------------------------------|
| Унутрашња температура (°C) | 17,2    | 27,2     | 0,45                            |
| Спољашња температура (°C)  | -5,9    | 41,8     | 0,40                            |
| Разлике у температури (°C) | -15     | 24,6     | -0,07                           |
| Унутрашња влажност (%)     | 36      | 76       | 0,56                            |
| Спољашња влажност (%)      | 19      | 91       | 0,03                            |
| Разлика у влажности (%)    | -34     | 56       | 0,30                            |
| Спољашњи притисак (hPa)    | 993     | 1025     | -0,26                           |
| Унутрашња тачка росе (°C)  | 4       | 22,5     | 0,53                            |
| Падавине (mm)              | 0       | 8        | 0,09                            |
| Брзина ветра (m/s)         | 0       | 3,7      | -0,41                           |

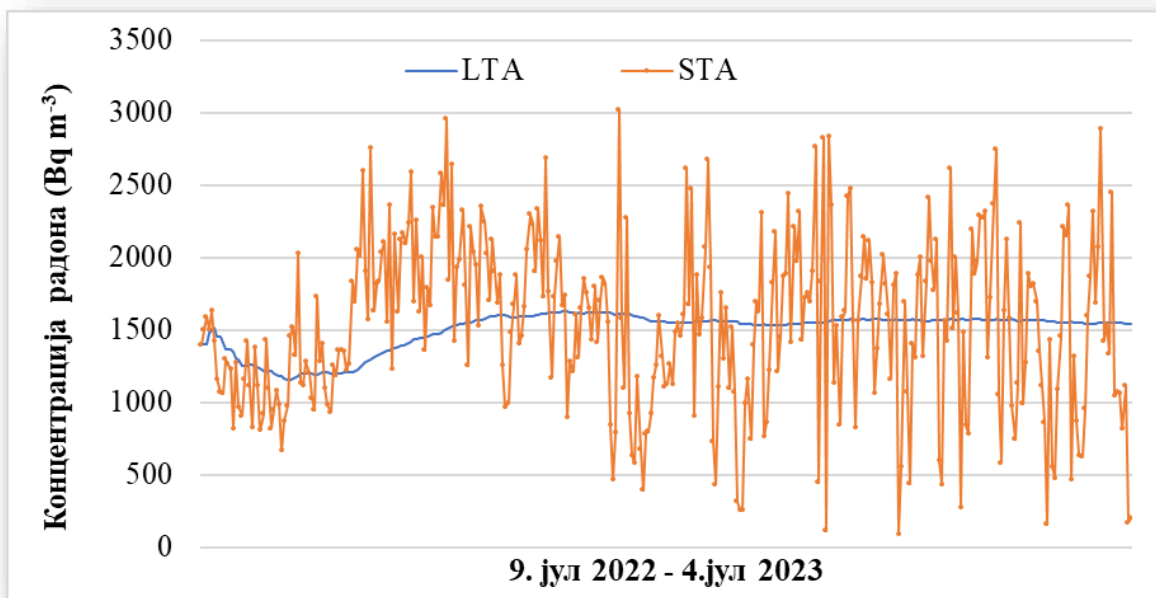
Ова мерења су у сагласности са ранијим годишњим мерењима радона спроведеним CR-39 детекторима у два узастопна периода у овој кући. Тако је концентрација радона пре 10 година била  $545 \text{ Bq m}^{-3}$  и  $446 \text{ Bq m}^{-3}$  у дневној соби, односно  $1216$  и  $1034 \text{ Bq m}^{-3}$  у дечијој соби (Gulan, 2014). Измерена просечна концентрација радона од  $810 \text{ Bq m}^{-3}$  ( $881 \text{ Bq m}^{-3}$  у децембру-мају 2010/2011 и  $740 \text{ Bq m}^{-3}$  за период, мај-децембар 2011), указује да земљиште и локални камен представљају важне изворе за радон у затвореном простору (Gulan и др, 2017).

### 3.2.2 Годишње мерење концентрације радона

Годишње мерење концентрације радона спроведено је у још једној спаваћој соби тест куће у периоду од 9. јула 2022 до 4. јула 2023. Резултати ове студије су објављени у раду (Spasić и др, 2024). Концентрација радона мерена је помоћу Airthings Corentium Home детектора и бележене су свакодневно у временском периоду од 15-16 h (Слика 3.4). Детектор је био постављен на столу у средишту просторије даље од врата и прозора. Просечне месечне вредности концентрације радона приказане су на Слици 3.5.

Дневне концентрације радона варираше су у опсегу од  $91$ - $3017 \text{ Bq m}^{-3}$ , са просечном краткорочном (STA) концентрацијом радона од  $1530 \text{ Bq m}^{-3}$ . Током целогодишњег мерења забележено је тек само неколико STA вредности које су биле испод референтног нивоа. Дугорочна просечна (LTA) концентрација радона током године износила је  $1499 \text{ Bq m}^{-3}$ . Не

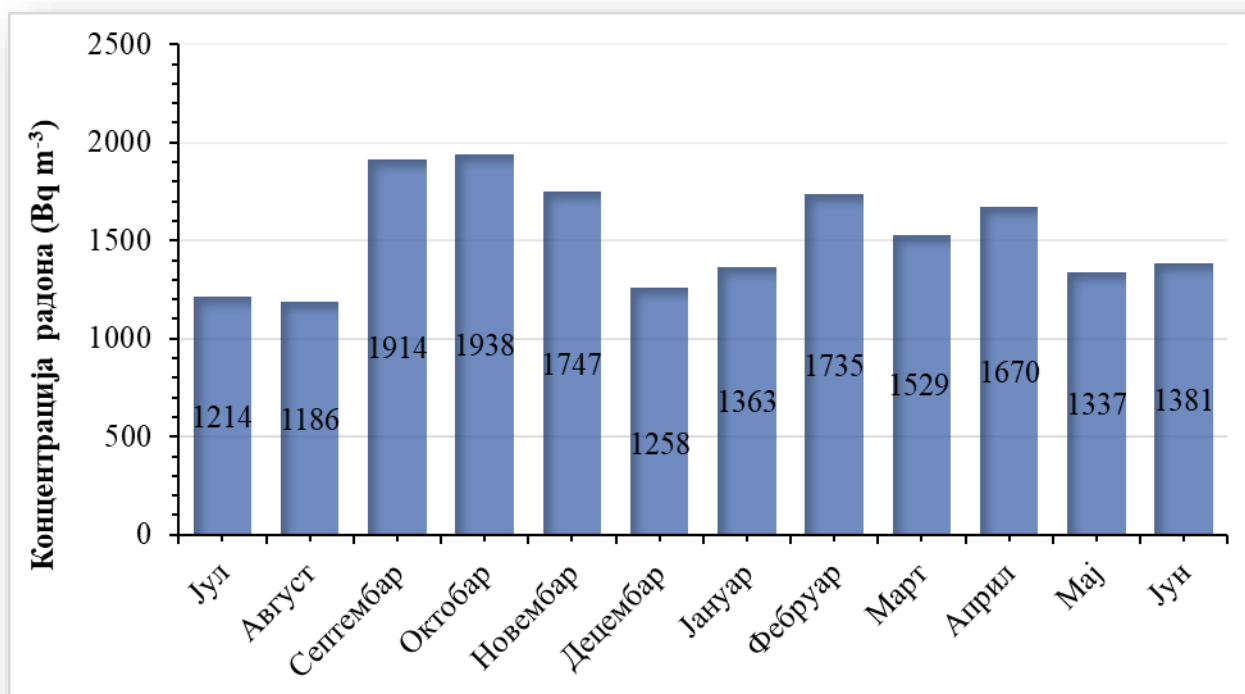
постоји јасно утврђен образац по коме су се мењале месечне концентрације радона. Повишене просечне концентрације радона примећене су у јесењем периоду, а ниже у топлијем периоду. Просечна концентрација за периоде: септембар-децембар, децембар-фебруар, март-мај, јун-август била је 1868, 1443, 1509 и 1246  $\text{Bq m}^{-3}$ , респективно, што је у добром сагласју са појединим студијама (Denman и др, 2007b; Papastefanou и др, 1994; Tasköprü и др, 2023). Анализом резултата уочен је значајан пад концентрације радона у децембру као и велике дневне флукуације. Узрок томе може бити појачано проветравање собе од стране укућана и слабо загревање електричном грејалицом. Високе концентрације радона током лета објављене су у другим студијама (Wilson и др, 1991; Spasić и Gulan, 2022).



**Слика 3.4** Краткорочна просечна (STA) и дугорочна просечна (LTA) концентрација радона у спаваћој соби тест куће током једне године

У испитиваној рударској области забележен је повишен ниво природних радионуклида у камену који је коришћен за изградњу већине старијих кућа (Spasić и Gulan, 2022). Садржај урана  $^{238}\text{U}$ , радијума  $^{226}\text{Ra}$ , торијума  $^{232}\text{Th}$  и калијума  $^{40}\text{K}$  у камену који је коришћен за градњу тест куће је:  $130 \pm 6 \text{ Bq kg}^{-1}$ ,  $50,3 \pm 0,6 \text{ Bq kg}^{-1}$ ,  $125,0 \pm 2,2 \text{ Bq kg}^{-1}$  и  $1010 \pm 40 \text{ Bq kg}^{-1}$ , респективно. Ово може бити један од главних узрока повишене концентрације радона, али делимично може и бити последица технолошких активности као што су честа минирања у подземним рудницима (Wysocka, 2016). Такође се може довести у везу са близином зоне дубоког раседа и сеизмотектонске зоне у околини Косовске Митровице које омогућавају транспорт радона кроз пукотине због градијента притиска услед предсеизмичког напрезања (Catalano и др, 2012). Генерално, растојање мање од 150 m од већег раседа може имати већи утицај на аномално повећање радонског потенцијала (Drolet и Martel, 2016). Штавише обала реке Ибар налази се на удаљености од 50 m од куће, тако да на повећану дифузију радона може утицати већа порозност песка и шљунка (Yusuff и др,

2019), или нагиб површине земљишта испред куће, јер обронци имају пропусније земљиште дозвољавајући већу еманацију радона (Carrion-Matta и др, 2021; Cho и др, 2015).



**Слика3.5** Просечне месечене концентрације радона (спаваћа соба) (Spasić и др, 2024)

### 3.3 Мерење концентрације радона у радним просторијама

Ова студија је спроведена у циљу добијања брзих и корисних информација о нивоима радона у затвореном простору радних просторија Природно-математичког факултета у Косовској Митровици, пре и након примена мера енергетске ефикасности. Главни циљеви су били да се:

- анализирају узроци који доводе до различитих концентрација радона у подрумским радним просторијама зграде која је термо-изолационо обновљена и карактеристике грађевинских материјала одговорних за акумулацију радона;
- процени утицај различитих типова подних облога на концентрацију радона у затвореном простору;
- упореде два независна истраживања концентрације радона са одређеним мерењима пријављених пре процеса реновирања.

Прво једномесечно истраживање спроведено је током грејне сезоне 2018/2019, употребом Airthings Corentium детектора, у циљу процене нивоа ризика од изложености радону за студенте и особље, у десет најфреквентнијих просторија. Друго истраживање, након добијених првих резултата у којима је примећена неочекивано велика варијација у

концентрацији радона међу просторијама, спроведено је 2021. године; тада су коришћени угљени канистери који су били излагани 48 h у 23 просторије, да би се истражио утицај реновирања различитих типова подова на ниво радона у затвореном простору. Резултати овог истраживања су објављени у раду (Gulan и др, 2023).

Резултати првог истраживања показали су да су дугорочне просечне месечне концентрације (LTA) у десет просторија значајно варирале од 32 до 573 Bq m<sup>-3</sup> (Табела 3.6); а просечна вредност радона за целокупно мерење износила је 211 Bq m<sup>-3</sup>. Краткорочна мерења концентрације радона (STA), показала су варијације од 6-1603 Bq m<sup>-3</sup>, и представљене су графички за различите типове подних облога (Слика 3.5). Коефицијент варијације на основу STA вредности за радне просторије варирао је од 14,5 до 55%.

Испитивана је корелација ових концентрација и са спољашњом температуром која је била позитивна и кретала се од занемарљиве (Спирманов коефицијнт корелације  $\rho=0,033$ , за просторију 4) до умерене ( $\rho=0,470$ , просторија 14).

Резултати другог истраживања су указали на приметну разлику у концентрацији радона између радних просторија са различитим подним облогама (Табела 3.6). Просечне концентрације радона груписане према врсти пода биле су: 327 Bq m<sup>-3</sup> за старе дрвене, нереновиране подове (паркет), 227 Bq m<sup>-3</sup> за керамичке плочице, 146 Bq m<sup>-3</sup> за винил подове и 71 Bq m<sup>-3</sup> за просторије у којима је био ламинат. Нормална дистрибуција овог сета података је проверена помоћу Shapiro-Wilk теста. Пошто реновирање подова није обављено у свим радним просторијама, коришћен је независни  $t$  тест, да би се испитале разлике у концентрацији радона измерених у просторијама са нереновираним и реновираним подовима (327 Bq m<sup>-3</sup> наспрам 129 Bq m<sup>-3</sup>). Ови резултати су у складу са чињеницом којом се тло сматра главним извором радона у затвореном простору.

У складу са Kruksal-Wallis тестом, такође је утврђена значајна разлика у групи између типова подних облога-паркета, ламината, винил подова и керамичких плочица ( $\text{Sig}=0,001$ ). Интересантно је приметити да су радне просторије на северној страни зграде имале нижу концентрацију радона (средња 110 Bq m<sup>-3</sup>, медијана 67 Bq m<sup>-3</sup>) у односу на оне у јужном делу (средња 279 Bq m<sup>-3</sup>, медијана 281 Bq m<sup>-3</sup>), иако је северна страна више укопана у земљу (због нагиба терена). Разлика у концентрацијама између северног и јужног крила зграде била је статистички значајна (Mann-Whitney  $U$  тест,  $\text{Sig}=0,004$ ), одражавајући чињеницу да је врста пода вероватно имала велики утицај на концентрацију радона у затвореном простору. Поред тога израчунате вредности флукса ексхалације радона у највећим радним просторијама (1, 2, 9 и 22) са керамичким плочицама, паркетом, винилом и ламинатом биле су: 30,9; 80,4; 27,6 и 20,5 Bq m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>, респективно.

Прорачуната просечна концентрација радона за све делове зграде (што подразумева средњу вредност концентрације радона за сваку радну просторију понаособ), износила је 189 Bq m<sup>-3</sup>. Светска здравствена организација препоручује годишњу просечну границу концентрације радона нижу од 100 Bq m<sup>-3</sup> (WHO, 2009), која је прекорачена у готово свим просторијама, осим у оним са ламинатом, док је ниво од 300 Bq m<sup>-3</sup>, препоручен од стране Directive 2013/59/ERATOM (European Council, 2014) прекорачен у 4 радне просторије са подном облогом од паркета и остави са керамичким плочицама.

**Табела 3.6** Резултати и упоредне анализе из три различите студије у згради факултета пре и после реновирања

| Бр  | Намена радне просторије | Концентрација радона ( $\text{Bq m}^{-3}$ ) |                  |            |        | Варијације између студија |             |                              |
|-----|-------------------------|---------------------------------------------|------------------|------------|--------|---------------------------|-------------|------------------------------|
|     |                         | Пре реновирања                              | После реновирања |            |        | 2018 и 2010               | 2021 и 2018 |                              |
|     |                         | 2010/2011                                   | 2018/2019        | 2021       |        |                           |             | у односу на почетну вредност |
|     |                         |                                             |                  | полица >1m | под    |                           |             |                              |
| 1.  | Лабораторија            | -                                           | 87               | 98±5       | 97±5   |                           | 11          | 13%                          |
| 2.  | Лабораторија            | -                                           | 364              | 247±8      | 262±8  |                           | -117        | -32%                         |
| 3.  | Учионица                | -                                           | -                | 270±8      | 306±9  |                           |             |                              |
| 4.  | Лабораторија            | -                                           | 573              | 231±8      | 358±9  |                           | -342        | -60%                         |
| 5.  | Учионица                | -                                           | -                | 379±10     | 357±7  |                           |             |                              |
| 6.  | Кабинет                 | -                                           | -                | 438±10     | 540±12 |                           |             |                              |
| 7.  | Кабинет                 | 153                                         | 208              | 272±6      | 278±9  | 55                        | 64          | 31%                          |
| 8.  | Кабинет                 | -                                           | -                | 332±9      | 313±10 |                           |             |                              |
| 9.  | Лабораторија            | -                                           | 189              | 163±5      | 182±7  |                           | -26         | -14%                         |
| 10. | Учионица                | -                                           | -                | 273±9      | 291±9  |                           |             |                              |
| 11. | Остава                  | -                                           | 52               | 412±12     | 375±8  |                           | 360         | 692%                         |
| 12. | Тоалет                  | -                                           | -                | 152±6      | 201±7  |                           |             |                              |
| 13. | Фоаје                   | -                                           | -                | 181±7      | 187±8  |                           |             |                              |
| 14. | Канцеларија             | 125                                         | 32               | 63±4       | 46±3   | -93                       | 31          | 97%                          |
| 15. | Канцеларија             | -                                           | -                | 57±4       | 55±4   |                           |             |                              |
| 16. | Канцеларија             | -                                           | 37               | 83±5       | 51±4   |                           | 46          | 124%                         |
| 17. | Канцеларија             | -                                           | -                | 48±3       | 35±3   |                           |             |                              |
| 18. | Канцеларија             | -                                           | -                | 45±3       | 28±3   |                           |             |                              |
| 19. | Канцеларија             | -                                           | -                | 58±3       | 44±3   |                           |             |                              |
| 20. | Лабораторија            | -                                           | -                | 81±4       | 75±5   |                           |             |                              |
| 21. | Бифе                    | -                                           | -                | 87±4       | 106±5  |                           |             |                              |
| 22. | Канцеларија             | -                                           | 370              | 171±6      | 147±6  |                           | -199        | -54%                         |
| 23а | Ходник                  | -                                           | 200              | 116±4      | 104±5  |                           | -84         | -42%                         |
| 23б | Ходник                  | -                                           | 200              | 113±6      | 147±7  |                           | -87         | -44%                         |



2 и 4 могу се довести у везу са постојањем шахта, као директне везе са земљом. ST вредности указују на велике флуктуације радона (Слика 3.5) у просторији 4, које се могу довести у везу са минирањем у оближњем подземном руднику. Систем вентилације у свим радним просторијама је и даље природан без присуства форсиране вентилације.

Друго истраживање је показало значајну разлику у концентрацији радона између радних просторија са различитим врстама подова, као и између реновираних и нереновираних подова. Уочене су високе концентрације радона у радним просторијама са керамичким плочицама (10, 11, 12 и 13), што се може објаснити високим приносом влаге која је била измерена у угљеним канистрима након излагања.

У табели 3.6 приказана је упоредна анализа између мерења 2010/2011 и 2018/2021. Очигледно је да не постоји униформни тренд у промени вредности. Упоређујући резултате пре и после процеса реновирања, примећује се да је у просторији 14 значајно смањен ниво радона, док је у просторији 7 уочено супротно. Треба нагласити да су прозори замењени у обе просторије, а под је реновиран само у просторији 14. Тешко је извући закључке на основу два узорка, али је постављање ламината евидентно утицало на смањење дифузије радона из земље у просторији 14, док је херметичност PVC прозора утицала на смањену вентилацију просторији 7, и нагомилавање радона који је продирао кроз стари паркет.

Највећа разлика између резултата мерења (2018 наспрам 2021) примећена је у просторији 11 која служи као остава и њена запремина је најмања. Током једномесечног мерења она се често отвара током дана и била у употреби, док за време 48-часовног мерења она је била стално затворена што је допринело накупљању радона, што може бити објашњење за овако драстичне промене у концентрацији радона.

Спирманова корелациона анализа показује, умерену корелацију (*Spearman's rho*=0,552) између оних концентрација измерених детектором Corentium Home 2018. и просечних концентрација измерених угљеним канистрима 2021. Међутим на ово поређење треба гледати са опрезом јер су разматрани различити периоди мерења (један месец током грејне сезоне 2018/2019 наспрам мерења од 48 h у пролеће 2021. године). Услед варијација радона узрокованим различитим факторима из животне средине, као што су температура, атмосферски притисак и влажност (Xie и др, 2015) једномесечно мерење засигурно даје бољу процену просечног нивоа изложености радону, док 48-часовно мерење даје корисне податке за истраживање утицаја различитих типова подних облога на концентрацију радона у затвореном. Неслагање између ове две групе података свакако не дискриминише ни једну од примењених метода.

На основу резултата изведен је закључак да би спровођење мера енергетске ефикасности, термоизолација фасаде и замена прозора, могла представљати критичан проблем у покушају да се уштеди енергија у радним просторијама са већим концентрацијама радона. Погодан избор врсте пода за реновирање могао би бити од значаја у смислу смањења нивоа радона и постизања користи од спроведених мера енергетске ефикасности. У случају да реновирање укључује замену са херметичким PVC прозорима, процедуре за уштеду енергије треба да буду праћене уградњом одговарајућих вентилационих система како би се избегло повећање радона у затвореном простору.

### 3.4 Концентрација радона у вртићима рударске области

Први пут су на територији северног дела Косова и Метохије извршена мерења концентрације радона у дечијим обдаништима. Студија је спроведена узимајући у обзир:

- све препоруке на које упозоравају надлежне организације и органи;
- подручје које је подложно радону и где су и до сада мерењима идентификоване високе концентрације радона у стамбеним објектима;
- здравствени ризик за посебно осетљиву популацију на зрачење због смањене отпорности дечијег организма.

Основни циљ истраживања био је да се добију прелиминарни резултати о нивоима радона у вртићима рударског подручја, као и да се утврди евентуално присуство високих вредности радона у релативно новим објектима, а по потреби предложи одређене мере ремедијације. Такође студија је имала за циљ да покаже како навике запослених и деце (када у просторијама бораве и када не бораве), утичу на концентрацију радона и утврде разлике између мерења у зимском у односу на летњи период.

Резултати мерења концентрације радона у затвореном и дескриптивна статистика представљене су у Табелама 3.7 и 3.8, редом. Узимајући у обзир сва три истраживања, просечна концентрација радона у вртићима у Косовској Митровици и Звечану износила је  $193,6 \text{ Bq m}^{-3}$  (са распоном од  $102\text{--}303,3 \text{ Bq m}^{-3}$ ) и  $217,9 \text{ Bq m}^{-3}$  (са распоном од  $161,7\text{--}322,7 \text{ Bq m}^{-3}$ ), респективно. Просечна израчуната концентрација радона за оба вртића износила је  $205,3 \text{ Bq m}^{-3}$ . Shapiro-Wilk тест нормалности за свако истраживање је показао нормалну расподелу података на нивоу значајности од 0,05 (осим за вртић у Косовској Митровици у трећој студији  $p=0,017$ ; медијана  $167 \text{ Bq m}^{-3}$ , а доњи и горњи квантили су  $148\text{--}274 \text{ Bq m}^{-3}$ ).

Прво истраживање спроведено у лето показало је да је 92% свих мерења било изнад нивоа од  $100 \text{ Bq m}^{-3}$  (предложено од стране WHO), а пет просторија имало је вредности и изнад  $300 \text{ Bq m}^{-3}$ , препоручене од стране EURATOM. Ниво радона испод  $100 \text{ Bq m}^{-3}$  измерен је само у две просторије новоизграђене издвојене зграде вртића у Звечану. Током другог истраживања канистери су били изложени када су просторије биле у употреби и тада су просечени нивои радона били нижи у односу на прво мерење. У вртићу у Звечану је само у два просторија измерена концентрација радона изнад  $300 \text{ Bq m}^{-3}$ . У овом истраживању дошло је до оштећења једног угљеног канистера. У трећој студији која је уследила после друге симултаном заменом канистера, који су потом били изложени у време викенда када просторије нису биле коришћене, уочено је повећање концентрације радона, посебно у вртићу у Косовској Митровици. Укупно четири мерења су била изнад нивоа од  $300 \text{ Bq m}^{-3}$ .

Ниво радона је генерално нижи када су просторије у употреби током радног дана, управо због чешћег отварања и затварања прозора и врата. Упркос томе концентрације су у 80% проучаваних просторија више од  $100 \text{ Bq m}^{-3}$ . Атмосферски притисак је био нешто нижи током трећег истраживања у односу на прва два. Током викенда када су просторије биле потпуно затворене и ван употребе, дошло је до повећања нивоа радона.

Веће вредности концентрација радона у вртићу у Звечану вероватно се могу довести у везу са нивоом приземља. У вртићу у Косовској Митровици радон је праћен и по спратности, због нагиба терена и због надоградње зграде (Табела 3.8). Ако се резултати групишу на основу тог критеријума највећа концентрација радона је забележена на приземљу ( $222,6 \text{ Bq m}^{-3}$ ), затим на високом приземљу ( $198,7 \text{ Bq m}^{-3}$ ) а потом на првом спрату ( $161,5 \text{ Bq m}^{-3}$ ), што је у сагласности са многим студијама које доказују да се радон

акумулира на нижим спратовима (Madureira и др, 2016; Ivanova и др, 2021; Loffredo и др, 2022).

**Табела 3.7** Концентрација радона у 25 соба вртића у Косовској Митровици (KM) и Звечану (ЗВ)

| Мерно место | <sup>222</sup> Rn концентрација ± несигурност (Bq m <sup>-3</sup> ) |            |            | Средња концентрација (Bq m <sup>-3</sup> ) |
|-------------|---------------------------------------------------------------------|------------|------------|--------------------------------------------|
|             | 1. студија                                                          | 2. студија | 3. студија |                                            |
| KM1         | 173±7                                                               | 106±6      | 194±8      | 157.7                                      |
| KM2         | 225±8                                                               | 126±7      | 474±12     | 275                                        |
| KM3         | 365±11                                                              | 118±7      | 427±11     | 303.3                                      |
| KM4         | 297±10                                                              | 147±7      | 121±6      | 188.3                                      |
| KM5         | 237±9                                                               | 138±7      | 198±7      | 191                                        |
| KM6         | 259±9                                                               | 145±7      | 161±7      | 188.3                                      |
| KM7         | 165±7                                                               | 40±4       | 102±5      | 102.3                                      |
| KM8         | 221±8                                                               | 112±6      | 156±6      | 163                                        |
| KM9         | 149±7                                                               | 177±8      | 148±6      | 158                                        |
| KM10        | 182±8                                                               | недостаје  | 127±6      | 154.5                                      |
| KM11        | 281±9                                                               | 241±9      | 167±6      | 229.7                                      |
| KM12        | 206±8                                                               | 86±5       | 274±9      | 188.7                                      |
| KM13        | 244±9                                                               | 90±6       | 317±10     | 217                                        |
| ЗВ1         | 224±9                                                               | 255±10     | 228±8      | 235.7                                      |
| ЗВ2         | 307±10                                                              | 189±9      | 204±8      | 233.3                                      |
| ЗВ3         | 402±12                                                              | 408±14     | 158±7      | 322.7                                      |
| ЗВ4         | 271±10                                                              | 123±7      | 117±6      | 170.3                                      |
| ЗВ5         | 295±10                                                              | 96±7       | 145±7      | 178.7                                      |
| ЗВ6         | 229±9                                                               | 306±11     | 177±8      | 237.3                                      |
| ЗВ7         | 338±11                                                              | 194±9      | 240±9      | 257.3                                      |
| ЗВ8         | 236±9                                                               | 83±6       | 166±7      | 161.7                                      |
| ЗВ9         | 328±11                                                              | 123±7      | 194±8      | 215                                        |
| ЗВ10        | 295±10                                                              | 225±10     | 171±8      | 230.3                                      |
| ЗВ11        | 78±5                                                                | 196±9      | 220±8      | 164.7                                      |
| ЗВ12        | 64±4                                                                | 192±9      | 367±11     | 207.7                                      |

Подна облога у свим дечијим собама вртића у Звечану је ламинат и одговарајуће просечне вредности концентрације радона су углавном веће од 161,7 Bq m<sup>-3</sup> (Табела 3.8). Услед непостојања адекватне бетонске плоче, вероватно је да, дифузијом радон из земље кроз пукотине у поду или између спојева под-зид доспева у просторије. Керамичке плочице су се показале као неефикасна баријера у оба вртића, као и паркет у вртићу у Косовској Митровици (високо приземље) где је ниво радона у просеку био већи од 200 Bq m<sup>-3</sup>, управо због размака између дрвених дашчица које омогућавају пролаз радона.

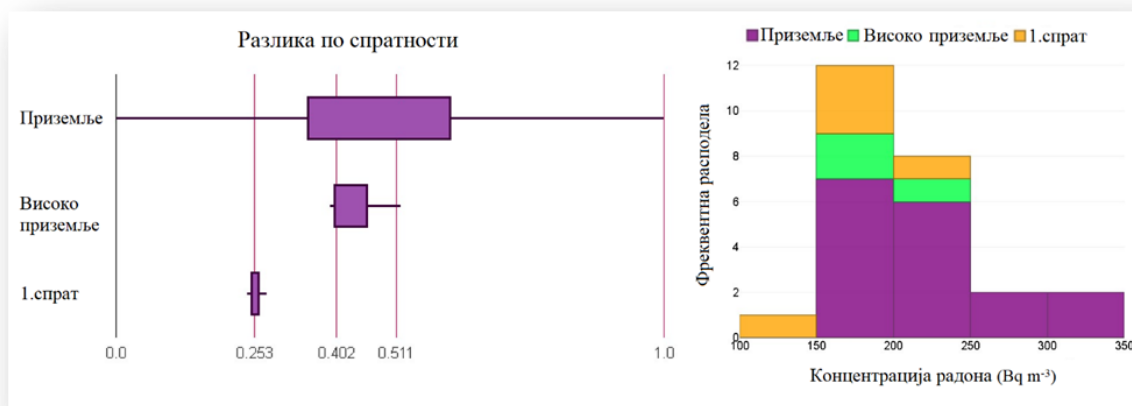
Примењени непараметарски Kruksal-Wallis-ов тест је потврдио да постоји значајна разлика између концентрација радона мерених на различитим спратовима ( $\alpha < 0,05$ ). Међутим, овај тест ( $\alpha < 0,001$ ) је потврдио да нема значајне разлике између три студије ( $p =$

0,002), нити између типова подних облога ( $p = 0,137$ ) на нивоу значајности  $\alpha < 0,05$ . Према резултатима теста ниједна врста подних облога није погодна за ублажавање радона.

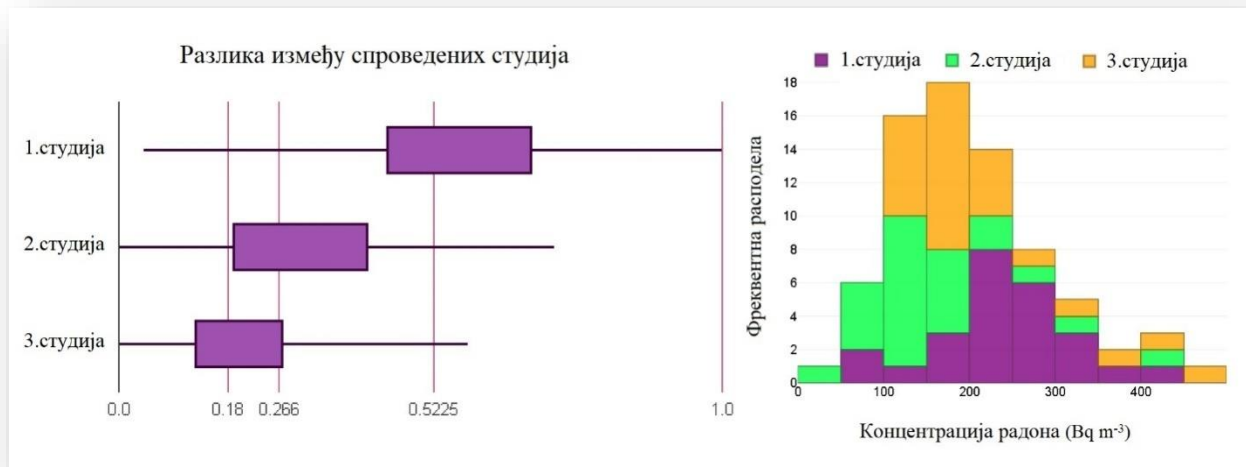
На Сликама 3.6-3.8 дати су графици зависности (нормализовани подаци) и хистограми (концентрације радона) добијени на основу примењеног непараметарског Kruksal-Wallis-овог теста.

**Табела 3.8** Дескриптивна статистика мерења концентрације радона у вртићима

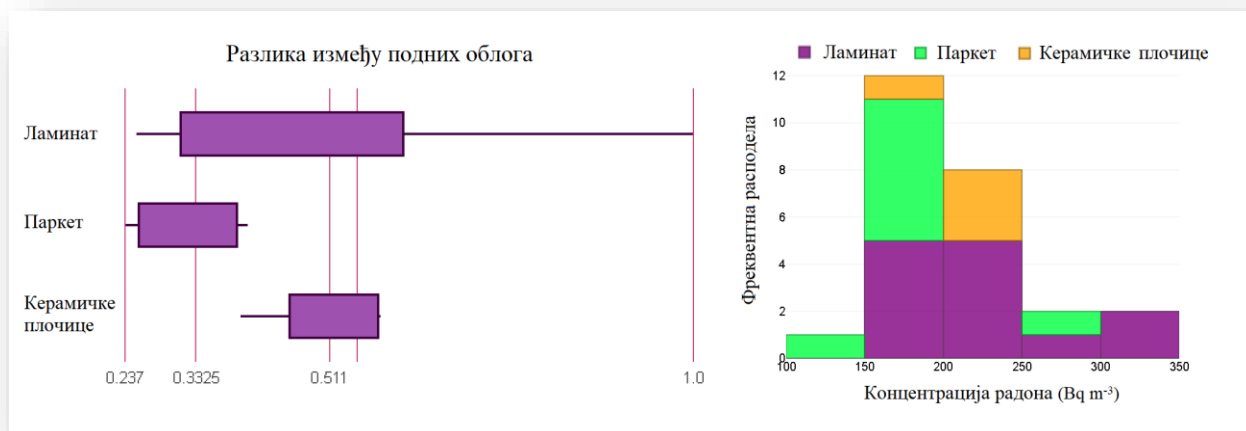
|                                        | 1.студија |       | 2.студија |       | 3.студија |       |
|----------------------------------------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|-------|
| Заузетост соба                         | Незаузета |       | Заузета   |       | Незаузета |       |
| Вртић                                  | КМ        | ЗВ    | КМ        | ЗВ    | КМ        | ЗВ    |
| Минимум ( $Bq\ m^{-3}$ )               | 149       | 64    | 40        | 83    | 102       | 117   |
| Максимум ( $Bq\ m^{-3}$ )              | 365       | 402   | 241       | 408   | 474       | 367   |
| Средња вредност ( $Bq\ m^{-3}$ )       | 231,1     | 255,6 | 127,2     | 199,2 | 220,5     | 198,9 |
| Медијана ( $Bq\ m^{-3}$ )              | 225       | 283   | 122       | 193   | 167       | 185,5 |
| Стандардна девијација ( $Bq\ m^{-3}$ ) | 60,1      | 99,9  | 50,2      | 92,8  | 118,6     | 63,9  |
| Геометријска средина ( $Bq\ m^{-3}$ )  | 224,2     | 227,8 | 117,4     | 180,4 | 196,6     | 191   |
| Коефицијент варијације (%)             | 26        | 39    | 40        | 47    | 54        | 32    |
| Број мерења                            | 13        | 12    | 12        | 12    | 13        | 12    |
| Број мерења $< 100\ Bq\ m^{-3}$        | 0         | 2     | 3         | 2     | 0         | 0     |
| Број мерења $> 300\ Bq\ m^{-3}$        | 1         | 4     | 0         | 2     | 3         | 1     |



**Слика 3.6** График (нормализовани подаци) и хистограм концентрација радона према спратности



**Слика 3.7** График (нормализовани подаци) и хистограм концентрација радона за спроведене студије



**Слика 3.8** График (нормализовани подаци) и хистограм концентрација радона за подне облоге

Веома је важно упознати кориснике просторија са штетним ефектима перманентне изложености радону, посебно имајући у виду присуство деце као најосетљивије популације у овим објектима. У овом контексту здравствени ризик се односи на децу (узраста од 1-7 године), као и на запослене особе (васпитачи, помоћно особље) које су најмање 8 сати изложене повишеним концентрацијама радона. Добијени подаци потврђују потребу праћења радона у дечијим образовним установама, као и мерења пре реконструкције или санације објеката (посебно подних и зидних облога) како би се обезбедили ефекти ублажавања радона.

### **3.5 Јачина гама дозе у испитиваним објектима**

Резултати скоријих мерења јачине амбијенталних дозних еквивалената на територији Косовске Митровице кретали су се од  $0,07\text{--}0,33 \mu\text{Sv h}^{-1}$  (Gulan и др, 2024). Према добијеним резултатима приметан је низак радиолошки утицај везан за локације у близини депонија и јаловишта у поређењу са другим локацијама у окружењу. Просечна годишња вредност амбијенталног дозног еквивалента за Косовску Митровицу у 2019. години износила је  $126 \text{ nSv h}^{-1}$  (Direktorat za radijacionu i nuklearnu sigurnost i bezbednost Srbije, 2020); претпоставка је да ниже вредности амбијенталних дозних еквивалената одговарају антропогеним активностима, док веће вредности одговарају природној појави радионуклида (Gulan и др, 2024). Повећана радиоактивност на овом подручју углавном произилази из геолошких структура, постојања раседа и рудних појава.

Приликом идентификације објеката са повишеном концентрацијом радона у насељима Рударе и Грабовац обављено је прелиминарно мерење екстерне гама дозе на појединим локацијама. Мерење дозе обављено је уз помоћ Radiation Alert Inspector детектора у непосредној близини зидова кућа изграђених од локалног камена, и дало је нешто веће резултате који су се кретали у опсегу од  $0,30\text{--}0,45 \mu\text{Sv h}^{-1}$ . Већи ниво амбијенталног дозног еквивалента се без сумње доводи у везу са локалним геолошким карактеристикама (Gulan и др, 2017).

Током мерења концентрације радона у тест кући која су извршена у периоду од 13.02-15.08.2021. године, мерена је спољашња и унутрашња гама доза употребом Radex RD 1503+ дозиметра. Спољашња јачина гама дозе мерена је у близини зидова на висини од 1 m на четири позиције и кретала се у опсегу од  $0,22\text{--}0,34 \mu\text{Sv h}^{-1}$ . Вредности јачине гама дозе у унутрашњости на средини свих просторија куће биле су  $0,22\text{--}0,38 \mu\text{Sv h}^{-1}$ , док су оне у близини зидова биле  $0,22\text{--}0,34 \mu\text{Sv h}^{-1}$ , што може да се доведе у везу и са зрачењем од грађевинског материјала, највероватније камена.

Максимална јачина екстерне гама дозе мерена у двориштима вртића на висини од 1 m изнад земље износила је  $0,15 \mu\text{Sv h}^{-1}$  и  $0,19 \mu\text{Sv h}^{-1}$ , у Косовској Митровици и Звечану, респективно. Измерене јачине дозе гама зрачења у затвореном простору (близу зидова) варирале су од  $0,12\text{--}0,18 \mu\text{Sv h}^{-1}$  и  $0,09\text{--}0,18 \mu\text{Sv h}^{-1}$  у просторијама вртића у Косовској Митровици и Звечану, респективно, док су се вредности на нивоу пода кретале у распону од  $0,14\text{--}0,2 \mu\text{Sv h}^{-1}$  и  $0,12\text{--}0,2 \mu\text{Sv h}^{-1}$ , за поменуте вртиће, редом.

Према неким резултатима, позадинско зрачење је нешто веће у поређењу са другим локацијама на Косову и Метохији вероватно због геолошких карактеристика и активних раседа у овој области (Gulan и др, 2024). Подручја са повећаном радијацијом треба узети у обзир ако амбијентална вредност јачине дозе гама зрачења прелази  $0,2 \mu\text{Sv h}^{-1}$  (UNSCEAR, 2000).

### **3.6 Гама спектрометријска мерења радионуклида у стенама и земљишту**

Резултати гамаспектрометријских мерења радионуклида у стенама и земљишту са десетак локација у овој области су високе у поређењу са светским просеком (UNSCEAR, 2000). Вредности специфичних активности радионуклида у стенама и земљишту приказане

су у Табели 3.9. и 3.10. Ово је још једна потврда да су високе вредности концентрације радона у објектима последица локалне геологије.

**Табела 3.9** Специфичне активности радионуклида у стенама

| Активност радионуклида -<br>стене | <sup>226</sup> Ra      | <sup>238</sup> U | <sup>235</sup> U | <sup>232</sup> Th | <sup>40</sup> K | <sup>137</sup> Cs |
|-----------------------------------|------------------------|------------------|------------------|-------------------|-----------------|-------------------|
|                                   | (Bq kg <sup>-1</sup> ) |                  |                  |                   |                 |                   |
| Манастир Соколица                 | 104,5±1,3              | 170±7            | 4±2              | 115,8±2,5         | 1000±40         | < 1,5             |
| Пут ка манастиру<br>Соколица      | 66,1±1,1               | 118±5            | 5±2              | 129±3             | 1110±50         | 8,05±0,25         |
| Србовац 1                         | 115,4±1,5              | 181±8            | 4±2              | 135±3             | 990±40          | 18,6±0,4          |
| Србовац 2                         | 142,0±1,6              | 168±7            | 5±2              | 142±3             | 1050±40         | 14,6±0,3          |
| Извор                             | 79,5±1,2               | 148±6            | 5±2              | 96,1±2,1          | 770±30          | < 1,4             |
| Брдо Звечан - подножје            | 78,4±1,0               | 139±6            | 5±2              | 126,7±2,5         | 1030±40         | 11,5±0,4          |
| Брдо Звечан - врх                 | 62,2±1,0               | 126±6            | 3±1              | 125,1±2,9         | 990±40          | 23,9±0,5          |
| Грабовац - насеље                 | 80,1±1,0               | 141±6            | 4±2              | 124,1±2,5         | 1000±40         | < 1,5             |
| Грабовац - тест кућа              | 50,3±0,6               | 130±6            | 4±2              | 125,0±2,2         | 1010±40         | 0,69±0,13         |
| Рударе                            | 76,4±1,0               | 118±5            | 4±2              | 116,0±2,7         | 950±40          | < 1,4             |

**Табела 3.10** Специфичне активности радионуклида у земљишту

| Активност<br>радионуклида - земља | <sup>226</sup> Ra      | <sup>238</sup> U | <sup>235</sup> U | <sup>232</sup> Th | <sup>40</sup> K | <sup>137</sup> Cs |
|-----------------------------------|------------------------|------------------|------------------|-------------------|-----------------|-------------------|
|                                   | (Bq kg <sup>-1</sup> ) |                  |                  |                   |                 |                   |
| Манастир Соколица                 | 67,5±1,6               | 118±7            | 6,2±1,0          | 100±4             | 1024±15         | 1,43±0,05         |
| Пут ка манастиру<br>Соколица      | 53,9±1,3               | 77±5             | 3,0±0,6          | 116±5             | 934±14          | 34,2±0,9          |
| Србовац 1                         | 97,2±2,3               | 129±7            | 6,0±0,5          | 142±6             | 773±12          | 152±4             |
| Србовац 2                         | 98,3±2,3               | 235±12           | 10,2±1,6         | 133±5             | 626±10          | 183±4             |
| Извор                             | 80,3±1,9               | 127±7            | 5,9±0,9          | 110±4             | 805±12          | 9,6±0,3           |
| Брдо Звечан - подножје            | 53,2±1,3               | 92±5             | 3,3±0,6          | 91±4              | 892±13          | 23,2±0,6          |
| Брдо Звечан - врх                 | 23,3±0,7               | 33±3             | 1,7±0,6          | 38,0±1,6          | 388±7           | 143±4             |
| Грабовац - насеље                 | 68,0±1,7               | 126±7            | 5,9±1,0          | 129±6             | 804±13          | 92,4±2,3          |
| Рударе                            | 49,4±1,2               | 75±4             | 3,0±0,6          | 96±4              | 663±10          | 35,9±1,0          |

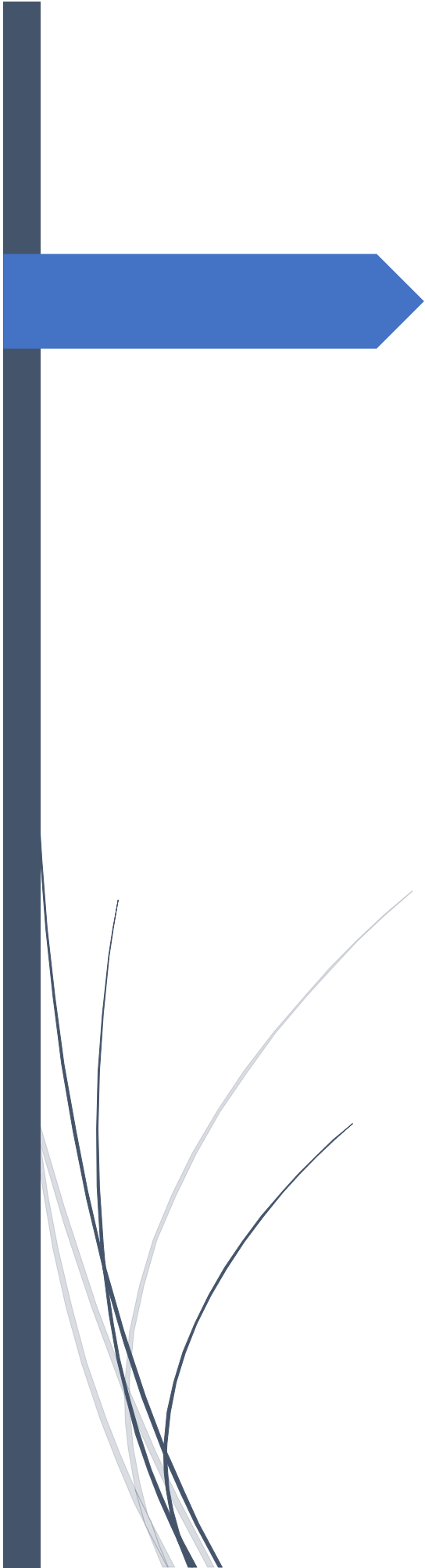
### 3.7 Процена ефективне дозе

Просечна годишња ефективна доза за чланове домаћинства испитиване тест куће, у периоду мерења 13.02.2021-15.08.2021, израчуната је према једначини (1.10). Како концентрација радона у затвореном простору прелази референтни ниво од 300 Bq m<sup>-3</sup>, пренаглашен је ризик од рака у случају продужене изложености радону за укућане. Коришћењем дозног конверзионог фактора од 3,6 nSv h<sup>-1</sup> (Bq m<sup>-3</sup>)<sup>-1</sup>, на основу средње концентрације радона, израчуната је годишња ефективна доза услед инхалације радона од 26 mSv (Spasić и Gulan, 2022). Добијена вредност је многоструко већа од светског просека процењеног за инхалацију од радона и његових продуката распада, и износи 1,15 mSv (UNSCEAR, 2000).

Током једногодишњег мерења концентрације радона, јул 2023-јун 2024, у истој кући процењена је годишња ефективна доза коришћењем ICRP дозних конверзионих фактора уз поређење са претходно препорученим факторима. Према једначини (1.10), просечна годишња ефективна доза од радона за становнике домаћинства процењена је на 33 mSv, рачунајући просечно време проведено током спавања од 9 h (Bertoni и др, 2022), (3825 h, годишње,  $DC=6,7 \text{ nSv h}^{-1} (\text{Bq m}^{-3})^{-1}$ ), док би на основу (UNSCEAR, 2019) износила 30,4 mSv, за исто проведено време ( $DC=6 \text{ nSv h}^{-1} (\text{Bq m}^{-3})^{-1}$ ) (Spasić и др, 2024). Недавно је вредност дозног коефицијента коригована узимајући у обзир ткивни тежински фактор за бронхијалне и бронхиоларне регионе (0,08) и радијациони тежински фактор 20 за алфа честице (UNSCEAR, 2019).

Примењени дозни конверзионни фактори (DCF) и процењена ефективна доза могу се прегледати кроз различите публикације које препоручују одговарајућу вредност (Табела 1.7). Ако се време од 7000 h проведених у затвореном простору препоручено од стране (UNSCEAR, 2008; 2000; 2006) и (ICRP, 2010) примени у формули (1.10), у најгорем случају, ефективна доза ће бити до пет пута већа од процењене вредности 14 mSv за излагање у кући и износила би 70,3 mSv (према ICRP, 2018) и 62,96 mSv (према UNSCEAR, 2019). На основу публикација (UNSCEAR, 2008; 2000; 2006) и публикације ICRP (2010), годишња ефективна доза се процењује на 37,77 и 50,37 mSv, респективно (Spasić и др, 2024). У случају интервенције ублажавања, ефективна доза треба да буде испод  $20 \text{ mSv y}^{-1}$  (кућа+радно место); ефективна доза од  $50 \text{ mSv y}^{-1}$  је граница за напуштање собе/куће (Bertoni и др, 2022).

Према једначини (1.11), израчунати животни ризик од рака ELCR за укућане тест куће је  $1,27 \cdot 10^{-1}$  (Spasić и др, 2024). Израчуната вредност је 2,3 пута већа од горње границе од  $5,4 \cdot 10^{-2}$  (што претпоставља просечну годишњу ефективну дозу од 14 mSv на основу препоруке (ICRP, 2018)).



## **4 МЕРЕ РАДИЈАЦИОНЕ ЗАШТИТЕ**

## 4.1 *Анализа високих концентрација радона у тест кући*

У пракси се среће велика разноликост специфичних и карактеристичних ситуација за сваки објект понаособ. Решења за имплементацију мера санације морају се размотрити на основу:

- дужине мониторинга, најмање два месеца мерења концентрације радона пасивним методама (грејна сезона, лето...);
- извршене детаљне упоредне анализе добијених података;
- карактеристика и намене истраживаног објекта.

Решења се дефинишу од случаја до случаја и понекад се спроводе итеративно или комбинују две или више метода заједно. У већини случајева то су релативно једноставне методе, а понекад захтевају и компликовану техничку дијагностику објекта. Два су главна принципа заштите објекта:

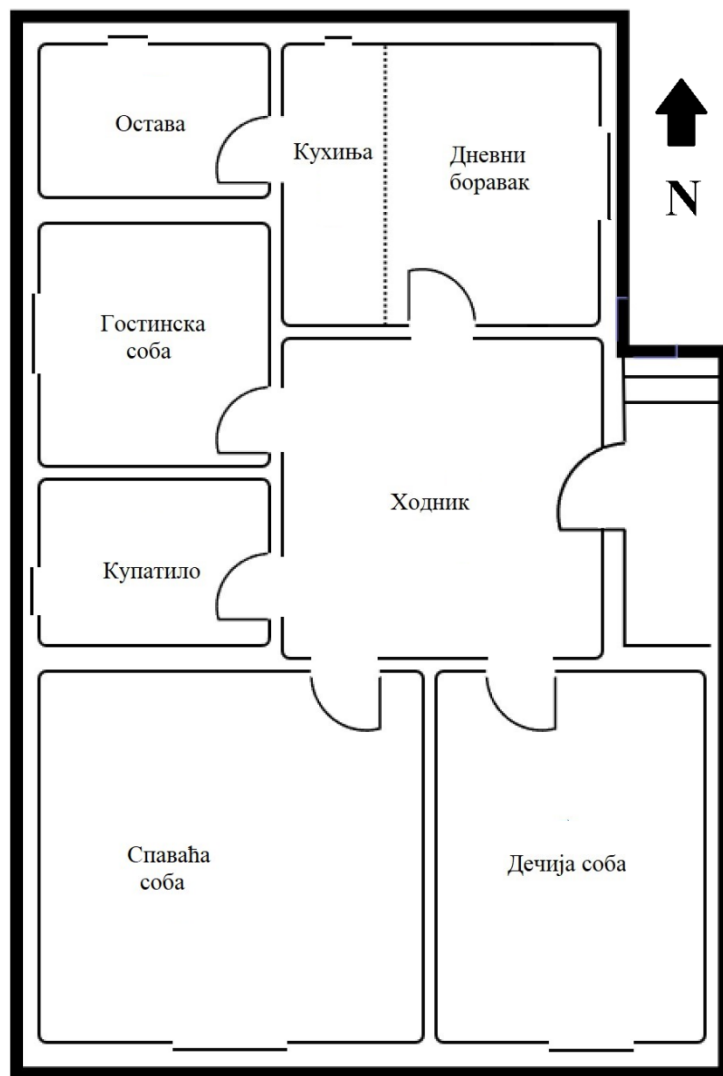
- избећи продор радона у објект и
- разблажити концентрацију радона у затвореном до прихватљивог нивоа.

Доступно је неколико методологија за ублажавање концентрације радона у постојећим објектима, са изразитим побољшањима и ефикасношћу које треба доказати тестирањем на лицу места (Nunes и Curado, 2023). Изложеност радону у затвореном простору може се смањити спровођењем превентивних мера у фази изградње нових објекта или корективним или ремедијацијским мерама за постојеће зграде (Khan и др, 2019).

Кућа у којој су примењене мере за ублажавање радона припада типу 3, са полу-подрумом (Слика 1.9в); предњи, источни део је готово 1 m испод нивоа тла и нема хидроизолацију, западни део куће лежи у равни са подлогом, са основом темеља благо испод нивоа земље. Темељ се по пројектној документацији састоји од слоја набијене земље, шљунка, бетона, хидроизолације, а у основи темеља је бетонска подлога и цементна глазура.

Приземље куће које представља полу-подрум користи се као стамбени простор (Слика 4.1). У просторијама које су означене као гостинска соба и дневни боравак још у ранијем периоду, замењена је подна облога. У гостинској соби изливана је нова бетонска облога и преко ње постављен ламинат, док је у дневном боравку постављен ламинат без бетонске облоге, а у кухињи постављене нове керамичке плочице. Спаваћа соба и дечија соба и даље поседују стару подну облогу из времена када је грађена кућа; старе лесонит плоче су у веома лошем стању са великим размаком на међусобним спојевима, као и у додиру са зидовима (Слика 4.2). Зидови такође имају оштећења изазавана влагом која је била присутна у великој мери пре него је урађена дренажа објекта.

Концентрације радона мерене су у више наврата од 2010. до 2024. године у тест кући. Резултати мерења у различитим периодима и различитим врстама детектора у четири најфреквентније просторије тест куће дате су у Табели 4.1. У свим просторијама куће измерене просечне вредности концентрације радона у свим периодима мерења биле су много веће од препорученог прага од  $300 \text{ Bq m}^{-3}$ . На основу добијених резултата нивоа радона, кућа је изабрана за ремедијацију и направљен је Протокол (на крају ове секције) за спровођење неких од мера радијационе заштите док су остале мере предложене укућанима као техничко решење у неком наредном периоду.



**Слика 4.1** Шема основе сутерена тест куће



**Слика 4.2** Стање подова и зидова у дечијој соби и спаваћој соби

**Табела 4.1.** Резултати мерења радона у тест кући различитим детекторима у периоду од 2010. до 2024. године

| Просторија     | Период мерења     | Концентрација радона ( $\text{Bq m}^{-3}$ ) | Врста детектора | Сprovedена студија   |
|----------------|-------------------|---------------------------------------------|-----------------|----------------------|
| Дневна соба    | дец.2010-дец.2011 | 495                                         | CR-39 (RSKS)    | Gulan, 2014          |
|                | јул 2019          | 475±13                                      | угљени канистри | Gulan и др, 2022     |
|                | нов.2019          | 756±17                                      | угљени канистри | Gulan и др, 2022     |
|                | феб.2021-авг.2021 | 949                                         | Corentium Home  | Spasić и Gulan, 2022 |
| Дечија соба    | дец.2010-дец.2011 | 1125                                        | CR-39 (RSKS)    | Gulan, 2014          |
|                | дец.2010-мај 2011 | 1182±56                                     | CR-39 (RADUET)  | Gulan, 2014          |
|                | мај 2011-дец.2011 | 856±36                                      | CR-39 (RADUET)  | Gulan, 2014          |
|                | јул 2019          | 565±15                                      | угљени канистри | Gulan и др, 2022     |
|                | нов.2019          | 832±15 (сто)<br>1217±24 (под)               | угљени канистри | Gulan и др, 2022     |
|                | феб.2021-авг.2021 | 1116                                        | Corentium Home  | Spasić и Gulan, 2022 |
| Спаваћа соба   | јул 2022-јул 2023 | 1530                                        | Corentium Home  | Spasić и др, 2024    |
|                | мар.2023-мај 2024 | 846                                         | Corentium Home  | Spasić и др, 2024    |
| Гостинска соба | јул 2019          | 560±14                                      | угљени канистри | Gulan и др, 2022     |
|                | нов.2019          | 1078±20                                     | угљени канистри | Gulan и др, 2022     |

## 4.2 Мере санације спроведене на кући

Од многобројних мера ремедијације на тест кући извршена је хидроизолација сутерена, и замена старих дрвених прозора постављањем нових PVC (Слика 4.3). Власницима је сугерисано чешће проветравање, да би се природном вентилацијом смањила концентрација радона у просторијама. Кораци су дати у Протоколу.

- Хидроизолација (дренажа) је спроведена је да би се спречило задржавање влаге у земљишту у близини темеља куће која је до тада продирала у унутрашњост полу-подрума. Како је предњи део куће укопан, падавине су један од најочигледнијих фактора који утиче на повишене концентрације радона у кући, јер изазивају ефекат затварања (capping effect): више падавина→влажније земљиште→већи проток влаге са површине у ваздух (De Francesco и др, 2010). Генерално, влага у земљишту смањује пропусност ваздуха и омогућава радону да се акумулира у затвореном

простору због негативног притиска. Стога, дренажа око основе темеља тест куће треба да смањи ниво радона одвођењем вишка влаге и стварањем веће пропусности земљишта.



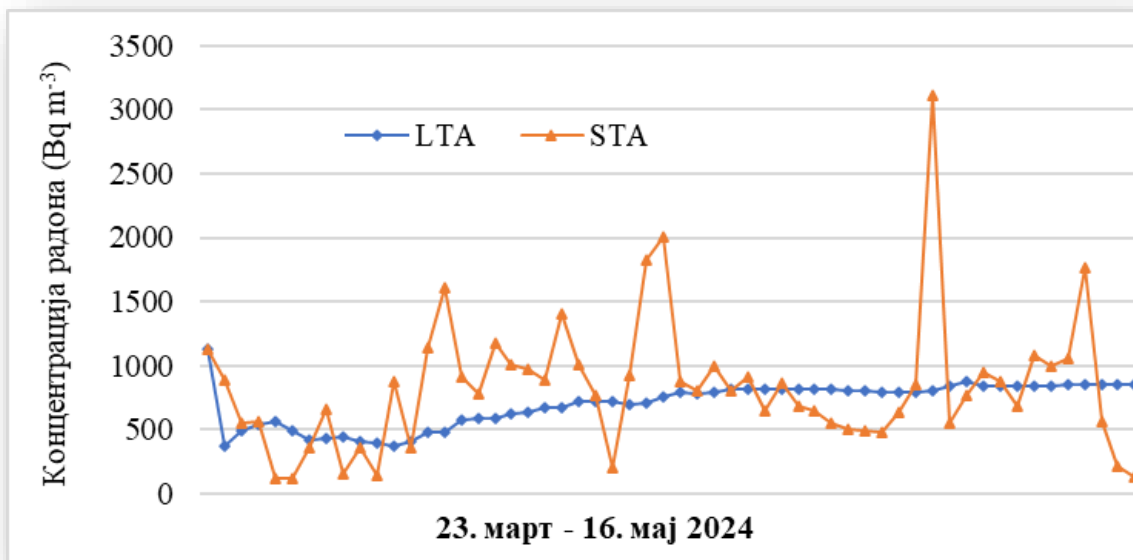
**Слика 4.3** Изглед тест куће након спроведених мера радијационе заштите

- Замена старих дрвених прозора, новим од поливинил хлорида (PVC) урађена је да би се побољшала херметичност полу-подрума. Иако ово није мера за смањење концентрације радона, спроведена је као мера енергетске ефикасности, сходно потребама укућана. Имплементација мера за уштеду енергије може побољшати квалитет ваздуха у затвореном простору. Високе концентрације могу се додатно повисити смањењем природне вентилације путем нових прозорских оквира и кутија

ролетни, што произлази из радова услед мера санација ради побољшања енергетске ефикасности (Sabbarese и др, 2021; Samuelsson, 1988). Поједини аутори наводе да управо непропусни PVC прозори доводе до повећане акумулације радона, па би систем контролисане вентилације требало уједно применити на најнижим спратовима објекта (Yarmoshenko и др, 2020; Gulan и др, 2023).

- Ово је такође повезано је с коришћењем мање гасопропусних фасадних зидова, па редовно или појачано проветравање најнижих нивоа стана треба да буде усвојена мера до уградње система форсиране вентилације. Иако је радон присутан свуда, како споља тако и унутар зграда, одређена подручја су склонија високим концентрацијама радона у затвореном простору (Ahmad и др, 2020).

У складу са високим вредностима концентрације радона након вишегодишњег мониторинга и након примене мера за ублажавање донета је најрелевантнија одлука да се мерења понове у краћем временском периоду у пролеће 2024. године. За свега два месеца новог мерења концентрације радона дошло се до повољнијих и охрабрујућих резултата који су указивали на евидентно смањење концентрације радона (Слика 4.4). Примењене мере ремедијације утицале су на смањење просечне концентрације радона на  $846 \text{ Bq m}^{-3}$ , што је за око 44% ниже од претходне просечне годишње вредности од  $1449 \text{ Bq m}^{-3}$ . Штавише, дневне концентрације радона упоређене су за исте периоде мерења у две различите студије (2023. у односу на 2024.), просечни резултати пре ( $1533 \text{ Bq m}^{-3}$ ) и после ( $827 \text{ Bq m}^{-3}$ ) санације су указивали на смањење нивоа радона од 46%. Ово незнатно одступање могло би да се односи на варијације радона током година. Иако је било и неколико већих дневних флукуација радона током периода мерења, концентрација радона у тест кући и даље превазилази препоручене просечне вредности и захтева даљу примену мера заштите.



**Слика 4.4** Краткорочно (STA) и дугорочно (LTA) мерење концентрације радона у тест кући након примена мера за ублажавање

Дренажа је свакако умногоме допринела да се смањи влажење зидова, и задржавање воде око објекта. Међутим, иако је замена прозора побољшана херметичност зграде, не може се са прецизношћу утврдити у коликој мери је довела до промене у притиску и степену инфилтрације радона из тла. На основу других студија, непропусност прозора вероватно узрокује накупљање радона; оваква пракса може довести до 3,4 пута веће концентрације радона (Jiránek и Kašmaříková, 2014), док се у неким становима након термичке реконструкције за 4-8 пута повећала концентрација радона (Yang и др, 2019).

### **4.3 Примена техничких мера у циљу радијационе заштите**

На кући је неопходно спровести друге кораке за снижавање нивоа радона на препоручени и/или прихватљив ниво. Од мера је могуће спровести оне које су прописане за ремедијацију у постојећим објектима. Планирани даљи кораци који су уједно препоручени укућанима, усмерени су ка спречавању уласка и одвођењу радона из унутрашњег простора у спољашњу околину. Неки кораци предложени у Протоколу требали би да обухвате следеће:

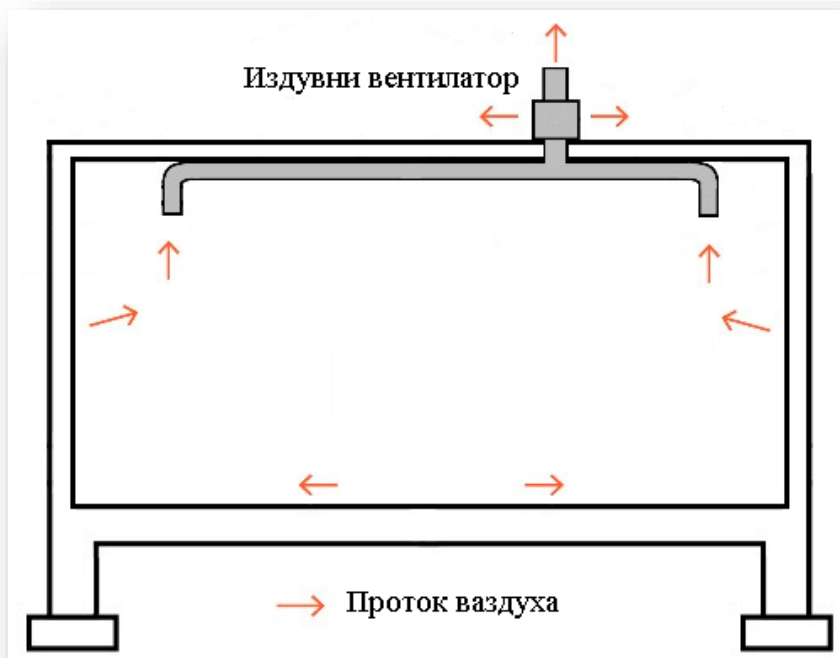
- Замена подова, постављање нових са анти-радонском заштитом;
- Заптивање пукотина на спојевима темеља и зидова и облагање зидова антирадонским премазима;
- Уградња система форсиране вентилације
- Уградња проточног вентилатора на прозорима
- Депресуризација

Препоруке власницима су да се што хитније крене са даљим спровођењем мера радијационе заштите. Једноставни кораци, као што је и обезбеђивање заптивања било каквог цурења ваздуха или воде, заптивање пукотина и других отвора у поду и зидовима је основни део већине акција за смањење радона. Код већине објеката честе су ситне пукотине на подовима и зидовима, које настају услед диференцијалног слегања темеља, померања термичког порекла или прилагођавања између елемената конструкције, као и неких специфичних отвора намерно направљених за пролаз цеви и каблова. Пукотине представљају пут за улазак радона у зграду услед разлике између атмосферског притиска унутар, који је генерално нижи од притиска у тлу испод зграде (Wang и Ward, 1999). Традиционално грађени зидови показују недостатке у конструкцији (мале пукотине), које могу повећати унос радона (Frutos и др, 2021). Величина и учесталост ових пукотина зависи од квалитета конструкције и завршног премаза (Paridaens и др, 2005; Géczi и др, 2018; Tan и др, 2020; Frutos-Puerto и др, 2020; Park и др, 2019).

У свим просторијама уочене пукотине на зидовима је потребно затворити заптивним масама и третирати антирадонским премазима. Примена водоотпорних производа као радонске баријере на зидовима резултира у смањењу концентрације радона за 47% (Portaro и др, 2024). Премазивање унутрашњих зидова (антирадонска боја/радон баријерни премаз), темеља и плоча подрума показало се као добро решење за заптивање пукотина, шавова и спојева између зида и пода, као и простора између зида и прозора; ефикасност ублажавања концентрације радона у затвореном износила је преко 86% и до две године након наношења (Pan и др, 2022).

Препорука је да се пукотине запечате антирадонским премазима као и да се уради добра подна облога што би довело до смањења концентрације радона у затвореном. У свим собама је потребно да се излије одговарајућа подлога отпорна на радон и комплетно обнове (замене) стари подови. У дневном боравку је такође неопходно да се уклони постојећа подна облога, иако замењена у скоријем периоду. Једно од решења доступно на комерцијалном тржишту, које би било адекватно за примену на тест кући, јесу епоксидни подови. Иновативни производ представљен као решење са целом подлогом из једног дела. Основа епоксидних подова је епоксидна смола са додацима, попут цементног песка, разних појачавача и учвршћивача који доприносе бољим механичким карактеристикама. Епоксидни под се наноси у неколико слојева и пожељно је да подлога буде хомогена, сува и чврста (бетон, керамика, камен и др). Предности ових подних облога су: дуготрајност (могу трајати деценијама), отпорни су на механичка оштећења, хемикалије, уља, имају антибактеријска својства, паронепропустни су и водоотпорни. Предност се често даје полиуретанским подовима који су еластичнији, отпорнији на механичке ударце, хемикалије, толерантни су на температуре од епоксидних подова. Према истраживањима, једно од могућих решења је да се стари подови у спаваћој соби и дечијој соби замене ламинатом са сунђерастим и полиетиленским фолијама, која се такође показала као ефикасна заштитна баријера за радон (Gulan и др, 2023).

Форсирана вентилација треба да буде прва техничка мера избора. У циљу израде вентилационог система потребно је поставити цеви на две стране од средине плафона са издувним вентилатором споља, ван неке од изабраних просторија (Слика 4.5). Ова мера је ефикасна када је извор радона грађевински материјал. Иако се показало да се не могу сматрати универзалном антирадонском мером системи механичке вентилације су погодни када је инфилтрација радона до  $100 \text{ Bq m}^{-3} \text{ h}^{-1}$  (Felicioni и др, 2023).

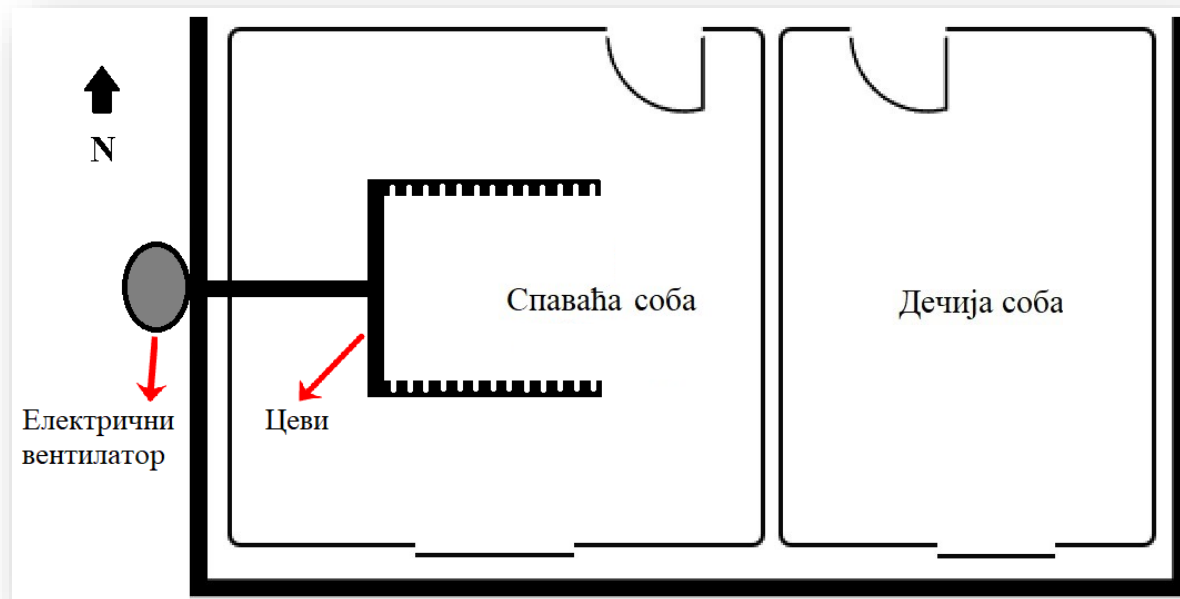


Слика 4.5 Предлог за уградњу вентилационог система

Природна вентилација се може побољшати уградњом проточних вентилатора (Слика 1.10), што је пожељно за собе у приземљу. Проточни вентилатори треба да буду стално отворени да би се одржало смањење радона. Идеално је да не буду великих димензија, обично 40 до 80 cm<sup>2</sup> у свакој просторији. Обично се налазе на врховима прозора како би се смањила промаја (Scivyer и Jaggs, 1998).

Активни систем депресуризације потплове (Слика 1.11) као једна од могућих мера није у потпуности применљива у случају тест куће, јер је основа полуподрума испод нивоа земље. Међутим, могуће је спровести неколико захтевних мера у спаваћој соби која је највеће запремине, а у којој су измерене највише вредности годишње концентрације радона (1530 Bq m<sup>-3</sup>). Пре замене пода, било би пожељно на средини собе направити систем радонске јаме са цевима пречника 100 mm (Слика 4.6) и одвести радон под плочом до спољашњег зида, подићи одвод до самог плафона и уз помоћ уградног вентилатора цев извући напоље. Под треба затворити бетонском кошуљицом, и све пукотине и отворе попунити цементним малтером. Ова мера се у више студија показала као врло ефикасна, али је економски и грађевински захтевна.

Поред геолошких, атмосферских и климатских услова, избор оптималне мере радијационе заштите зависи од многих фактора као што су, почетна концентрација радона, путева уласка радона у објекат, понашање станара (Khan и др, 2019). Стога су студије о генерисању и транспорту радона кроз порозни медијум и студије утицаја на површинску ексхалацију радона важне за превенцију и најбољу грађевинску праксу у циљу спровођења акционих мера за смањење нивоа радона (Cosma и др, 2015).



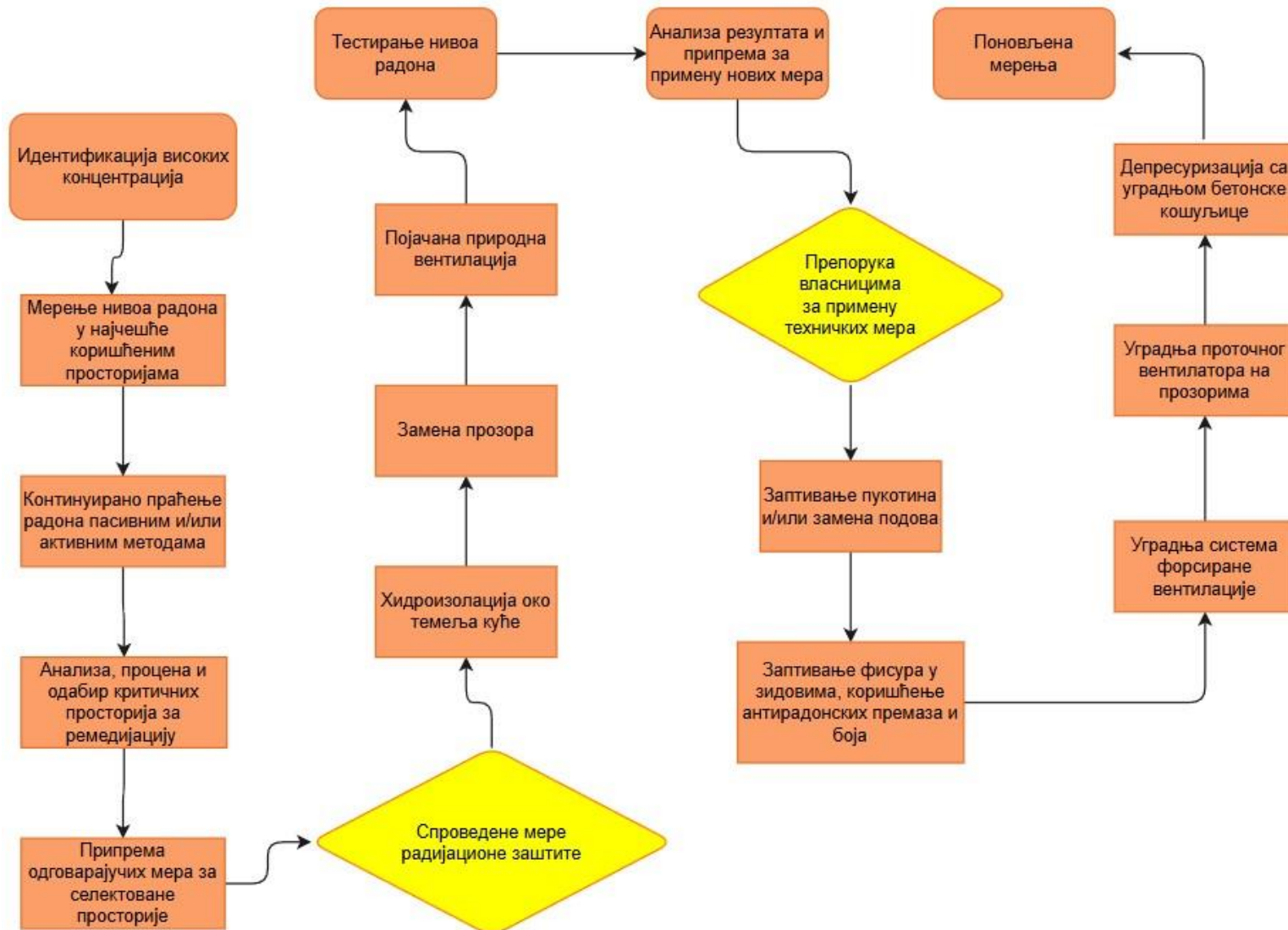
Слика 4.6 Предлог депресуризације у спаваћој соби

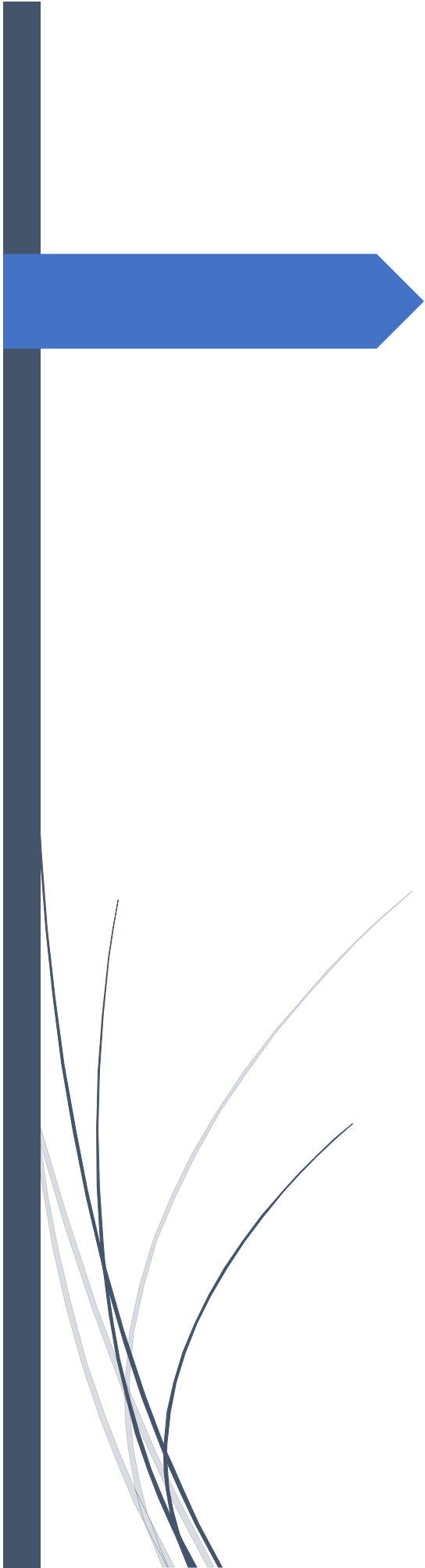
Постоји озбиљна намера да се у будућности спроведу додатне мере ублажавања са тенденцијом трајног смањења ризика од излагања радону у овој кући. Важан фактор у свему томе јесу и финансијске могућности власника куће, њихова одлучност и спремност да се

определе за адекватна исплатива решења. Нека нова студија показала би да ли су интервентне мере дале повољне резултате у смањењу концентрације радона током дужег временском периода.

# ПРИЛОГ

## Протокол радијационих мера заштите и техничких решења за ублажавање високих концентрација радона у тест кући





## 5 ЗАКЉУЧАК

Ова докторска дисертација имала је за циљ идентификацију објеката са високим концентрацијама радона на подручју општина Косовска Митровица и Звечан. Истраживањем је показано да постоји значајан број стамбених јединица у којима концентрација радона премашује референтни ниво, што имплицира на потенцијално повећан ризик од појаве канцера услед дугорочне изложености високим концентрацијама радона. У 58% истраживаних породичних објеката концентрација радона била је изнад  $300 \text{ Bq m}^{-3}$ , што указује да је подручје склоно радону.

Процењени геогени потенцијал радона на испитиваним локацијама показао је да концентрација радона у затвореном није уско повезана са њим, али антропогени утицаји и параметри животне средине умногоме доприносе концентрацији радона у објектима. Међутим, добијене расподеле величине честица за испитване узорке земљишта померене су ка већој фракцији, што указује на већу пропустљивост земљишта за гас радон. Велике варијације у концентрацији радона у појединим становима могу бити повезане са постојањем дубоке раседне зоне и сеизмотектонске зоне у околини подручја рударског комбината „Трепча“. Оне омогућавају транспорт радона кроз пукотине током рударских или других тектонских активности. С друге стране, лоша вентилација и недовољно заптивање објеката доприносе повећању концентрације радона у објектима у подручјима склоним радону.

Мерење радона у тест кући у трајању од скоро три године спроведено је на основу ранијих истраживања када је почетно тестирање премашило вредности од  $1000 \text{ Bq m}^{-3}$ . На основу годишњих мерења процењена доза од радона за укућане износила је најмање  $26 \text{ mSv}$  пре примене мера за ублажавање радона. Испитивања након мера санације (хидроизолација-дренажа, појачана природна вентилација) потврдила су смањење нивоа радона за 44%, али су концентрације радона превазилазиле вредности од  $300 \text{ Bq m}^{-3}$ . Иницирано је неколико решења које се тичу мера радијационе заштите: замена подова, постављање нових са анти-радонском заштитом, заптивање пукотина на спојевима темеља и зидова и облагање зидова антирадонским премазима, уградња система форсиране вентилације, уградња проточног вентилатора на прозорима, депресуризација потплоча.

Како би се проценио утицај примене мера термо-изолације и процеса реновирања подних облога на концентрацију радона у затвореном, истраживање у згради факултета је показало велику варијабилност у месечним концентрацијама радона, укључујући велике дневне флукуације у подрумским радним просторијама груписаним према врсти подне облоге. Ламинат се показао као најефикаснија баријера за радон. Инсталацијом одговарајућих подова избегава се повећање концентрације радона у унутрашњем простору, уз коришћење одговарајућих вентилационих система. Закључак је да термо-изолација може представљати критичан проблем у покушају енергетске ефикасности зграда са повишеним нивоом радона.

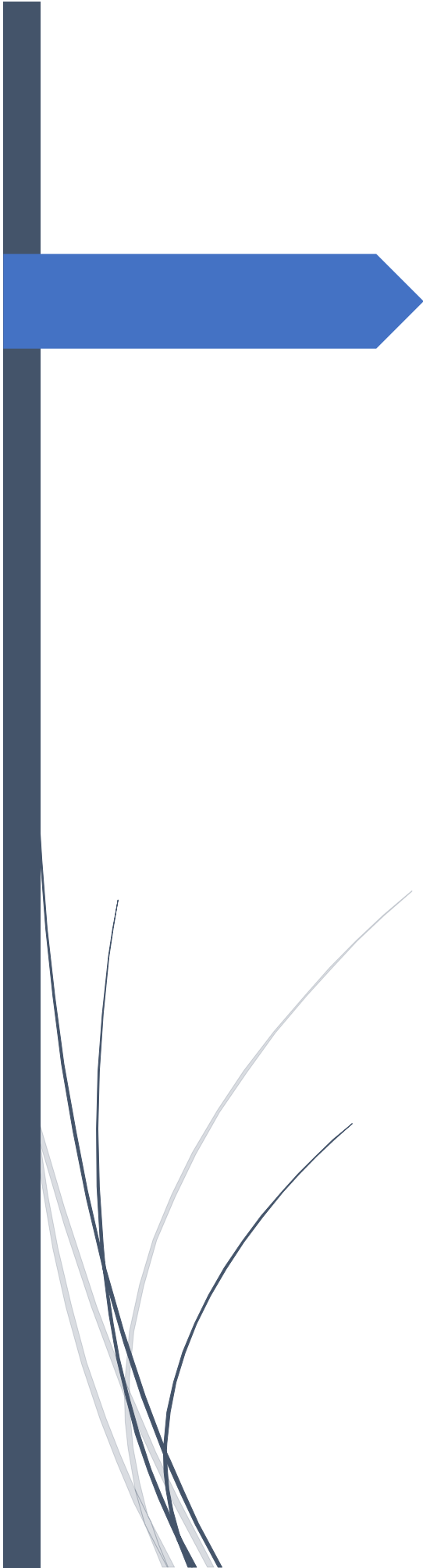
Национални акциони план за радон као и Национални план енергетске ефикасности у Србији морају бити хармонизовани како би донели корисна решења, win-win исход, у смислу бољих животних услова и здравијег радног окружења. Урбанистички и грађевински прописи такође треба да интегришу и узму у обзир локалну геологију, нивое радона у земљишту чиме се избегава потенцијална опасност од изложености радону кроз промишљен избор будућих локација стамбених објеката и дизајна зграда. Ефикасна стратегија за смањење утицаја радона захтева координисане напоре и синергију многих институција, грађевинских стручњака и јавности како би се осигурало здраво и безбедно животно окружење за све. Резултати ове дисертације могу бити корисни за опште

разумевање понашања радона, дефинисање метода и протокола за ублажавање високих концентрација радона у овом специфичном региону склоном радону, да би били применљиви у стамбеним објектима са истом или сличном проблематиком.

Мерење концентрације радона по први пут је спроведено у вртићима Косовске Митровице и Звечана да би се проценио ризик за најосетљивију популацију на зрачење. Дошло се до закључка да је ниво радона нижи када су просторије у употреби током радних дана, него у данима када у њима деца не бораве, због чешћег отварања и затварања прозора и врата. Просечне концентрације радона у вртићима у Косовској Митровици и Звечану износиле су  $193,6 \text{ Bq m}^{-3}$  ( $102\text{--}303,3 \text{ Bq m}^{-3}$ ) и  $217,9 \text{ Bq m}^{-3}$  ( $161,7\text{--}322,7 \text{ Bq m}^{-3}$ ), респективно. Потврђена је разлика у концентрацији радона по спратности.

Даља истраживања треба усмерити на детаљну идентификацију извора/путева уласка радона, његову акумулацију у затвореном, утицај грађевинских материјала уз укључивање већег броја објеката сличних карактеристика у општинама Косовска Митровица и Звечан. Ово даље има за циљ тестирање и имплементацију још ефикаснијих решења за санацију домова са повишеном концентрацијом радона, промовисање редовног праћења концентрације радона у затвореном простору, едукацију јавности о здравственим ризицима од радона и подстицање усвајања ефикасних протокола за ублажавање од стране власника објеката.

Поред тога будућа истраживања била би усмерена на праћење радона у зонама раседа, јер геотектонски поремећаји утичу на значајне промене у транспорту радона. Ове промене могу бити корисне за предикцију земљотреса, с обзиром да подручје одликује карактеристична геологија, сеизмотектонска активност и металогенетска структура. Мониторинг радона у подземним водама би такође био један од задатака.



## **6 ЛИТЕРАТУРА**

1. Abdo MAS, Boukhair A, Fahad M, Ouakkas S, Arhouni FE, Hakkar M, Belahbib L, Al-Suhbani MN (2021) Estimation of unattached and aerosol-attached activities of airborne short-lived radon progeny in indoor environments. *J. Environ. Radioact.* 237, 106665.
2. Ahmad N, Uddin Z, Rehman JU, Bakhsh M, Ullah H (2020) Evaluation of Radon Concentration and Heavy Metals in Drinking Water and Their Health Implications to the Population of Quetta, Balochistan, Pakistan. *Int. J. Environ. Anal. Chem.* 100, 32–4.
3. Akbari K, Mahmoudi J, Ghanbari M (2013) Influence of Indoor Air Conditions on Radon Concentrations in a Detached House. *J. Environ. Radioact.* 116, 116–173.
4. Ambrosino F, Thinov L, Briestenský M, Giudicepietro F, Roca V, Sabbarese C (2020) Analysis of geophysical and meteorological parameters influencing  $^{222}\text{Rn}$  activity concentration in Mladec caves (Czech Republic) and in soils of Phlegrean Fields caldera (Italy). *Appl. Radiat. Isot.* 160, 109–140.
5. Aquilina N J, Fenech S (2019) The influence of meteorological parameters on indoor and outdoor radon concentrations: A preliminary case study. *J. Environ. Pollut. Control.* 2, 1–8.
6. Arora B, Kumar A, Walia V, Frank Yang T, Fu CC, Liu TK, Wen KL et al (2017) Assesment of the response of the meteorological/hydrological parameters on the soil gas radon emission at Hsinchu, northern Taiwan: A prerequisite to identify earthquake precursors. *Journal of Asian Earth Sciences.* 149, 49–63.
7. Arvela H, Winqvist K (1989) A model for indoor radon variations. *Environment International* 15, 239.
8. Ashok GV, Nagaiah N, Shiva Prasad NG (2012) Indoor radon concentration and its possible dependence on ventilation rate and flooring type. *Radiat. Prot. Dosim.* 148, 92–100.
9. Awhida A, Ujić P, Đurašević M, Kandić A, Čeliković I, Lončar B, Kolarž P (2016) Novel method of measurement of radon exhalation from building materijals. *J. Environ. Radioact.* 164, 337–343.
10. Axelsson G, Andersson EM, Barregard L (2015) Lung cancer risk from radon exposure in dwellings in Sweden: How many cases can be prevented if radon levels are lowered? *Cancer Cause Control.* 26, 541–547.
11. Barać M, Stanišić S, Parlić M, Bukumirić Z, Vitas N, Manojlović P (2010) Lokalni ekološki akcioni plan Severne Kosovske Mitrovice – monografija. Opština Severna Kosovska Mitrovica, Fakultet tehničkih nauka, Kosovska Mitrovica i Medicinski fakultet, Kosovska Mitrovica.
12. Barnet I, Pacheroova P, Neznal M (2008) Radon in geological environment - Czech experience. Czech geological survey. Special Papers (1-50), Prague, Czech.
13. Barros-Diosa JM, Ruano-Ravinaa A, Gastelu-Iturrid J, Figueirasa A (2007) Factors underlying residential radon concentration: results from Galicia. Spain *Environ Res.* 103,185–90.
14. BEIR (Biological Effects of Ionizing Radiation) (1999) Health Effects of Exposure to Radon:BEIR VI. Committee on Health Risks of Exposure to Radon, Board of Radiation Effects Research, Commission on Life Sciences, National Research Council; National Academy Press: Washington, DC, USA.
15. Bertoni G, El Hajj TM, Gandolla M (2022) Radon risk assessment and mitigation deadlines. *JERA*, 3, 7790.

16. Bikit I, Mrdja D, Todorovic N, Nikolov J, Krmar M, Veskovic M, Slivka J, Hansman J, Forkapic S, Jovancevic N (2012) Airborne radioiodine in northern Serbia from Fukushima, *Journal of environmental radioactivity*.114, 89-93.
17. Bikit I, Slivka J, Čonkić Lj, Krmar M, Vesković M, Žkić-Todorović N, Varga E, Ćurčić S, Mrdja D (2005) Radioactivity of the soil in Vojvodina (northern province of Serbia and Montenegro). *Journal of Environmental Radioactivity*. 78, 11–19.
18. Bochicchio F, Antignani S, Venoso G, Forastiere F (2013) Quantitative evaluation of the lung cancer deaths attributable to residential radon: a simple method and results for all the 21 Italian Regions. *Radiation Measurements* 50, 121-126.
19. Bochicchio F, Campos-Venutia G, Piermatteib S, Nuccetellia C, Risicaa S, Tommasino L, et al (2005) Annual average and seasonal variations ofresidential radon concentration for all the Italian Regions. *Radiation Measurements* 40, 686 – 694.
20. Bochicchio F, Žunić ZS, Carpentieri C, Antignani S, Venoso G, Carelli V, Cordedda C, Veselinović N, Tollefsen T, Bossew P (2014) Radon in indoor air of primary schools: a systematic survey to evaluate factors affecting radon concentration levels and their variability. *Indoor Air* 24, 315–326.
21. Borgoni R, Francesco DD, Bartolo DD, Tzavidis N (2014) Hierarchical modeling of indoor radon concentration: how much do geology and building factors matter? *Journal of Environmental Radioactivity* 138, 227-237.
22. Bossew P (2003) The radon emanation power of building materials, soils and rocks, *Appl. Radiat. Isot.* 59, 389–392.
23. Bossew P (2014) Determination of radon prone areas by optimized binary classification. *J. Environ. Radioact.* 129, 121–132.
24. Bossew P, Cinelli G, Ciotoli C, Crowley QG, De Cort M, Medina JE, Gruber V, Petermann E, Tollefsen T (2020) Development of a geogenic radon hazard index – concept, history, experiences. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 17 (11), 4134.
25. Bossew P, Lettner H (2007) Seasonality of indoor Radon concentration. *J. Environ. Radioact.* 98, 329–345.
26. Brajnik D, Miklavzic U, Tomsic J (1992) Map of natural radioactivity in Slovenia and its correlation to the emanation of radon, *Radiat. Prot. Dosim.* 45, 273–276.
27. Bräuner EV, Andersen CE, Andersen HP, Gravesen P, Lind M, Ulbak K, Hertel O, Schüz J, Raaschou-Nielsen O (2010) Is There Any Interaction between Domestic Radon Exposure and Air Pollution from Traffic in Relation to Childhood Leukemia Risk? *Cancer Causes Control* 21, 1961–1964.
28. Cafaro C, Bossew P, Giovani C, Garavaglia M (2014) Definition of radon prone areas in Friuli Venezia Giulia region, Italy, using geostatis tical tools. *J Environ Radioact.* 138, 208-219.
29. Carrion-Matta A, Lawrence J, Kang C-M, Wolfson JM, Li L, Vieira CLZ, Schwartz J, Democafarkritou P, Koutrakis P (2021) Predictors of indoor radon levels in the Midwest United States. *J. Air Waste Manag. Assoc.* 71, 1515–1528.
30. Catalano R, Imme G, Mangano G, Morelli D, Rosselli T (2012) Indoor radon survey in Eastern Sicily. *Radiat. Meas.* 47, 105–110.
31. Chambers SD, Hong S-B, Williams AG, Crawford J, Grif fiths AD, Park S-J (2014). Characterizing terrestrial influences on Antarctic air masses using Radon-222 mea surements at King George Island. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14(18), 9903–9916.

32. Chaudhuri H, Das N K, Bhandari R K, Sen P, Sinha B (2010) Radon activity measurements around Bakreswar thermal springs. *Radiat. Meas.* 45, 143–146.
33. Cho B-W, Choo CO, Kim MS, Hwang J, Yun U, Lee S (2015) Spatial relationships between radon and topographical, geological, and geochemical factors and their relevance in all of South Korea. *Environ. Earth Sci.* 74, 5155–5168.
34. Chowdhury MI, Alama MN, Hazarib SKS (1999) Distribution of radionuclides in the river sediments and coastal soils of Chittagong, Bangladesh and evaluation of the radiation hazard, *Appl. Radiat. Isot.* 51, 747–755.
35. Chua KJ, Chou SK, Yang WM, Yan J (2013) Achieving better energy-efficient air conditioning - A review of technologies and strategies, *Appl. Energy* 104, 87–104.
36. Cinelli G, Tondeur F, Dehandschutter B (2011) Development of an indoor radon risk map of the Walloon region of Belgium integrating geological information. *Environ. Earth Sci.* 62, 809–819.
37. Ciotoli G, Bigi S, Tartarello C, Sacco P, Lombardi S, Ascione A, Mazzoli S (2014) Soil gas distribution in the main coseismic surface rupture zone of the 1980, Ms = 6.9, Irpinia earthquake (southern Italy). *J. Geophys. Res. Solid Earth.* 19, 2440–2461.
38. Ciotoli G, Voltaggio M, Tuccimei P, Soligo M, Pasculli A, Beaubien S, Bigi S (2017) Geographically weighted regression and geostatistical techniques to construct the geogenic radon potential map of the Lazio region: A methodological proposal for the European Atlas of Natural Radiation. *J. Environ. Radioact.* 66, 355–375.
39. Ciotoli GC, Lombardi S, Annunziatellis A (2007) Geostatistical analysis of soil gas data in a high seismic intermontane basin: Fucino Plain, central Italy. *J. Geophys. Res.* 112, B05407.
40. Collignan B, Diallo TMO, Traverse S, Chastanet J, Abadie M, Powaga E, Hulot C, Romani Z, Allard F, Grasset M (2020) Methodology for the in situ characterisation of soil vapor contaminants and their impact on the indoor air quality of buildings. *Build Environ* 177, 106900.
41. Collignan B, Powaga E (2019) Impact of ventilation systems and energy savings in a building on the mechanisms governing the indoor radon activity concentration. *J Environ Radioactiv* 196, 268–273.
42. Cook GA (1961) Argon, Helium, and the Rare Gases. Interscience, New York.
43. Cori L, Curzio O, Donzelli G, Bustaffa E, Bianchi F (2022) A Systematic Review of Radon Risk Perception, Awareness, and Knowledge: Risk Communication Options. *Sustainability.* 14, 10505.
44. Cosma C, Cucos DA, Papp B, et al (2013) Radon and remediation measures near Băița-Ștei old uranium mine (Romania). *Acta Geophys.* 61(4), 859-875.
45. Cosma C, Papp B, Cucos A, Sainz C (2015) Testing radon mitigation techniques in a pilot house from Baita-Steii radon prone area (Romania). *J. Environ. Radioact.* 140, 141–147.
46. Crawford J, Chambers S, Kang CH, Griffiths A, Kim WH (2015) Analysis of a decade of Asian outflow of PM 10 and TSP to Gosan, Korea; also incorporating Radon-222. *Atmospheric Pollution Research*, 6(3), 529–539.
47. Curguz Z, Venoso G, Zunic ZS, Mirjanic D, Ampollini M, Carpentieri C et al (2020) Spatial Variability of Indoor Radon Concentration in Schools: Implications on Radon Measurement Protocols, *Radiation Protection Dosimetry* 191(2), 133-137.
48. Cvijić J (1911) Osnove za geografiju i geologiju Makedonije i Stare Srbije, Beograd, 10-11, III, 1453.

49. Čeliković I, Ujić P, Žunić ZS (2015) Sezonske varijacije koncentracija radona u ruralnim delovima Srbije. Zbornik radova XXVIII Simpozijuma DZZSCG, Vršac, 30. septembar – 2. oktobar, 199–206.
50. Daraktchieva Z (2021) Variability of indoor radon concentration in UK homes. *J. Radiol. Prot.* 41, 853–870.
51. Darby S, Hill D, Auvinen A, et al (2005) Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies. *Brit Med J.* 330, 223–227.
52. De Francesco S, Pascale Tommasone F, Cuoco E, Tedesco D (2010) Indoor radon seasonal variability at different floors of building. *Radiat. Meas.* 45, 928–934.
53. De Luca A, Mancini C (1991) The Measurement System for  $^{222}\text{Rn}$  Monitoring with Charcoal Adsorption Collectors, *Health Physics*, 61(4), 543–546.
54. De Martino S, Sabbarese C, Monetti G (1998) Radon emanation and exhalation rates from soils measured with an electrostatic collector, *Appl. Radiat. Isot.* 49, 407–413.
55. Dempsey S, Lyons S, Nolan A (2018) High Radon Areas and lung cancer prevalence: Evidence from Ireland. *J. Environ. Radioact.* 182, 12–19.
56. Denman AR, Groves-Kirkby NP, Groves-Kirkby CJ, Crockett RGM, Phillips PS, Woolridge AC (2007a) Health implications of radon distribution in living rooms and bedrooms in U.K. dwellings — A case study in Northamptonshire, *Environment International*, 33 (8), 999–1011.
57. Denman AR, Crockett RGM, Groves-Kirkby CJ, Phillips PS, Gillmore GK, Woolridge AC (2007b) The value of seasonal correction factors in assessing the health risk from domestic radon—a case study in Northamptonshire, UK. *Environ. Int.* 33, 34–44.
58. Dimitrijević MD (1997) *Geology of Yugoslavia*. Geol. Inst. GEMINI.
59. Direktor za radijacionu i nuklearnu sigurnost i bezbednost Srbije (2020) Izveštaj o izlaganju stanovništva jonizujućem zračenju u 2019. godini, Beograd, Republika Srbija. <https://www.srbatom.gov.rs/wp-content/uploads/2019/10/Izvestaj-Monitoring-2018.pdf>
60. Dragović S, Janković-Mandić Lj, Dragović R, Đorđević M, Đokić M, Kovačević J (2014) Lithogenic radionuclides in surface soils of Serbia: Spatial distribution and relation to geological formations. *Journal of Geochemical Exploration* 142, 4–10.
61. Drolet JP, Martel R (2016) Distance to faults as a proxy for radon gas concentration in dwellings. *J Environ Radioact.* 152, 8–15.
62. Dubois G, Bossew P, Tollefsen T, De Cort M (2008) First steps towards a European Atlas of Natural Radiation including harmonized radon maps of the European Union; IGC 33, 12–14 August, Oslo, Norway..
63. Durrani SA, Ilic R (1997) Radon measurements by etched track detectors: Applications in radiation protection, earth sciences and the environment. World Scientific, Singapore.
64. Elío J, Crowley Q, Scanlon R, Hodgson J, Long S (2017) Logistic regression model for detecting radon prone areas in Ireland. *Sci. Total Environ.* 599–600, 1317–1329.
65. EPA (Environmental Protection Agency) (1993) Draft Diffuse NORM-Waste Characterization and Preliminary Risk Assessment. US Office of Radiation and Indoor Air, Washington DC; Pergamon Press, Oxford.
66. Eremić Savković M, Udovičić V, Maletić D, Pantelić G, Ujić P, Čeliković I, Forkapić S et al (2020) Results of the first national indoor radon survey performed in Serbia, *Journal of Radiological Protection* 40(2), N22.

67. European Council (2014) Council Directive 2013/59/Euratom: Basic safety standards for protection against the dangers arising from exposure to ionising radiation. Official J Eur Union 57(L13):1–73. <https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/CELEX-32013L0059-EN-TXT.pdf>. (приступљено 28. јануара 2021).
68. Felicioni L, Jiránek M, Vlasatá B, Lupíšek A (2023) An Environmental Evaluation of Ventilation Systems Aimed at Reducing Indoor Radon Concentration. *Buildings* 13, 2706.
69. Field RW, Krewski D, Lubin JH, Zielinski JM, Alavanja M, Catalan VS et al (2006) An overview of the North American residential radon and lung cancer case-control studies. *J. Toxicol. Environ. Health A* 69, 599–663.
70. Firoozabadi A, Bozarjomhari F, Ghahari M, Parch A, Lotfi M, Zare M (2016) Measurement of radon gas concentrations in lead and zinc mines of Yazd province. *Health Tool.* 14 (6), 94–102.
71. Fisk WJ, Singer BC, Chan WR (2020) Association of residential energy efficiency retrofits with indoor environmental quality, comfort, and health: a review of empirical data. *Build Environ* 180, 107067.
72. Fojtikova I, Navratilova Rovenska K (2014) Infuence of energy-saving measures on the radon concentration in some kindergartens in the Czech Republic. *Radiat Prot Dosim.* 160, 149–153.
73. Forkapic S, Maletić D, Vasin J, Bikit K, Mrdja D, Bikit I, Udovičić V, Banjanac R (2017) Correlation analysis of the natural radionuclides in soil and indoor radon in Vojvodina, Province of Serbia, *Journal of Environmental Radioactivity.* 166(2), 403–411.
74. Forkapić S, Bikit K, Arsić V, Ilić J, Pantelić G, Tivanović M (2015) Rezultati nacionalnog međulaboratoriskog poređenja u merenju koncentracije radona u vazduhu zatvorenih prostorija Beograd-Noví Sad 2015. godine. *Zbornik radova XXVIII Simpozijuma DZZSCG.* 30. Septembar – 2. Oktobar, 212–221, Vršac.
75. Forkapić S, Lakatoš R, Čeliković I, Bikit-Schroeder K, Mrdja D, Radolić V, Samardžić S (2019) Proposal and optimization of method for direct determination of the thoron progeny concentrations and thoron equilibrium, *Radiation Physics and Chemistry.* 159, 57–63.
76. Fournier F, Groetz J E, Jacob F, Crolet J M, Lettner H (2005) Simulation of Radon Transport through building materials: Influence of Water Content on Radon Exhalation Rate. *Transport in Porous Media,* 197–214.
77. Friedmann H, Baumgartner A, Gruber V, et al (2017) The uncertainty in the radon hazard classification of areas as a function of the number of measurements. *J Environ Radioact.* 173, 6–10.
78. Frutos B, Martín-Consuegra F, Alonso C, Perez G, Peón J, Ruano-Ravina A, Barros JM, Santorun AM (2021) Inner Wall Filler as a Singular and Significant Source of Indoor Radon Pollution in Heritage Buildings: An Exhalation Method-Based Approach. *Build. Environ.* 201, 108005.
79. Frutos-Puerto S, Pinilla-Gil E, Andrade E, Reis M, Madruga MJ, Rodríguez CM (2020) Radon and Thoron Exhalation Rate, Emanation Factor and Radioactivity Risks of Building Materials of the Iberian Peninsula. *PeerJ.* 8, e10331.
80. Gallelli G, Panatto D, Lai P, Orlando P, Risso D (1998) Relevance of main factors affecting radon concentration in multistorey buildings in Liguria (Northern Italy) *J Environ Radioact.* 39(2)117–128.

81. Gaskin J, Coyle D, Whyte J, Birkett N, Krewksi D (2019) A cost effectiveness analysis of interventions to reduce residential radon exposure in Canada. *J. Environ. Manag.* 247, 449–461.
82. Gavrilov MB, Marković SB, Janc N, Nikolić M, Valjarević A, Komac B, Zorn M, Punišić M, Bačević N (2018) Assessing average annual air temperature trends using the Mann–Kendall test in Kosovo. *Acta geographica Slovenica* 58(1), 7–25.
83. Géczi G, Benécs J, Kristóf K, Horváth M (2018) High Concentrations of Radon and Carbon Dioxide in Energy-Efficient Family Houses without Heat Recovery Ventilation. *J. Environ. Eng. Landsc. Manag.* 26, 64–74.
84. Geološki Atlas Srbije 1:2000000 (2002) Ministarstvo za zaštitu prirodnih resursa i životne sredine Republike Srbije, Bares, Beograd.
85. Giammanco S, Sims KWW, Neri M (2007). Measurements of <sup>220</sup>Rn and <sup>222</sup>Rn and CO<sub>2</sub> emission in soil and fumaroles gases on Mt. Etna volcano (Italy): implications for gas transport and shallow ground fracture. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 8, Q10001.
86. Giardini D, Woessner J, Danciu L et al (2013) SHARE European Seismic Hazard Map for Peak Ground Acceleration, 10% Exceedance Probabilities in 50 Years. Zurich.
87. Grahovac ZR (1986) Uran u aleksinačkom škriljcu Magistrski rad, Filozofski fakultet u Nišu, Niš.
88. Gregorič, A.; Zmažek, B.; Dzeroski, S.; Torkar, D.; Vaupotič, J. Radon as an Earthquake Precursor—Methods for Detecting Anomalies. In *Earthquake Research and Analysis-Statistical Studies, Observations and Planning*; D’Amico, S., Ed.; InTech: Trichy, India, 2012; pp. 179–196. Available online: <http://www.intechopen.com/books/earthquake-research-and-analysis-statistical-studies-observations-and-planning> (accessed on 1 September 2024).
89. Grey DJ, Windham ST (1987) EERF Standard Operating Procedures for Radon-222 Measurement Using Charcoal Canisters, EPA 520/5– 87-005. <https://www.osti.gov/biblio/6282254> (приступљено 11. јула. 2020).
90. Groves-Kirkby CJ, Crockett RG, Denman AR, Phillips PS (2012) Climatic and seasonal influences on radon time series in an environment of low anthropogenic activity. In *Proceedings of the 13th International Congress of the International Radiation Protection Association (IRPA13)*, 14–18, Glasgow, UK.
91. Gulan L (2014) Merenje radionuklida u tlu i radona u zatvorenim prostorijama na Kosovu i Metohiji. Doktorska disertacija, Univerzitet u Kragujevcu, Kragujevac.
92. Gulan L, Forkapić S, Spasić D, Radovanović Živković J, Hasman J, Lakatoš R, Samardžić S (2022) Identification of high radon dwellings, risk of exposure, and geogenic potential in the mining area of the “TREPČA” complex. *Indoor Air*. 32:e13077.
93. Gulan L, Milenkovic B, Stajic JM, et al (2013) Correlation between radioactivity levels and heavy metal content in the soils of the north Kosovska Mitrovica environment. *Environ Sci-Proc Imp.* 15, 1735-1742.
94. Gulan L, Stajic JM, Bochicchio F, Carpentieri C, Milic G, Nikezic D, Zunic ZS (2017) Is high indoor radon concentration correlated with specific activity of radium in nearby soil? A study in Kosovo and Metohija. *Environ Sci Pollut R* 24, 19561–19568.
95. Gulan L, Stajic JM, Spasic D, Forkapic S (2023) Radon levels and indoor air quality after application of thermal retrofit measures - a case study. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 16, 363–373.

96. Gulan L, Valjarevic A, Milenkovic B, Stevanovic V, Milic G, Stajic JM (2018) Environmental radioactivity with respect to geology of some Serbian spas. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 317, 571–578.
97. Gulan L, Valjarević A, Spasić D, Durlević U (2024) An Overview of Environmental Impact of the Long-Term Mining, Ambient Dose Equivalent Rates in Urban Air and Remediation Proposals. In: Morar, C., Berman, L., Erdal, S., Niemets, L. (eds) *Achieving Sustainability in Ukraine through Military Brownfields Redevelopment*. NATOARW 2023. NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security. Springer, Dordrecht. [https://doi.org/10.1007/978-94-024-2278-8\\_21](https://doi.org/10.1007/978-94-024-2278-8_21)
98. Gunby JA, Darby SC, Miles JCH, Green BMR, Cox DR (1993) Factors affecting indoor radon concentrations in the United Kingdom, *Health Phys.* 64, 2-12.
99. Hassan N M, Ishikawa T, Hosoda M, Iwaoka K, Sorimachi A, Sahoo S K, M J, Kranrod C, Yonehara H, Fukushi M, Tokonami S (2011) The effect of water content on the radon emanation coefficient for some building materials used in Japan. *Radiat. Meas.* 46, 232-237.
100. Hess CT, Weiffenbach CV, Norton SA (1983) Environmental radon and cancer correlations in Maine. *Health Phys.* 45, 339–348.
101. <http://www.durrIDGE.com/documentation/RAD7Manual.pdf>, DurrIDGE RAD7 radon detector user manual, revision 7.26. DURRIDGE Company; 2014.
102. <https://www.airthings.com/home>, Airthings Corentium Home: Radon detector. Oslo, Norway: Corentium AS.
103. <https://www.manualslib.com/manual/2159777/Extech-Instruments-Wth600-E.html>
104. <https://www.quarta-rad.ru/en/catalog/dozimetr-radiometr-radon/dozimetr-radex-rd1503/>, Radex counter.
105. Hunter N, Muirhead CR, Miles JHC, Appleton JD (2009) Uncertainties in radon related to house-specific factors and proximity to geological boundaries in England *Radiat. Prot. Dosim.* 136, 17–22.
106. Hwa Oh Y, Kim GA (2015) Radon-thoron isotope pair as a reliable earthquake precursor. *Sci Rep* 5, 13084.
107. IAEA (International Atomic Energy Agency) (1989) Measurement of radionuclides in food and the environment. Technical Report No. 295, Vienna, Austria. <https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/Public/20/041/20041399.pdf>
108. IAEA (International Atomic Energy Agency) (2013) Measurement and Calculation of Radon Releases from NORM Residues. Technical Ser. No. 474, Vienna, [pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/trs474\\_webfile.pdf](http://pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/trs474_webfile.pdf)
109. ICRP (International Commission on Radiological Protection) (1993) Protection against radon-222 at home and at work. ICRP Publication 65. *Ann. ICRP* 23(2).
110. ICRP (International Commission on Radiological Protection) (2007) The Recommendations of the International Commission on Radiological Protection; ICRP Publication 103. *Ann*; Pergamon Press: Oxford, UK.
111. ICRP (International Commission on Radiological Protection) (2010) Lung Cancer Risk from Radon and Progeny and Statement on Radon; International Commission on Radiological Protection 40, Ottawa, ON, Canada,.
112. ICRP (International Commission on Radiological Protection) (2014) Radiological Protection against Radon Exposure; ICRP Publication 126. *Ann. ICRP*, 43(3); SAGE Publication: London, UK.

113. ICRP (International Commission on Radiological Protection) (2017) Occupational Intakes of Radionuclides: Part 3; ICRP Publication 137. Ann. ICRP 46 (3–4); SAGE Publication: London, UK.
114. ICRP (International Commission on Radiological Protection) (2018) Summary of ICRP Recommendations on Radon. ICRP Ref. 4836-9756-8598. <http://www.icrpaedia.org/images/f/fd/ICRPRadonSummary.pdf> (приступљено 24. марта 2024).
115. Ingersoll JG, Stitt BD, Zapalac GH (1983) A fast and accurate method for measuring radon exhalation rate from building materials, *Health Phys.* 45, 550–552.
116. Inspector Alert Nuclear Radiation Monitor (1996) Operating Manual, 2005 by International Medcom, Inc.
117. Ivanova Z, Stojanovska Z, Djunakova D, Djounova J (2021) Analysis of the spatial distribution of the indoor radon concentration in school's buildings in Plovdiv province, Bulgaria. *Build. Environ.* 204, 108122.
118. Jaishi HP, Singh S, Tiwari R P, Tiwari RC (2014). Analysis of soil radon data in earthquake precursory studies. *Annals of Geophysics*, 57(5), S0544.
119. Jiránek M, Kačmaříková V (2019) Radon diffusion coefficients and radon resistances of waterproofing materials available on the building market. *Journal of Environmental Radioactivity*. 208–209, 106019.
120. Jiránek M. (2017) New, efficient and generally applicable design of radon-proof insulations-a proposal for a uniform approach. *Radiation Protection Dosimetry* 177(1-2), 121–124.
121. Jo JH, Lim JH, Song SY, Yeo MS, Kim KW (2007) Characteristics of pressure distribution and solution to the problems caused by stack effect in high-rise residential buildings. *Build. Environ.* 42, 263–277.
122. Jonson G (1991) Solid state nuclear track detectors in radon measurements indoors and in the soil. *Nucl. Tracks Radiat. Meas.* 19, 335-338.
123. Jönsson G (1997) Indoor radon surveys. In "Radon measurements by etched track detectors: Applications in radiation protection, earth science, and the environment." (editors: S.A. Durrani, R. Ilic), 157-177, World Scientific, Singapore.
124. Junge CE (1963) *Air Chemistry and Radioactivity*. Academic Press, New York.
125. Karpińska M, Mnich Z, Kapala J (2004). Seasonal changes in radon concentrations in buildings in the region of northeastern Poland. *J. Environ. Radioact.* 77, 101-109.
126. Katona T, Kanyár B, Somlai J (2005) Cost assessment of ventilation and averted dose due to radon in dwellings. *J. Environ. Radioact.* 79, 223–230.
127. Kemski J, R. Klingel R, Siehl A, Valdivia-Manchego M (2008) From radon hazard to risk prediction-based on geological maps, soil gas and indoor measurements in Germany. *Environ Geol.* 56, 1269–1279.
128. Kesikuru T, Kokotti H, Lammi S, Kalliokoski P (1999) How did wind affect the radon entry into seven detached houses. *Science of Total Environment*, submitted for publication.
129. Khan SM, Gomes J, Krewski DR (2019) Radon Interventions around the Globe: A Systematic Review. *Heliyon*. 5, e01737.
130. Kim JW, Joo HY, Kim R, Moon JH (2018) Investigation of the relationship between earthquakes and indoor radon concentrations at a building in Gyeongju, Korea. *Nuclear Engineering and Technology*, 50(3), 512-518.

131. Kitto ME (2005) Interrelationship of indoor radon concentrations, soil-gas flux, and meteorological parameters. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 264, 381–385.
132. Kladder DL (2011) Case Report and Technical Document. Colorado Vintage Companies 16–03 CO; Progeny Group Limited: Colorado Springs, CO, USA.
133. Knežević J, Kuzmanović P, Mrdja D, Todorović N, Bikit I, Hansman J (2020) Estimation of absorbed gamma dose rate from granite by Monte Carlo simulation approach *J. Radiol. Prot.* 40, 596–611.
134. Kokotti H, Bonnefous Y, Kalliokoski P (1996) Normalized radon entry rates in residences. *Proceedings of Indoor Air '96*, 21–26, (1) 81–86, Nagoya, Japan.
135. Kokotti H, Kalliokoski P, Jantunen M (1995) Dependency of radon entry on pressure difference. *Atmospheric Environment* 26A, 2247–2250.
136. Korhonen P, Kokotti H, Kalliokoski P (2000a) Survey and mitigation of occupational radon exposure in underground workplaces. *Building and Environment* 35, 555 – 562.
137. Korhonen P, Kokotti H, Kalliokoski P (2000b) Behaviour of radon, radon progenies and particle levels during room depressurisation. *Atmospheric Environment* 34, 2373–2378.
138. Krewski D, Lubin JH, Zielinski JM, Alavanja M, Catalan VS, Field RW et al (2006) A combined analysis of North American case-control studies of residential radon and lung cancer. *J. Toxicol. Environ. Health.* 69, 533–597.
139. Krewski D, Lubin JH, Zielinski JM, Alavanja M, Catalan VS, Field RW, Klotz JB, Létourneau EG, Lynch CF, Lyon JL et al (2005) Residential radon and risk of lung cancer. A combined analysis of seven North American case-control studies. *Epidemiology* 16, 137–145.
140. Krstić D, Nikezić D, Stevanović N, Vučić D (2007) Radioactivity of some domestic and imported building materials from South Eastern Europe. *Radiation Measurements*, 42, 1731–1736.
141. Kulich J, More H, Swedjemark GA (1988) Radon and Radium in Household Water. Swedish Radiation Protection Institute, SSI-Report 88-11.
142. Kumar A, Chauhan RP (2014) Active and passive measurements of radon diffusion coefficient from building construction materials. *Environ. Earth. Sci.* 72, 251–257.
143. Kuzmanović P, Todorović N, Filipović Petrović L, Mrđa D, Forkapić S, · Jovana Nikolov J, Knežević J (2020a) Radioactivity of building materials in Serbia and assessment of radiological hazard of gamma radiation and radon exhalation. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 324, 1077–1087.
144. Kuzmanović P, Todorović N, Forkapić S, Petrović LF, Knežević J, Nikolov J, Miljević B (2020b) Radiological characterization of phosphogypsum produced in Serbia *Radiat. Phys. Chem.* 166, 108463.
145. Larsson LS (2014) Risk-reduction strategies to expand radon care planning with vulnerable groups. *Public Health Nurs.* 31, 526–536.
146. Laurier D, Marsh JW, Rage E, Tomasek L (2020) Miner studies and radiological protection against radon. *Annals of the ICRP.* 49(1), 57–67.
147. Levinson AA, Coetzee GL (1978) Implications of disequilibrium in exploration for uranium ores in the surficial environment using radiometric techniques-a review. *Minerals Sci. Eng.* 10, 19–27.
148. Liangliang P, Guoxiu Q, Qimin W, Fan Li ,Weizhe Li (2022) Development of an Anti-radon Coating for Underground. *Engineering Journal of Physic. Conference Series* 2224, 012067.

149. Loffredo F, Opoku-Ntim I, Meo G, Quarto M (2022) Indoor Radon Monitoring in Kindergarten and Primary Schools in South Italy. *Atmosphere* 13, 478.
150. Lopez-Coto I, Mas JL, Bolivar JP, Garcia-Tenorio R (2009) A short-time method to measure the radon potential of porous materials. *Appl. Radiat. Isot.* 67, 133-138.
151. López-Pérez M, Hernández F, Díaz JP, Salazar-Carballo PA (2022) Determination of the indoor radon concentration in schools of Tenerife (Canary Islands): a comparative study. *Air Qual Atmos Health.* 15(5), 825-835.
152. Madureira J, Paciencia I, Rufo J, Moreira A, de Oliveira Fernandes E, Pereira A (2016) Radon in indoor air of primary schools: Determinant factors, their variability and effective dose. *Environ. Geochem. Health.* 38, 23–533.
153. Manohar S, Meijer H, Herber M (2013) Radon flux maps for the Netherlands and Europe using terrestrial gamma radiation derived from soil radionuclides. *Atmos. Environ.* 81, 399–412.
154. Marley F (2001) Investigation of the influences of atmospheric conditions on the variability of radon and radon progeny in buildings. *Atmos. Environ.* 35, 5347–5360.
155. Medhat ME (2009) Assessment of radiation hazards due to natural radioactivity in some building materials used in Egyptian dwellings, *Radiat. Prot. Dosim.* 133, 177-185.
156. Meyer W (2019) Impact of constructional energy-saving measures on radon levels indoors. *Indoor Air.* 29, 680–685.
157. Milic G, Jakupi B, Tokonami S, Trajkovic R, Ishikawa T, Celikovic I, Ujić P, Cuknic O, Yarmoshenko I et al (2010) The concentrations and exposure doses of radon and thoron in residences of the rural areas of Kosovo and Metohija. *Radiation Measurements*, 45, 118–121.
158. Milner J, Shrubsole C, Das P, Jones B, Ridley I, Chalabi Z, Hamilton I, Armstrong B, Davies M, Wilkinson P (2014) Home energy efficiency and radon related risk of lung cancer: modelling study. *BMJ* 348, 1–12.
159. Misdaq MA, Ezzahery H, Lamine J (2002) Influence of the building material and ventilation rate on the concentration of radon, thoron and their progenies in dwelling rooms using SSNTD and Monte Carlo simulation. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 252, 67–74.
160. Moens L, Donder JD, Xi-lei L, Corte FD, Wispelaere AD, Simonits A, Hoste J (1981) Calculation of the absolute peak efficiency of gamma-ray detectors for different counting geometries *Nucl. Instr. Methods.* 187 451–72.
161. Montheil J, Vadala P, Leistel JM, Cottard F, Ilic M, Strumberger A, Tosovic R, Stepanovic A (2002) Mineral deposits and mining districts of Serbia. Compilation map and GIS databases. BRGM/RC-51448-FR.
162. Morawska L (1989) Two ways of determining the  $^{222}\text{Rn}$  emanation coefficient, *Health Phys.* 57, 481–483.
163. Müllerová M, Holy K, Bulko M (2014) Daily and seasonal variations in radon activity concentration in the soil air. *Radiation Protection Dosimetry* 160(1–3), 222–225.
164. Munoz E, Frutos B, Olaya M, Sanchez J (2017) A finite element model development for simulation of the impact of slab thickness, joints, and membranes on indoor radon concentration. *J Environ Radioactiv.* 177, 280-289.
165. Murty VRK, Karunakara N (2008) Natural radioactivity in the soil samples of Botswana. *Radiat. Meas.* 43, 1541–1545.

166. Nazaroff WW, Feustel H, Nero A, Revzan KL, Grimsgrub DT, Essling MA, Toohey RE (1985) Radon transport into a detached one-storey house with a basement. *Atmospheric Environment* 12, 717-720.
167. Nazaroff W W (1992) Radon transport from soil to air, *Rev. Geophys.* 30, 137–160.
168. NCRP (National Council on Radiation Protection and Measurements) (1987) Exposure of the population in the United States and Canada from natural background radiation. Report No. 94, Bethesda, Maryland.
169. Nedeljković B, Milentijević G, Lazić, M (2007) Zaštita životne sredine u neaktivnim industrijskim područjima. Zbornik radova “Zaštita životne sredine u industrijskim područjima”. 8–25, Kosovska Mitrovica, Srbija.
170. Neri A, McNaughton C, Momin B, Puckett M, Gallaway MS (2018) Measuring public knowledge, attitudes, and behaviors related to radon to inform cancer control activities and. *Indoor Air.* 28, 604–610.
171. Nielson K K, Rogers V C, Holt R B, Pugh T D, Grondzik W A, de Meijer R J (1997) Radon penetration of concrete slab cracks, joints, pipe penetrations, and sealants, *Health Phys.*, 73, 668- 678.
172. Nikezić D (1995) Radon, glavni kontaminant čovekove okoline, *Jonizujuća zračenja iz prirode*, 145, Beograd.
173. Nikezić D, Yu KN (1999) Modelling radon progeny behaviour on surfaces and notes on the the radon retrospective exposure. *Radiation Protection Dosimetry.* 82(2), 144-146.
174. Nikolić B (1999) *Metalurgija*, 5(2) 141–156.
175. Novović T, Vitić M (1956) *Geologija uže okoline Kosovske Mitrovice*, 5-6, Kosovska Mitrovica.
176. Nunes LJR, Curado A (2023) Confined Spaces in Buildings with High Indoor Radon Concentration: A Case Study Analysis with the Application of Constructive Remediation Measures. *Buildings.* 13, 49.
177. Nunes LJR, Curado A, Lopes SI (2024) Indoor radon mitigation strategies: The Alto Minho region (Northern Portugal) practical case. *Indoor Built Environ.* 33, 269–286.
178. Pajin D, Polak V, Simonović S, Stefanović M (1985) *Radijacija: Doze, posledice, rizici.* Nolit, Beograd.
179. Pan L, Qin G, Wang Q, Li F, Li W (2022) Development of an anti-radon coating for underground engineering. *J. Phys. Conference Series*, 2224, 012067.
180. Pankaj B, Vinod K, Rohit M (2017) Measurement of radon exhalation rate in various building materials and soil samples. *J. Earth Syst. Sci.* 126, 31.
181. Papastefanou C, Stoulos S, Manolopoulou M, Ioannidou A, Charalambous S (1994) Indoor radon concentrations in Greek apartment dwellings. *Health Phys.* 66, 270–273.
182. Paridaens J, de Saint-Georges L, Vanmarcke H (2005) Mitigation of a Radon-Rich Belgian Dwelling Using Active Subslab Depressurization. *J. Environ. Radioact.* 79, 25–37.
183. Park JH, Lee CM, Kang DR (2019) A Deterministic Model for Estimating Indoor Radon Concentrations in South Korea. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2019, 16, 3424.
184. Pertsov LA (1964) *Natural radioactivity of the biosphere.* 311 Atomizdat, Moscow.
185. Perez-Lombard L, Ortiz J, Pout C (2008) A review on buildings energy consumption information, *Energy Build.* 40, 394–398.
186. Persily AK, Emmerich SJ (2012) Indoor air quality in sustainable, energy efficient buildings, *HVAC&R Res.* 18, 4–20.

187. Pollard D, Fenton D (2014) Use of health economics in the development of a national radon control strategy in Ireland. *Radiat. Prot. Dosim.* 160, 30–34.
188. Popović D, Todorović D (2006) Radon indoor concentrations and activity of radionuclides in building materials in Serbia. *Facta Universitatis: Physics, Chemistry and Technology*, 4, 11-20.
189. Porstendörfer J (1994) Properties and behaviour of radon and thoron and their decay products in the air. *J. Aerosol Sci.* 25(2), 219-263.
190. Portaro M, Rocchetti I, Tuccimei P, Galli G, Soligo M, Ciotoli G, Longoni C, Vasquez D, Sola F (2024) Indoor Radon Surveying and Mitigation in the Case-Study of Celleno Town (Central Italy) Located in a Medium Geogenic Radon Potential Area. *Atmosphere*. 15, 425.
191. Portaro M, Tuccimei P, Galli G, Soligo M, Longoni C, VasquezD (2023) Testing the Properties of Radon Barrier Materials and Home Ventilation to Mitigate Indoor Radon. *Atmosphere*. 14, 15.
192. Pressyanov D, Dimitrova I, Mitev K, Georgiev S, Dimitrov D (2019) Identifying radon priority areas and dwellings with radon exceedances in Bulgaria using stored CD/DVDs. *J Environ Radioact.* 196, 274-280.
193. Quanfu S, Shinji T, Yuji Y, Summon A (2002) Main Meteorological Parameters to Influence Indoor Radon Level. *Radioisotopes*, 51, 120-126.
194. Radolić V, Vuković B, Stanić D, Katić M, Faj Z, Šuveljak B, Lukačević I, Faj D, Lukić M, Planinić J (2006) National survey of indoor radon levels in Croatia. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 269, 87 – 90.
195. Rasmussen TV (2016) Design Criteria for Achieving Low Radon Concentration Indoors. In *International Science Index Conference Proceedings: International Scholarly and Scientific Research & Innovation* 18(3), 225-230, World Academy of Science, Engineering and Technology, Singapore SG.
196. Rowe JE, Kelly M, Price LE (2002) Weather system scale variation in radon-222 concentration of indoor air. *Sci. Total Environ.* 284, 157–166.
197. Sabbarese C, Ambrosino F, D’Onofrio A (2021) Development of Radon Transport Model in Different Types of Dwellings to Assess Indoor Activity Concentration. *J. Environ. Radioact.* 227, 106501.
198. Sakoda A, Hanamoto K, Ishimori Y, Nagamatsu T, Yamaoka K, (2008) Radioactivity and radon emanation fraction of the granites sampled at Misasa and Badgastein, *Appl. Radiat. Isot.* 66, 648–652.
199. Sakoda A, Ishimori Y, Yamaoka K (2011) A comprehensive review of radon emanation measurements for mineral, rock, soil, mill tailing and fly ash. *Appl. Radiat. Isot.* 60, 1422–1435.
200. Samuelsson C (1988) Retrospective Determination of Radon in Houses. *Nature* 1988, 334, 338–340.
201. Sathish LA, Nagaraja K, Ramanna HC, Nagesh V, Sundareshan S (2009) Concentration of radon, thoron and their progeny levels in different types of floorings, walls, rooms and building materials. *Iranian journal of radiation research (IJRP)*. 7(1), 1-9.
202. Schroeyers W (2017) Naturally Occurring Radioactive Materials in Construction - Integrating Radiation Protection in Reuse (COST Action Tu1301 NORM4BUILDING), Woodhead Publishing, 13-36, ISBN 978-0-08-102008-1.

203. Schubert M, Musolff A, Weiss H (2018) Influences of meteorological parameters on indoor radon concentrations ( $^{222}\text{Rn}$ ) excluding the effects of forced ventilation and radon exhalation from soil and building materials. *J. Environ. Radioact.* 192, 81–85.
204. Schubert M, Schulz H (2002) Diurnal radon variations in the upper soil layers and at the soil-air interface related to meteorological parameters. *Health Phys.* 83, 91–96.
205. Scivyer CR and Jaggs MPR (1998) A BRE (Building Research Establishment) guide to radon remedial measures in existing dwellings, Dwellings with cellars and basements. Construction Research Communications Ltd, London.
206. Singh S, Singh J and Singh L (2005) The study of some common plaster coating materials and plastic foils as a barrier to radon. *Radiation Measurements.* 40, 673 – 677.
207. Službeni Glasnik RS (2018) Pravilnik o granicama sadržaja radionuklida u vodi za piće, životnim namirnicama, stočnoj hrani, lekovima, predmetima opšte upotrebe, građevinskom materijalu i drugoj robi koja se stavlja u promet. 36/2018-54.
208. Službeni Glasnik Republike Srbije (2018) Pravilnik o granicama izlaganja jonizujućim zračenjima i merenjima radi procene nivoa izlaganja jonizujućim zračenjima. 50/2018.
209. Smislov AA (1974) Uran i torij v zemnoj kore Leningrad.
210. Somlai J, Gorjánác Z, Várhegyi A, Kovács T (2006) Radon concentration in houses over a closed Hungarian uranium mine. *Science of the Total Environment* 367, 653–665.
211. Spasić D, Gulán L (2022) High indoor radon case study: Influence of meteorological parameters and indication of radon prone area. *Atmosphere* 13, 2120.
212. Spasić D, Gulán L, Vučković B (2024) Indoor Radon Testing, Effective Dose and Mitigation Measures in a Residential House of a Mining Area. *Atmosphere* 15, 745.
213. Stajic JM, Nikezic D (2015) Measurement of radon exhalation rates from some building materials used in Serbian construction. *J Radioanal Nucl Chem.* 303, 1943–1947.
214. Steck DJ (2009) Annual average indoor radon variations over two decades. *Health Phys.* 96(1), 37-47.
215. Stevanovic N, Markovic V, Urosevic V, Nikezic D (2009) Determination of parameters of the Jacobi room model using the Brownian motion model, *Health Physics* 96, 48-54.
216. Sun Q, Tokonami S, Yamada Y, Akiba S (2002) Main meteorological parameters to influence indoor radon level. *Radioisotopes* 51, 120–126.
217. Svensson M, Barregård L, Axelsson G, Andersson E (2018) A cost-effectiveness analysis of lowering residential radon levels in Sweden—results from a modelling study. *Health Policy* 122, 687–692.
218. Symonds P, Rees D, Daraktchieva Z, McColl N, Bradley J, Hamilton I, Davies M (2019) Home energy efficiency and radon: an observational study. *Indoor Air* 29, 854–864
219. Tan Y, Xiao D, Liu X, Tang Q (2013) Measuring radon exhalation rate by tracing the radon concentration of ventilation-type accumulation chamber. *Radiat Meas.* 58, 33-369.
220. Tan Y, Yuan H, Kearfott K (2020) A Model Comparison of Diffusion-Controlled Radon Exhalation from Solid and Cavity Walls with Application to High Background Radiation Areas. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 27, 43389–43395.
221. Tanner AB (1980) Radon Migration in the Ground-A Supplementary Review. In: Gesell TF and Lowder WM, Eds, *The Natural Radiation Environment III. Proceedings of the 3rd International Symposium on the Natural Radiation Environment*, U.S. Department of Energy, 3-5, Washington DC.

222. Tasköprü C, İçhedef M, Saç MM (2023) Diurnal, monthly, and seasonal variations of indoor radon concentrations concerning meteorological parameters. *Environ. Monit. Assess.* 195, 25.
223. Todorovic N, Forkapic S, Bikit I, Mrdja D, Veskovic M, Todorovic S (2011) Monitoring for exposures to TENORM sources in Vojvodina region. *Radiat. Prot. Dosim.* 144, 655-658.
224. Todorović N, Bikit I, Krmar M, Mrdja D, Hansman J, Nikolov J, Forkapić S, Vesković M, Bikit K, Jakonić I (2014) Natural radioactivity in raw materijals used in building industry in Serbia. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 12, 705-716.
225. Tollefsen T, Cinelli G, Bossew P, Gruber V, De Cort M (2014) From the European indoor radon map towards an atlas of natural radiation. *Radiat. Prot. Dosim.* 162, 129–134.
226. Trajković S, Nikolić B, Kamberović Ž, Bajić S (2022) Development of the lead and zinc mining and metallurgy in the "Trepča" mine – Stari Trg. *Bakar* 47(2), 11–30.
227. Turner MC, Krewski D, Chen Y, Pope CA, Gapstur SM, Thun MJ (2012) Radon and COPD mortality in the American Cancer Society Cohort. *Eur. Respir. J.* 39, 1113–1119.
228. UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation) (1982) Ionizing Radiation: Sources and Biological Effects. Report to the General Assembly, with Scientific Annexes, United Nations, New York.
229. UNSCEAR (United Nation Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation) (1993) Sources, effects and risks of ionizing radiation. United Nations, New York.
230. UNSCEAR (United Nation Scientific Committee the Effect of Atomic Radiation) (2000) Source and effect of ionizing radiation. The General Assembly with Scientific Annex. United Nations, New York.
231. UNSCEAR (United Nation Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation) (2006) Report Vol. II: Sources-to-Effects Assessment for Radon in Homes and Workplaces. United Nations, New York, USA.
232. UNSCEAR (United Nation Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation) (2008) Source and Effect of Ionizing Radiation. The General Assembly with Scientific Annex; Annex B: Exposure of the public and workers from various sources of radiation, United Nations, New York, USA.
233. UNSCEAR (United Nation Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation) (2019) Sources, effects and risks of ionizing radiation. The General Assembly with Scientific Annexes; ANNEX B Lung cancer from exposure to radon, United Nations, New York, USA.
234. USEPA (US Environmental Protection Agency) (1999) Radon in drinking water health risk reduction and cost analysis. EPA Federal Register 64 (USEPA, Office of Radiation Programs), Washington, DC.
235. Van der Spoel WH, Van der Graaf ER, De Meijer RJ (1997) Diffusive transport of radon in a homogeneous column of dry sand. *Health Phys.* 72 (5), 766–778.
236. Vasilyev AV, Yarmoshenko IV, Zhukovsky MV (2015) Low air exchange rate causes high indoor radon concentrations in energy efcient buildings. *Radiat Prot Dosim.* 164, 601–605
237. Vesić D (1987) Mogućnosti gamaspektrometrijskog određivanja urana, torijuma i kalijuma u geološki definisanim uzorcima Doktorska disertacija, Prirodno-matematički fakultet u Beogradu, Beograd.

238. Vučković B, Kurilić SM, Nikolić-Bujanović L, Todorović N, Nikolov J, Radovanović JŽ, Milošević R, Jokić A (2023) Radon in drinking water from alternative sources of water supply in the north of Kosovo. *Radiat. Prot. Dosim.* 199(1), 44-51.
239. Walia V, Su TC, Fu CC, Yang TF (2005a) Spatial variations of radon and helium concentrations in soil gas across Shan-Chaio fault, Northern Taiwan. *Radiat. Meas.* 40, 513–516.
240. Walia V, Virk HS, Yang T, Mahajan S, Walia M, Bajwa BS (2005b) Earthquake prediction studies using radon as a precursor in N-W Himalayas, India: a case study. *Terr Atmos Ocean Sci.* 16, 775–804.
241. Wang F, Ward IC (1999) Multiple Radon Entry Modeling in a House with a Cellar. *J. Air Waste Manag. Assoc.* 49, 682–693.
242. Weinlich FH, Faber E, Bouskova A, Horalek J, Teschner M, Poggenburg J (2006) Seismically induced variations in Mariánské Lázně fault gas composition in the NW Bohemian swarm quake region, Czech Republic-A continuous gas monitoring. *Tectonophysics* 421, 89–110.
243. WHO (World Health Organization ) (2009) Handbook on Indoor Radon: A Public Health Perspective PMID: 23762967, Geneva.
244. WHO (World Health Organization ) (2011) Guidelines for drinking-water quality, 4th ed. [https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/44584/9789241548151\\_eng.pdf](https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/44584/9789241548151_eng.pdf)
245. Wilkening M (1981) Radon in atmospheric studies: a review, Second special symposium Bhabha atomic research center January 19-23, Bombay, India
246. Wilkening M (1990) Chemistry and Physics of Radon, Chapter 3 *Stud. Environ. Sci.* 40, 25–28.
247. Wilson DL, Gammage RB, Dudney CS, Saultz RJ (1991) Summer time elevation of <sup>222</sup>Rn levels in Huntsville, Alabama. *Health Phys.* 60, 189–197.
248. Winkler-Heil R, Hofmann W, Marsh J, Birchall A (2007) Comparison of Radon Lung Dosimetry Models for the Estimation of Dose Uncertainties. *Radiat Prot dosimetry*, 127 (1-4), 27–30.
249. Wysocka M (2016) Radon problems in mining and post-mining areas in Upper Silesia region, Poland. *Nukleonika.* 61, 307–313.
250. Xie D, LiaoM, Kearfott KJ (2015) Influence of environmental factors on indoor radon concentration levels in the basement and ground floor of a building. A case study. *Radiat. Meas.* 82, 52–58.
251. Yang S, Pernot JG, Jörin CH, Niculita-Hirzel H, Perret V, Licina D (2019) Radon Investigation in 650 Energy Efficient Dwellings in Western Switzerland: Impact of Energy Renovation and Building Characteristics. *Atmosphere.* 10, 777.
252. Yang T F, Walia V, Chyi L, Fu C C, Chen C H, Liu T K, Song S R, Lee C Y, Lee M (2005) Variations of soil radon and thoron concentrations in a fault zone and prospective earthquakes in SW Taiwan. *Radiation Measurements*, 40(2), 496–502.
253. Yarmoshenko I, Onishchenko AD, Malinovsky GP, Vasilyev AV, Nazarov EI, Zhukovsky MV (2020) Radon concentration in conventional and new energy efficient multistorey apartment houses: Results of survey in four Russian cities. *Sci. Rep.* 10, 1–14.
254. Yarmoshenko I, Vasilyev A, MalinovskyG, Bossew P, Žunić ZS, Onischenko A, Zhukovsky M (2016) Variance of indoor radon concentration: Major influencing factors. *Sci. Total Environ.* 541, 155–160.

255. Yarmoshenko I, Vasilyev A, Ekin A, Pyshkina M, Malinovsky G, Onishchenko A, Zhukovsky M (2021) Non-destructive measurements of natural radionuclides in building materials for radon entry rate assessment. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 328, 727–737.
256. Yusuff IM, Adagunodo TA, Omoloye MA, Olanrewaju AM (2019) Interdependency of soil-gas radon-222 concentration on soil porosity at different soil-depths. *J. Phys. Conf. Ser.* 1299, 012099.
257. Zhu H C, Charlet J M, Tondeur F (1998) Geological controls to the indoor radon distribution in southern Belgium. *Sci Total Environ*, 220 (2-3), 195-214.

## Биографија

### Душица М. Спасић (девојачко Ристић)

Рођена 23.06.1987. године у Косовској Митровици. 06.03.2013 године завршила Природно-математички факултет у Приштини са привременим седиштем у Косовској Митровици, студијска група физика, са просечном оценом 9,07 и стекла стручно звање професор физике. 2013. године добила запослење на месту сарадника у настави, Природно-математички факултет у Приштини, где и даље ради као асистент. Предмет њеног истраживања је у области радијационе физике, мерење и детекција радиоактивног гаса радона  $^{222}\text{Rn}$ . До сада је објавила 4 научна рада који се налазе на SCI листи: један рад у међународном часопису изузетних вредности (категорија M21a), један рад у врхунском међународном часопису (категорија M21), два рада у истакнутом часопису међународног значаја (категорија M22), пет саопштења на међународним конференцијама категорије M33 и M34, као и шест саопштења на домаћим научним конференцијама категорија M63. Активно учествује у раду са студентима физике и биологије Природно-математичког факултета Универзитета у Приштини, изводећи вежбе из предмета на основним академским студијама: Молекуларна физика и термодинамика, Методологија решавања рачунских задатака, Радијациона физика, Основи нуклеарне физике, Дозиметрија и детекција зрачења, Експерименталне методе у физици, Електромагнетизам 2, Обновљиви извори енергије, Физика за студенте биологије; и предмета на мастер академским студијама: Радиоекологија и заштита животне средине и Соларна енергетика. Стекла је радно искуство у настави и активно се бави научно-истраживачким радом.